

Journal für Forschung und Praxis
im Küstingenieurwesen an Nord- und Ostsee

DIE KÜSTE

Journal of Coastal Engineering Research
and Practice at the North and Baltic Sea

The Baltic Sea storm surge in October 2023
Die Ostsee-Sturmflut im Oktober 2023



Journal für Forschung und Praxis
im Küstingenieurwesen an Nord- und Ostsee

DIE KÜSTE

Journal of Coastal Engineering Research
and Practice at the North and Baltic Sea

The Baltic Sea storm surge in October 2023

Die Ostsee-Sturmflut im Oktober 2023

Publisher:

Federal Waterways Engineering Research Institute (BAW)

Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe

P.O. Box 21 02 53, 76152 Karlsruhe

Phone: 0721 9726-3380

Fax: 0721 9726-5320

izw@baw.de, www.baw.de

Printed by: BSH Druckerei Rostock



Legal notice

Editor:

German Coastal Engineering Research Council (KFKI)

Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg, Germany
Phone: +49 (0) 40 81908 392, Fax: +49 (0)40 81908 373
kfkki@baw.de, www.kfkki.de

Chief Editor: Prof. Dr. Jürgen Jensen, University of Siegen,
Research Institute for Water and Environment, Adolf-Reichwein-Straße 2a, 57076 Siegen

Editors: Dr. Jacobus Hofstede, Ministry for Energy Transition, Climate Protection, Environment and Nature
of the State of Schleswig-Holstein, Mercatorstraße 3, 24106 Kiel

Prof. Dr. Christian Winter, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institute of Geosciences,
Coastal Geology and Sedimentology, Otto-Hahn-Platz 1, 24118 Kiel

Chairperson: Olaf Simon, Hamburg Ministry for the Environment, Climate, Energy and Agriculture,
Department of Water, Wastewater and Geology, Neuenfelder Str. 19, 21109 Hamburg

Managing Director: Dr. Ingrid Holzwarth, German Coastal Engineering Research Council (KFKI),
c/o Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW), Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg

Head of Coastal Research: Prof. Frank Thorenz, Lower Saxony Water Management,
Coastal Protection and Nature Conversation Agency (NLWKN), Jahnstraße 1, 26506 Norden

ISSN: 0452-7739

ISBN: 978-3-939230-97-7

DOI: <https://doi.org/10.18171/1.094100>

Hamburg, 2024, volume 94



The authors are responsible for the content of the articles.

Images are protected by the Creative Commons License BY 4.0 NC ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.en>), unless indicated otherwise. If any other copyright notice applies, further use (translation, reprinting or other reproduction) is only permitted with the consent of the author.

Inhaltsverzeichnis

<i>Editorial bilingual – zweisprachig</i> <i>Christian Winter and Jacobus Hofstede</i>	1
The October 2023 Baltic Sea storm surge – insights from a multidisciplinary perspective Die Ostsee-Sturmflut vom Oktober 2023 – Einblicke aus multidisziplinärer Perspektive https://doi.org/10.18171/1.094116	
<i>Simon Beckmann, Arne Arns, Dirk Fleischer und Jürgen Stamm</i> Hydrodynamische Rekonstruktion des Sturmhochwassers vom 20./21. Oktober 2023 https://doi.org/10.18171/1.094112	9
<i>Simon Beckmann, Jürgen Jensen, Arne Arns und Sebastian Niehüser</i> Integration von erweiterten Informationen in die statistische Analyse am Beispiel von Flensburg – Einordnung des Wiederkehrintervalls des Sturmhochwassers vom 20./21. Oktober 2023 https://doi.org/10.18171/1.094111	27
<i>Sebastian Bokhari Irminger, Anna Adell, Marianne Karlsson, Sofie Schöld and Åke Magnusson</i> 49 Impact and response of storm Babet from a Swedish perspective https://doi.org/10.18171/1.094115	
<i>Thomas Hirschhäuser, Maria Blümel, Thorsten Dey, Hauke Thiesen, Jörg Peters, Lutz Christiansen und Benjamin Franz</i> Die Ostseesturmflut Oktober 2023 in Schleswig-Holstein https://doi.org/10.18171/1.094103	71
<i>Jacobus Hofstede und Jan Aufderbeck</i> Die Ostseesturmflut im Oktober 2023: Schäden an Küstenschutzanlagen und Konsequenzen für den Küstenschutz in Schleswig-Holstein https://doi.org/10.18171/1.094102	89
<i>Jürgen Holfort</i> Die Ostseesturmflut vom 19. bis 21. Oktober 2023 aus der Sicht des Wasserstandsvorhersagedienstes Ostsee https://doi.org/10.18171/1.094107	111
<i>Elke M.I. Meyer, Lidia Gaslikova, Nikolaus Groll und Ralf Weisse</i> The Baltic storm surges of 1872 and 2023 – what do they have in common? https://doi.org/10.18171/1.094106	121

- Herwig Nöthel, Volker Neemann, Laura Hausmann, Hagen Bauerhorst und Nico Schwuchow* 133
Ablauf der Ostseesturmflut vom Oktober 2023
<https://doi.org/10.18171/1.094109>
- Karsten Peters, Martin Jannsen und Barbara Feyock* 161
Sturmflutschäden im Yachthafen Damp
<https://doi.org/10.18171/1.094110>
- Karsten Peters, Udo Scholz, Peer Knöfler und Sören Blaschke* 171
Dokumentation der Sturmflutschäden in Großenbrode, Sütel und Süssau
<https://doi.org/10.18171/1.094113>
- Eike M. Schütt, Kerstin Stelzer, Jorrit Scholze, Marcel König, Lutz Christiansen and Natascha Oppelt* 189
Beyond the 2023 surge: Quantifying shoreline dynamics in the German Baltic Sea with Sentinel-2
<https://doi.org/10.18171/1.094105>
- Guntram Seiß* 213
Die Ostseesturmflut vom 20./21. Oktober – Ursachen des vergleichsweise hohen Schadensaufkommens sowie Betrachtung im Hinblick auf mögliche Minimierungsstrategien
<https://doi.org/10.18171/1.094101>
- Marcus Siewert, Anja Klee, Lars Tiepolt und Frank Weichbrodt* 229
Die Ostseesturmflut vom Oktober 2023 an den sandigen Flachküsten und Binnenküsten von Mecklenburg-Vorpommern
<https://doi.org/10.18171/1.094108>
- Henriette Sudhans* 245
Capabilities of satellite radar measurements to map large-scale flooding
[Satellite flood mapping]
<https://doi.org/10.18171/1.094114>
- Lars Wiesenberg, Christian Weidle, Knut Krämer, Christoph Pilger, Christian Winter und Thomas Meier* 257
Seismic monitoring of the October 2023 storm surge along the coast of the Baltic Sea
<https://doi.org/10.18171/1.094104>

The October 2023 Baltic Sea storm surge – insights from a multidisciplinary perspective

Die Ostsee-Sturmflut vom Oktober 2023 – Einblicke aus multidisziplinärer Perspektive

Christian Winter¹ and Jacobus Hofstede²

¹ Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel;
christian.winter@ifg.uni-kiel.de

² Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur des Landes Schleswig-Holstein;
jacobus.hofstede@mekun.landsh.de

Editorial – bilingual – zweisprachig

1 Introduction

The Baltic Sea storm surge of October 19–21, 2023 was an exceptional event with high impact to the German coast, particularly that of the Federal State of Schleswig-Holstein. This special volume brings together fifteen studies documenting the impacts on flood defenses and other public and private infrastructure. Further contributions analyze the event from meteorological, hydrological, engineering, remote sensing, and policy perspectives.

This storm surge ranked among the most severe events in recent history for the German Baltic Sea coast. It was classified as a “very severe storm surge” for several gauges in Schleswig-Holstein and “severe” for Mecklenburg-Vorpommern. Peak water levels in Schleswig-Holstein had reached well over 2 m above mean sea level at several gauges: 2.27 m in Flensburg, 2.20 m in Langballig, 2.07 m in Schleimünde, etc; rating the event as the second highest in nearly 200 years of records in northern Schleswig-Holstein (Nöthel et al. 2025). Return intervals are site specific, ranging from 20 to 200 years (Beckmann et al. 2025a). The Schleswig gauge in the Schlei Fjord recorded the highest peak water level at 2.29 m above mean sea level, which corresponds to a return interval of 100 to 200 years (Hirschhäuser et al. 2025).

Three key factors contributed to the event:

1. A stationary high-pressure system over Scandinavia and a low-pressure system over Central Europe generated persistent easterly winds reaching 29 m/s (Nöthel et al. 2025, Meyer et al. 2025).
2. Pre-existing elevated water levels in the Baltic Sea, combined with wind setup and basin oscillations (seiches), amplified the surge effects (Nöthel et al. 2025).
3. The shallow western Baltic (17–27 m depth) and coastal constrictions like the Lübeck Bight further enhanced water level increases (Beckmann et al. 2025b).

The long duration, locally lasting over 50 hours (Holfort 2025), differed significantly from previous events in the area (Schütt et al. 2025) and caused prolonged coastal flooding and destructive wave attack along many natural and protected stretches. Eight of 35 regional

dike systems in Schleswig-Holstein failed and about 20 required comprehensive repair (Hofstede and Aufderbeck 2025). In all, 5.740 ha of land was flooded during the event, including also city centers, e.g., in Eckernförde and Flensburg. Peters et al. (2025a, 2025b) and Seiß (2025) documented the extensive damage to public and private assets like marinas and campsites. The event led to extensive disaster response measures, including the evacuation of people from vulnerable areas. The state authority responsible for coastal flood defense in Schleswig-Holstein provided over 200.000 sandbags, 1.350 big bags, 600 sand containers, and 2.500 tons of iron silicate rocks (Hofstede and Aufderbeck. 2025). Due to the lower peak water levels in Mecklenburg-Vorpommern (Nöthel et al. 2025), the damage here was comparatively moderate and easier to manage (Siewert et al. 2025).

The contributions in this special volume address several interconnected themes: Hydrological and meteorological drivers were analyzed by Holfort (2025), Nöthel et al. (2025) and Meyer et al. (2025), who identified the primary mechanisms of extreme conditions. Meyer's comparison with the 1872 storm surge, the only event with recorded higher peak water levels, revealed similar atmospheric patterns but different spatial impacts. Holfort (2025) argued that in the Schlei, which only has a narrow connection to the Baltic Sea, heavy rainfall might have contributed to the height of the local surge. Geomorphic responses were quantified by Schütt et al. (2025) using Sentinel-2 satellite data, showing variable erosion patterns along the coast. Their Shoreline Extraction and Change Analysis Tool (SEaCAT) exemplarily showed how the Schleimünde sand spit experienced six months of continued erosion post-event, while other areas recovered more quickly. Bohkari Irminger et al. (2025) complemented these findings with LiDAR surveys documenting 1.3 million m³ of sediment loss along the Swedish coast. Monitoring innovations were showcased by Wiesenbergs et al. (2025), who demonstrated how seismic networks could track wave energy during the event, and by Sudhaus (2025), who mapped flood extents using SAR satellite imagery even after water levels receded.

The studies employed diverse methodological approaches: Historical analysis by Beckmann et al. (2025a) integrated pre-1950 flood records into extreme value statistics. Their work assigned the 2023 event a 70-year return period in Flensburg, which lies in the range (50 to 100 years) given by Hirschhäuser et al. (2025) and Holfort (2025). Hydrodynamic modeling by Beckmann et al. (2025b) reconstructed the event using the unstructured-grid model SCHISM, validating results against 42 tide gauges. Their simulations highlighted how bathymetric features like the Darss Sill modulated surge propagation. Remote sensing techniques were applied by Schütt et al. (2025) achieving 10 m resolution shoreline change detection using Sentinel-2, while Sudhaus (2025) demonstrated SAR's capability to map flooded areas despite vegetation cover. Seismic monitoring by Wiesenbergs et al. (2025) established that coastal stations within 25–30 km could effectively track local wave activity through secondary microseism signals in the 2–10 s period range.

A synthesis of the studies yields several key insights: The event's meteorological drivers were similar to 1872, but produced different spatial impacts due to variations in the pressure gradient (Meyer et al. 2025). The 2023 surge's westward concentration left eastern areas like Sassnitz with high winds but lower water levels (Nöthel et al. 2025). Coastal responses varied depending on the geomorphic setting. Dune systems in Mecklenburg-Vorpommern showed resilience through sediment redistribution (Siewert et al. 2025), while the Schleimünde spit experienced prolonged erosion (Schütt et al. 2025). The damage to the regional dikes in Schleswig-Holstein revealed systemic problems in non-governmental

coastal flood defenses (Hofstede and Aufderbeck 2025). For smaller municipalities and local water associations, appropriate maintenance of their regional dikes represents a major challenge, especially in light of climate change induced stronger sea level rise.

The event has driven several policy developments. Schleswig-Holstein's offer to assume responsibility for coastal flood defense in densely populated coastal lowlands protected by regional dikes (Hofstede and Aufderbeck 2025) represents a governance shift, acknowledging the challenges faced by local municipalities and water associations. Improved flood forecasting has emerged as a priority (Holfort 2025). Beckmann et al. (2025a) demonstrate how historical data integration may contribute to producing more accurate return period estimates, while Wiesenbergs et al. (2025) show seismic networks' potential for real-time monitoring. Adaptive measures for private assets are advocated by Peters et al. (2025b) and Seiß (2025), including floating marina systems and evacuation plans for campsites. These relatively low-cost solutions could significantly reduce future damages.

The October 2023 surge provides critical insights for coastal risk management:

1. The event underscores the need for technical defense systems that account for both peak water levels and surge duration – a factor previously underestimated in design standards for the Schleswig-Holstein Baltic Sea coast (Hirschhäuser et al. 2025).
2. It highlights the value of multidisciplinary monitoring networks combining traditional gauges with seismic, satellite, and modeling approaches for comprehensive event documentation.
3. The studies collectively demonstrate that sustainable adaptation to climate change induced stronger sea level rise and higher storm surge water levels requires both technical solutions and governance reforms, particularly for addressing systemic vulnerabilities in decentralized protection systems.

As climate change is ongoing, the integration of these lessons into coastal applied and fundamental research and flood risk management will be essential for building resilient communities along the Baltic coast.

2 Einführung

Diese Sturmflut (In den Beiträgen wird das Ereignis synonym als Sturmhochwasser, Ostseesturmflut, oder vereinfacht Sturmflut bezeichnet. Letztere Bezeichnung folgt der Definition des Bundesamts für Seeschiffahrt und Hydrographie und bezieht sich nicht auf eine erhöhte Flut im Sinne von Gezeitenperioden.) zählte zu den schwersten Ereignissen der jüngeren Geschichte an der deutschen Ostseeküste. Sie wurde für mehrere Pegel in Schleswig-Holstein als „sehr schwere Sturmflut“ und für Mecklenburg-Vorpommern als „schwere Sturmflut“ eingestuft. Die Spitzennasserstände in Schleswig-Holstein erreichten an mehreren Pegeln weit über 2 m über dem mittleren Meeresspiegel: 2,27 m in Flensburg, 2,20 m in Langballig, 2,07 m in Schleimünde usw.; damit war das Ereignis das zweithöchste in den fast 200 Jahren der Aufzeichnungen im nördlichen Schleswig-Holstein (Nöthel et al. 2025). Die Wiederkehrintervalle sind standortspezifisch und reichen von 20 bis 200 Jahren (Beckmann et al. 2025a). Am Pegel Schleswig in der Schlei-Förde wurde der höchste Spitzennasserstand mit 2,29 m über NN gemessen, was einem Wiederkehrintervall von 100 bis 200 Jahren entspricht (Hirschhäuser et al. 2025).

Drei Hauptfaktoren trugen zu dem Ereignis bei:

1. Ein stationäres Hochdruckgebiet über Skandinavien und ein Tiefdrucksystem über Mitteleuropa führten zu anhaltenden Ostwinden mit Windgeschwindigkeiten von bis zu 29 m/s (Nöthel et al. 2025, Meyer et al. 2025).
2. Wasserstände waren durch Windstau und Beckenoszillationen (Seiches) zuvor erhöht (Nöthel et al. 2025).
3. Die flache westliche Ostsee (17–27 m Tiefe) und trichterförmige Geometrien wie die Lübecker Bucht verstärkten den Wasserstand zusätzlich (Beckmann et al. 2025b).

Die lange Dauer des Ereignisses – teilweise über 50 Stunden (Holfort 2025) – wich deutlich von früheren Sturmfluten ab (Schütt et al. 2025) und führte zu langanhaltenden Überflutungen und zerstörerischem Wellenschlag an vielen natürlichen und geschützten Küstenabschnitten. Acht von 35 Regionaldeichen in Schleswig-Holstein versagten, rund 20 mussten umfassend repariert werden (Hofstede und Aufderbeck 2025). Insgesamt wurden 5.740 Hektar Land überflutet, darunter auch Bereiche der Stadtzentren in Eckernförde und Flensburg. Peters et al. (2025a, 2025b) und Seiß (2025) dokumentierten umfangreiche Schäden an öffentlichen und privaten Anlagen wie Marinas und Campingplätzen. Das Ereignis führte zu umfangreichen Katastrophenschutzmaßnahmen, einschließlich Evakuierungen. Die für den Küstenschutz zuständige Landesbehörde stellte über 200.000 Sandsäcke, 1.350 Big Bags, 600 Sandcontainer und 2.500 Tonnen Eisensilikatsteine bereit (Hofstede und Aufderbeck 2025). Aufgrund niedrigerer Scheitelwasserstände in Mecklenburg-Vorpommern (Nöthel et al. 2025) fielen die Schäden dort vergleichsweise moderat aus und waren besser zu bewältigen (Siewert et al. 2025).

Die Beiträge in diesem Sonderband behandeln verschiedene miteinander verknüpfte Themen: Die hydrologischen und meteorologischen Ursachen der Sturmflut wurden von Holfort (2025), Nöthel et al. (2025) und Meyer et al. (2025) untersucht. Meyers Vergleich mit der Sturmflut von 1872 – dem einzigen bekannten Ereignis mit noch höheren Wasserständen – zeigte ähnliche meteorologische Muster, jedoch unterschiedliche räumliche Auswirkungen. Holfort (2025) spekuliert, dass in der Schlei, die nur eine schmale Verbindung zur Ostsee besitzt, auch der starke Regen zur Höhe des lokalen Sturmhochwassers beigetragen haben könnte. Geomorphologische Veränderungen wurden von Schütt et al. (2025) mithilfe von Sentinel-2-Satellitendaten erfasst, die unterschiedliche Erosionsmuster entlang der Küste zeigen. Ihr „Shoreline Extraction and Change Analysis Tool“ (SEaCAT) zeigt zum Beispiel, dass an der Sandnehrung bei Schleimünde noch sechs Monate nach dem Ereignis Erosion zu erkennen war, während andere Bereiche sich erholt hatten. Bokhari Irminger et al. (2025) ergänzten diese Ergebnisse durch LiDAR-Vermessungen entlang der schwedischen Küste, die einen Sedimentverlust von 1,3 Millionen m³ dokumentierten. Innovationen im Monitoring wurden von Wiesenbergs et al. (2025) vorgestellt. Sie zeigen, wie seismische Netzwerke Aussagen zur Wellenenergie während solcher Ereignisse erfassen. Sudhaus (2025) zeigt, wie überflutete Gebiete mithilfe von SAR-Satellitenbildern kartiert werden können – auch nachdem sich das Wasser zurückgezogen hatte.

Die Studien verwendeten verschiedene methodische Ansätze: Eine historische Analyse von Beckmann et al. (2025a) integrierte historische Hochwasserdaten in die Extremwertstatistik. Sie wiesen dem Ereignis von 2023 für Flensburg eine Wiederkehrzeit von 70 Jahren zu – im Bereich der 50 bis 100 Jahre, die auch Hirschhäuser et al. (2025) und Holfort

(2025) angeben. Eine hydrodynamische Modellierung durch Beckmann et al. (2025b) rekonstruierte das Ereignis mit dem unstrukturierten numerischen Modell SCHISM und validierte die Ergebnisse an 42 Pegelstationen. Die Simulationen zeigten, wie bathymetrische Gegebenheiten wie die Darßer Schwelle die Ausbreitung der Flut beeinflussten. Fernerkundungstechniken wurden von Schütt et al. (2025) mit einer 10-m-Auflösung zur Uferliniendetektion angewendet, während Sudhaus (2025) demonstriert, wie durch SAR selbst bei Vegetationsbedeckung überflutete Gebiete kartiert werden können. Die seismologischen Daten von Wiesenberg et al. (2025) zeigte, dass Küstenstationen im Umkreis von 25–30 km lokale Wellenaktivitäten anhand von Mikroseismik-Signalen im 2–10 s-Periodenbereich effektiv verfolgen konnten.

Aus der Gesamtschau der Studien ergeben sich mehrere zentrale Erkenntnisse: Die meteorologischen Bedingungen ähnelten denen von 1872, führten jedoch zu anderen räumlichen Auswirkungen aufgrund unterschiedlicher Druckgradienten (Meyer et al. 2025). Die Sturmflut ließ östliche Regionen wie Sassnitz zwar starke Winde, aber geringere Wasserstände erleben (Nöthel et al. 2025). Die Reaktionen der Küste variierten je nach geomorphologischen Bedingungen: Dünensysteme in Mecklenburg-Vorpommern zeigten Resilienz durch Sedimentumlagerungen (Siewert et al. 2025), während die Nehrung bei Schleimünde eine anhaltende Erosion erfuhr (Schütt et al. 2025). Die Schäden an Regionaldeichen in Schleswig-Holstein offenbarten systemische Schwächen im Küstenschutz (Hofstede und Aufderbeck 2025). Für kleinere Gemeinden und Wasserverbände stellt die angemessene Instandhaltung von Regionaldeichen eine große Herausforderung dar – insbesondere im Hinblick auf den durch den Klimawandel verstärkten Meeresspiegelanstieg.

Das Ereignis hat mehrere politische Entwicklungen angestoßen. Das Angebot des Landes Schleswig-Holsteins, die Verantwortung für den Küstenschutz in dicht besiedelten, tief liegenden Küstengebieten mit regionalem Deichschutz zu übernehmen (Hofstede und Aufderbeck 2025), stellt einen Wandel in der Governance dar und erkennt die Herausforderungen für lokale Akteure an. Verbesserte Hochwasservorhersagen sind zu einer Priorität geworden (Holfort 2025). Beckmann et al. (2025a) zeigen, wie die Einbindung historischer Daten zu genaueren Wiederkehrzeitschätzungen beitragen kann, während Wiesenberg et al. (2025) das Potenzial seismischer Netzwerke für das Echtzeitmonitoring demonstrieren. Für private Anlagen empfehlen Peters et al. (2025b) und Seiß (2025) adaptive Maßnahmen wie schwimmende Hafensysteme und Evakuierungspläne für Campingplätze – vergleichsweise kostengünstige Lösungen, die zukünftige Schäden erheblich verringern könnten.

Die Sturmflut im Oktober 2023 liefert zentrale Erkenntnisse für das Küstenrisikomanagement:

1. Das Ereignis unterstreicht die Notwendigkeit technischer Schutzsysteme, die sowohl den Spitzenwasserstand als auch die Dauer des Anstiegs berücksichtigen – ein Aspekt, der bisher in den Bemessungsgrundlagen für die schleswig-holsteinische Ostseeküste unterschätzt wurde (Hirschhäuser et al. 2025).
2. Es zeigt den Wert multidisziplinärer Monitoringnetzwerke auf, die traditionelle Pegel mit seismischen, satellitengestützten und modellbasierten Ansätzen kombinieren.
3. Die Studien zeigen, dass nachhaltige Anpassung an den klimabedingt stärkeren Meeresspiegelanstieg und höhere Sturmflutwasserstände sowohl technische Lösungen als auch Reformen in der Governance erfordert – insbesondere zur Behebung systemischer Schwächen in dezentralen Schutzsystemen.

Da der Klimawandel immer weiter fortschreitet, wird die Integration dieser Erkenntnisse in die angewandte und grundlagenorientierte Küstenforschung sowie das Hochwasserrisikomanagement entscheidend sein, um widerstandsfähige Küstengemeinden an der Ostsee zu schaffen.

3 References – Literaturverzeichnis

- Beckmann, S.; Jensen, J.; Arns, A.; Niehüser, S.: Integration von erweiterten Informationen in die statistische Analyse am Beispiel von Flensburg. In: Die Küste, 94, 2025a.
- Beckmann, S.; Arns, A.; Fleischer, D.; Stamm, J.: Hydrodynamische Rekonstruktion des Sturmhochwassers vom 20./21. Oktober 2023. In: Die Küste, 94, 2025b.
- Bokhari Irminger, S.; Adell, A.; Karlsson, M.; Schöld, S.; Magnusson, Å.: Impact and response of storm Babet from a Swedish perspective. In: Die Küste, 94, 2025.
- Hirschhäuser, T.; Blümel, M.; Dey, T.; Thiesen, H.; Peters, J.; Christiansen, L.; Franz, B.: Die Ostseesturmflut Oktober 2023 in Schleswig-Holstein. In: Die Küste, 94, <https://doi.org/10.18171/1.094103>, 2025.
- Hofstede, J.; Aufderbeck, J.: Die Ostseesturmflut im Oktober 2023: Schäden an Küstenschutzanlagen und Konsequenzen für den Küstenschutz in Schleswig-Holstein. In: Die Küste, 94, <https://doi.org/10.18171/1.094102>, 2025.
- Holfort, J.: Die Ostseesturmflut vom 19. bis 21. Oktober 2023 aus der Sicht des Wasserstandsvorhersagedienstes Ostsee. In: Die Küste, 94, <https://doi.org/10.18171/1.094107>, 2025.
- Meyer, E. M. I.; Gaslikova, L.; Groll, N.; Weisse, R.: The Baltic storm surges of 1872 and 2023 – what do they have in common? In: Die Küste, 94, <https://doi.org/10.18171/1.094106>, 2025.
- Nöthel, H.; Neemann, V.; Hausmann, L.; Bauerhorst, H.; Schwuchow, N.: Ablauf der Ostseesturmflut vom Oktober 2023. In: Die Küste, 94, <https://doi.org/10.18171/1.094109>, 2025.
- Peters, K.; Scholz, U.; Knöfler, P.; Blaschke, S.: Dokumentation der Sturmflutschäden in Großenbrode, Sütel und Süssau. In: Die Küste 94, 2025a.
- Peters, K.; Jannsen, M.; Feyock, B.: Sturmflutschäden im Yachthafen Damp. In: Die Küste, 94, 2025b.
- Schütt, E. M.; Stelzer, K.; Scholze, J.; König, M.; Christiansen, L.; Oppelt, N.: Beyond the 2023 surge: Quantifying shoreline dynamics in the German Baltic Sea with Sentinel-2. In: Die Küste, 94, <https://doi.org/10.18171/1.094105>, 2025.
- Seiß, G.: Die Ostseesturmflut vom 20./21. Oktober – Ursachen des vergleichsweise hohen Schadensaufkommens sowie Betrachtung im Hinblick auf mögliche Minimierungsstrategien. In: Die Küste, 94, <https://doi.org/10.18171/1.094101>, 2025.
- Siewert, M.; Klee, A.; Tiepolt, L.; Weichbrodt, F.: Die Ostseesturmflut vom Oktober 2023 an den sandigen Flachküsten und Binnenküsten von Mecklenburg-Vorpommern. In: Die Küste, 94, <https://doi.org/10.18171/1.094108>, 2025.

Sudhaus, H.: Capabilities of satellite radar measurements to map large-scale flooding. In: Die Küste, 94, 2025.

Wiesenber, L.; Weidle, C.; Krämer, K.; Pilger, C.; Winter, C.; Meier, T.: Seismic monitoring of the October 2023 storm surge along the coast of the Baltic Sea. In: Die Küste, 94, <https://doi.org/10.18171/1.094104>, 2025.

Hydrodynamische Rekonstruktion des Sturmhochwassers vom 20./21. Oktober 2023

Simon Beckmann¹, Arne Arns², Dirk Fleischer³ und Jürgen Stamm³

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

² Hochschule RheinMain Wiesbaden, Professur für Wasserbau, Wasserwirtschaft und Hydrologie

³ TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD)

Zusammenfassung

Das Sturmhochwasser vom 20./21.10.2023 traf mit außerordentlichen Wasserständen die Küsten der deutschen und dänischen Ostsee. Auf Basis von meteorologischen Reanalysen wurde das Ereignis mithilfe eines hydrodynamisch-numerischen Modells zeitlich und flächendeckend rekonstruiert und durch Wasserstandsmessungen validiert. Die komplexen hydrologischen Prozesse des Sturmhochwassers konnten anschließend detailliert analysiert werden, um Einblicke in den Füllungsgrad der Ostsee, die Scheitelwerte und die Verweilzeiten der erhöhten Wasserstände zu gewinnen.

Die Analyse verdeutlicht die komplexen Herausforderungen im Küstenschutz als Daueraufgabe, insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels und des steigenden Meeresspiegels. Hydrodynamische Simulationen stellen eine wertvolle Möglichkeit dar auch historische Hochwasserereignisse hochauflöst zu rekonstruieren und diese somit bei künftigen Planungsaufgaben von Küstenschutzanlagen zu integrieren.

Die Studie zielt auf die Bereitstellung von für den Küstenschutz relevanten Wasserstandsinformationen an Standorten, an denen keine Pegel vorhanden sind, ab. Im Sinne der wissenschaftlichen Praxis werden die Simulationsergebnisse öffentlich zugänglich über den Daten Publisher PANGAEA bereitgestellt.

Schlagwörter

Hydrodynamische Simulation, Sturmhochwasser, Ostsee

Summary

The storm surge of October 20/21 in 2023 impacted the coasts of the German and Danish Baltic Sea with extraordinary water levels. Based on meteorological reanalyses, the event was reconstructed using a hydrodynamic-numerical model and validated by water level measurements. The complex hydrological processes of the storm surge were then analyzed in detail in order to gain insights into the degree of filling of the Baltic Sea, the peak water levels and the duration of the increased water levels.

The analysis illustrates the complex challenges in coastal flood protection as a permanent task, especially in the context of climate change and rising sea levels. Hydrodynamic simulations represent a valuable opportunity to reconstruct past flood events in high resolution and thus to integrate them into future planning tasks for coastal protection facilities.

The study aims to provide water level information relevant for coastal protection at locations where no water gauges are available. In line with scientific practice, the simulation results are made publicly accessible via the data publisher PANGAEA.

Keywords

Hydrodynamic simulation, storm surge, Baltic Sea

1 Einleitung

Stürme und daraus resultierende Hochwasserereignisse bilden an der Ostseeküste heute wie damals ein erhebliches Gefahrenpotenzial. Präsent wurde dies wiederum in der Nacht vom 20. auf den 21.10.2023, als ein starker Oststurm zu einem (sehr) schweren Sturmhochwasser an der deutschen und dänischen Ostseeküste führte. Der Küstenschutz der südwestlichen Ostseeküste, insbesondere im Bereich der nördlichen schleswig-holsteinischen und südlichen dänischen Küste, wurde mit außergewöhnlich hohen Wasserständen nach langer Zeit wieder auf die Probe gestellt. Auch wenn an den meisten Küsten die Elemente des Küstenschutzes dem Sturmhochwasser standhielten, führten einigerorts gebrochene Deiche, Überflutungen von Häusern und Dörfern, zerstörte Hafenanlagen, beschädigte Promenaden und Infrastruktur sowie gesunkene bzw. beschädigte Yachten und Sportboote zu Schäden im dreistelligen Millionenbereich. Rund 2.000 Menschen mussten in gefährdeten Gebieten evakuiert werden. Besonders betroffen waren dabei Abschnitte der Schlei. Nach aktuellem Kenntnisstand können den Wasserständen unter Einbeziehung von historischen Sturmfluten einem Wiederkehrintervall von ca. 70 Jahren (Flensburg) zugeordnet werden (Beckmann et al. 2024). Weitere Schätzungen variieren 100 Jahren in Flensburg bzw. 250 Jahren im naheliegenden Schleswig (Hofstede 2023).

Diese Überlastungen des Küstenschutzes und die daraus resultierenden hohen Schäden werfen erneut die Frage einer zuverlässigen (und damit nachhaltigen) Bemessung auf. Neben der stetigen Verbesserung/Überprüfung der Bemessungswerkzeuge gilt es für eine belastbare Ermittlung der Bemessungswasserstände möglichst repräsentative Zeitreihen mit qualitativ hochwertigen Daten für die statistische Analyse zu verwenden bzw. zu erarbeiten. Informationen über Wasserstände stehen jedoch – wenn überhaupt – nur an Pegelstandorten zur Verfügung, die teils mehrere Kilometer auseinander liegen. An den meisten Küstenabschnitten werden keine Wasserstände gemessen, so dass diese über statistische Verfahren übertragen werden. Inwieweit dabei lokale/regionale Effekte hinsichtlich der Ausprägung der Wasserstände berücksichtigt werden können, bleibt offen. Durch hydrodynamisch-numerische Simulationen dagegen können diese Effekte durch die Verwendung von physikalisch basierten Gleichungen, meteorologischen Rekonstruktionen und aktuellen Bathymetrien berücksichtigt werden. Durch einen gewissen Rechen-, Modellierungs- und Kalibrierungsaufwand lassen sich hydrodynamische Simulationen flächendeckend über lange Zeiträume durchführen. Daraus folgt, dass zunehmend auch historische Ereignisse, wie z. B. 1872, 1904 und 1913 (vgl. Jensen et al. 2022) flächendeckend rekonstruiert (so in Rosenhagen und Bork 2009) und in Analysen integriert werden können.

Ebenso wurden die Wasserstände des Oktoberhochwassers 2023, wie üblich, punktuell an den Pegelstandorten entlang der Küstenlinie registriert. In großen Bereichen zwischen den Pegelstandorten lassen sich die hydrodynamischen Einwirkungen größtenteils nur

abschätzen. In dem vorliegenden Beitrag wird ein zeitlich und räumlich hoch aufgelöster Datensatz des Sturmhochwassers vom 20./21.10.2023 mittels hydrodynamisch-numerischer Modellierung geschaffen. Die Simulationsergebnisse werden anhand von Pegelmessungen und Beobachtungen validiert und anschließend detailliert analysiert.

Um einen Beitrag zur wichtigen, nachhaltigen Ermittlung von Bemessungshöhen der Küstenschutzanlagen zu leisten – besonders mit Blick auf die großen Abschnitte ohne Wasserstandsinformationen – werden die zeitlich und räumlich hochauflösten Modellergebnisse anschließend öffentlich über den Daten Publisher PANGAEA entsprechend den FAIR Prinzipien (findable, accessible, interoperable, reusable) bereitgestellt. Somit können qualitativ hochwertige, regionale Analysen durchgeführt werden, um den komplexen Herausforderungen im Küstenschutz gerecht zu werden.

2 Beschreibung des Oktoberhochwassers 2023

Bereits Tage vor dem Ereignis initiierten anhaltende Westwinde einen Zustrom von Wassermassen von der Nordsee über das Kattegat in die Ostsee, so dass die Wasserstände in der Kieler und in der Lübecker Bucht 20–50 cm und im Gebiet östlich Rügens 20–60 cm über dem mittleren Wasserstand (MW) lagen. Der Füllungsgrad der Ostsee betrug zwischen 35 und 45 cm (BSH 2023) und begünstigte die Entstehung des Sturmhochwassers.

Mit der Bildung des Sturmtiefes Wolfgang (975 hPa) über Südengland bzw. dem resultierenden Druckgradienten zu dem Hochdruckgebiet Wiebke (1025 hPa) über Mittelschwellen an der südwestlichen Ostsee drehten die Ostwinde zu einem ausgedehnten und langanhaltenden Oststurm. Die stärksten gemessenen Böen betrugen 133 km/h an Kap Arkona, 131 km/h am Kieler Leuchtturm, 108 km/h in Schönhagen und 105 km/h auf Fehmarn (DWD 2023). Die veränderte Wetterlage führte an der Nordsee dazu, dass die Wassermassen von der deutschen Küste weggedrückt wurden und sich ein extremes Niedrigwasser mit Auswirkungen auf den Schiffs- und Fährverkehr ausprägte. An der westlichen Ostsee führte die Wetterlage zu aufländigen Winden und somit angestauten Wasserständen, die in Folge zu einem (sehr) schweren Sturmhochwasser führten. Der Höhepunkt des Ereignisses trat in der Nacht vom 20.10. auf den 21.10.2023 ein.

In Abbildung 1 werden die maximalen beobachteten Wasserstände während des Ereignisses dargestellt. Die Pegelinformationen wurden aus dem Datensatz *Global Ocean* des Copernicus Marine Service (CMEMS) bezogen, der aus öffentlich verfügbaren Quellen nahezu in Echtzeit qualitätskontrolliert fortgeschrieben wird. Aufgrund der unterschiedlichen Höhenreferenzsysteme der an die Ostsee angrenzenden Länder ist die Auswertung der Wasserstände über die deutschen Grenzen hinweg mit einem unbekannten Fehler verbunden. Im Bereich der deutschen Küste ist anzunehmen, dass die Höhenreferenz dem Normalhöhennull (NHN) entspricht.

Bei dem Sturmhochwasser wurden an der nördlichen Küste Schleswig-Holsteins bzw. südlichen Küste Dänemarks bis zur Eckernförder Bucht die höchsten Wasserstände mit > 200 cm registriert. In den weiter östlich liegenden Bereichen bis Warnemünde betragen die maximalen Wasserstände zwischen 150 und 200 cm. Die Pegel an der Schlei sind aufgrund des Hochwassers ausgefallen, so dass nur Schätzungen bzw. Messungen über Notpegel vorliegen.

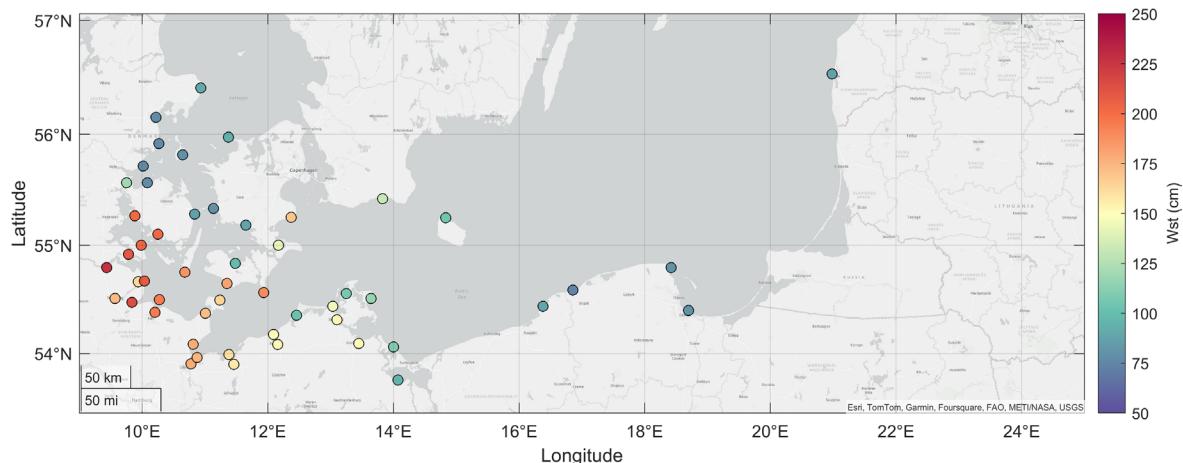


Abbildung 1: Maximale Wasserstände im Zeitraum 19.-23. Oktober 2023 an der südwestlichen Ostsee; (Quelle: *Global Ocean*).

Somit wurden an der Außenküste vielerorts Wasserstände erreicht, die in die Kategorie des schweren bis sehr schweren Sturmhochwassers fallen. Für Flensburg und einige weitere Pegel in der westlichen Ostsee ist dies je nach Datenbasis des Silvesterhochwassers von 1904 und der Berücksichtigung des mittleren Wasserstandes der höchste, bzw. zweithöchste Wasserstand seit des außerordentlichen Sturmhochwassers von 1872.

Um ein vollständiges Bild des Sturmhochwassers zu erhalten, ist es daher notwendig diese räumlich und zeitlich durch Simulationen mit Modellen zu rekonstruieren.

3 Hydrodynamisches Modell

Das für die Rekonstruktion des Sturmhochwassers genutzte Modell wurde im Rahmen des Forschungsprojektes ResCAD (BMBF-Förderkennzeichen 03F0927A-B) für die kleinräumige und detaillierte Analyse von hydrologischen Kenngrößen entwickelt. Der Fokus der Modellierung lag dabei auf den Wasserständen der Außenküste, maßgeblich auf dem Standort bei Ahrenshoop (ca. 30 km nordöstlich von Warnemünde). Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde die Hydrodynamik über den Zeitraum von 1940 bis 2022 simuliert, um eine ausreichende Datenbasis für eine statistische Analyse zu generieren. Das Sturmhochwasser vom Oktober 2023 bietet nun den Anlass, die Übertragbarkeit des Modells zu testen und die Datenbasis, um dieses wichtige Ereignis zu erweitern.

Zur Modellierung der Hydrodynamik wurde die Software MIKE 21/3 des *Danish Hydraulic Institute* (DHI) Water & Environment gewählt. MIKE 21/3 ist ein professionelles Softwarepaket für zweidimensionale aber auch für dreidimensionale Fragestellungen. Es eignet sich für die Simulation von hydraulischen und verwandten Phänomenen in Seen, Ästuarien, Buchten, Küstengebieten und Meeren. Das Softwarepaket ist modular aufgebaut, so dass je nach Fragestellung entsprechende Berechnungsmodelle hinzufügt bzw. entfernt werden können. Für die Rekonstruktion des Hochwasserereignisses wurde das auf einem zweidimensionalen, flexiblen Mesh basierende Hydrodynamische Modul (HD-FM) genutzt. Dabei werden die zweidimensionalen Flachwassergleichungen räumlich durch die Finite-Volumen-Methode gelöst.

Zur Analyse und graphischen Auswertung der Modellergebnisse wurde die Software Matlab® (R2024a) mit der Statistics and Machine Learning Toolbox verwendet.

3.1 Modellaufbau

In der Modellierung wird das Ziel verfolgt, zahlreiche räumliche Geoinformationen aus unterschiedlichen Quellen entsprechend der Fragestellung aufzubereiten und miteinander zu verknüpfen. Um möglichst losgelöst von limitierenden Randbedingungen (externer Energie- und Masseaustausch) zu sein, wurde die gesamte Ostsee als Modellfläche gewählt (vgl. Abbildung 2). Die zugrundeliegenden bathymetrischen Tiefeninformationen des Reliefs der Ostsee wurden aus den Datensätzen der IOW-Topografie (Institut für Ostseekunde Warnemünde, vgl. Seifert et al. 2001) mit einer Auflösung von 1x1 km bzw. 2x2 km bezogen und im Bereich der deutschen Küstengewässer durch höher aufgelöste Daten (50x50 m) aus dem GeoSeaPortal des BSH ergänzt. Als Küstenlinie wurden Daten durch die *Helsinki Comission* (HELCOM) bezogen. Diese stellt numerisch einen geschlossenen Rand dar, der keine Fließbewegung in Normalenrichtung (also orthogonal zur Küste) zulässt und somit nicht überströmbar ist. Somit werden Landgebiete nicht berücksichtigt und Überflutungen infolge verhindert. In Gebieten, die potenziell überflutungsgefährdet sind, kann dies durch den fehlenden Retentionsraum zu einer Überschätzung der Wasserstände führen, die sich besonders in den Gebieten der Innenküste ausprägen kann (vgl. Kiesel et al. 2023).

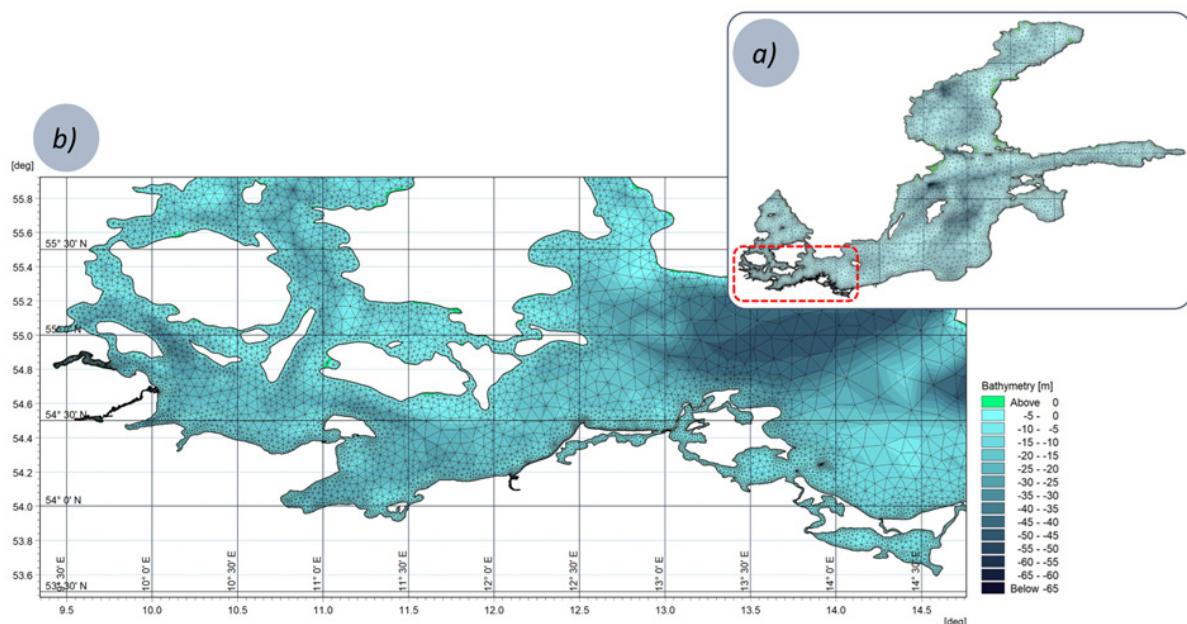


Abbildung 2: Darstellung der Modellfläche des Ostseemodells (a) und Ausschnitt für die deutsche Ostseeküste (b), inkl. der zugrundeliegenden Bathymetrie und des erstellten Berechnungsgitters.

Das Mesh bildet die Grundlage zur räumlichen Lösung der numerischen Gleichungen, indem geographischen Positionen räumliche Informationen (Wasserstand, Strömung, Bodenrauigkeit etc.) zugewiesen werden. Durch die Wahl eines unstrukturierten (flexiblen) Meshes werden Dreiecks-Elemente mit einer variierenden Auflösung erstellt. So lässt sich eine feinere Auflösung an relevanten küstennahen Gebieten und eine gröbere Auflösung an tiefen, küstenfernen Stellen erstellen, wodurch sich Rechenzeiten wesentlich reduzieren. Zur Mesh-Generierung wurde die Küstenlinie im südwestlichen Bereich des Modells auf einen mittleren Punktabstand von ~250 m diskretisiert, welche die Eckpunkte zur Triangulierung bilden. In Gebieten mit feineren Küstenstrukturen, wie z. B. in der Flensburger

Förde, Schlei, Warnow und Boddengebieten, wurde der Punkteabstand verringert (50–100 m) und ggf. wichtige Stützpunkte individuell gesetzt, um den Küstenverlauf realitätsgetreu zu beschreiben. Abseits der deutschen Küste wurde der Punktabstand entlang der Küstenlinie auf bis zu ~25 km hochgesetzt und Vereinfachungen in der Küstenlinie getroffen. Das genutzte Modell basiert auf ca. 20.000 Elementen bzw. 12.600 Nodes.

Die Wasserstandsauslenkungen werden im Modell maßgeblich durch den atmosphärischen Luftdruck (PMSL, Pressure at Mean Sea Level) und die zugehörigen horizontalen Windkomponenten in 10 m Höhe (u_{10} , v_{10}) generiert. Diese meteorologischen Parameter ermöglichen die zeitliche und räumliche Beschreibung der Luftbewegungen in der unteren Atmosphäre. Für die Simulation zeigten sich die meteorologischen Reanalysen des *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) als geeignet. Der Datensatz „ERA5 - hourly data on single levels from 1940 to present“ (5th Generation European Reanalysis; Hersbach et al. 2022) stellt meteorologische Parameter der Atmosphäre in stündlicher Auflösung auf einzelnen Höhenniveaus bereit. Diese sind auf regelmäßigen Breiten- und Längengittern mit einer Auflösung von $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (~31 km x 31 km) verfügbar. Der Datensatz beginnt am 01.01.1940 und wird nahezu in Echtzeit zur Gegenwart fortgeschrieben. Damit wird ein Kompromiss aus ausreichender räumlicher und zeitlicher Auflösung und Verfügbarkeit erzielt. Die durch den Wind auf das Wasser übertragene Energie wird durch einen linearen Rauhigkeitsansatz nach Smith und Banke (1975) berechnet, der die Rauigkeit ab einer Windgeschwindigkeit von 30 m/s limitiert.

Die verwendeten meteorologischen Parameter werden in Tabelle 1 gelistet.

Tabelle 1: Meteorologische Parameter zum Antrieb des Modells.

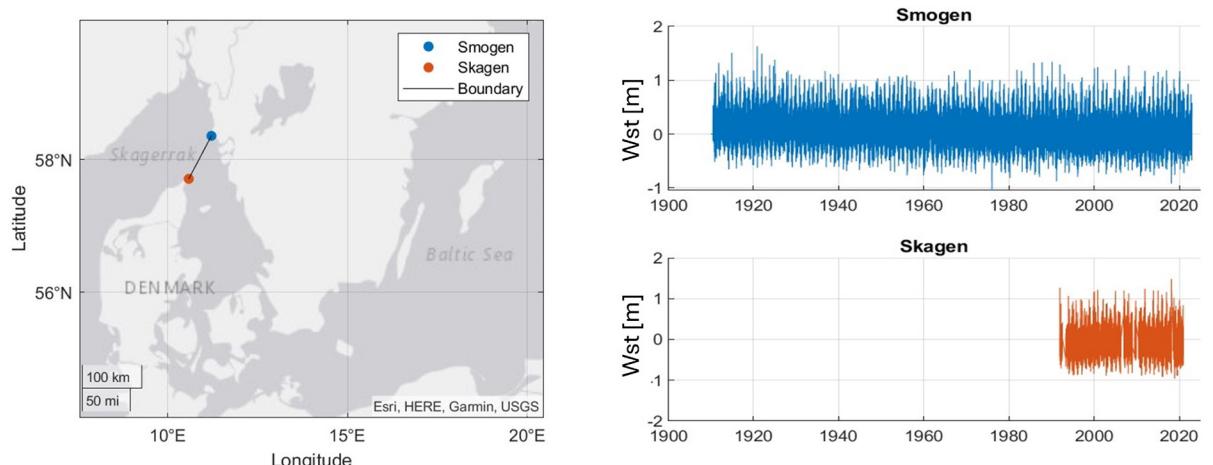
Variable	Produkt	Typ	Δt	$\Delta x / \Delta y$
Wind (10 m)	u_{10}	Reanalysis	1 h	31 km x 31 km
	v_{10}	Reanalysis	1 h	31 km x 31 km
Luftdruck	PMSL	Reanalysis	1 h	31 km x 31 km
Niederschlag	PREC	Ensemble Mean	3 h	31 km x 31 km
Verdunstung	EVA	Ensemble Mean	3 h	31 km x 31 km

Die Nordsee wirkt durch einen Masse- und Energieaustausch auf die Hydrodynamik der Ostsee ein. Um den Einfluss zu beschreiben, wurde als offener Rand die Luftlinie zwischen dem an der dänischen Küste gelegenen Pegel *Skagen* und dem an der gegenüberliegenden schwedischen Küste liegenden Pegel *Smogen* gewählt (vgl. Abbildung 3). Die Wasserstandsinformationen des Pegels *Smogen* wurden aus dem Datensatz *Global Ocean* des Copernicus Marine Service (CMEMS) bezogen. Die Pegeldaten des gegenüberliegenden Pegels *Skagen* sind in dem Datensatz nicht enthalten, weshalb alternativ auf die Zeitreihe aus dem GESLA 3 Datensatz zurückgegriffen wurde, die jedoch nur für den Zeitraum von 1991 bis 2020 verfügbar ist (vgl. Tabelle 2). Aufgrund der unmittelbaren Nähe der Pegel zueinander konnten die Wasserstände für den Pegel *Skagen* über ein lineares Regressionsmodell vervollständigt werden. Als Randbedingung wird zwischen den Wasserstandsinformationen entlang des Modellrandes linear interpoliert. Aus den Wasserständen wird anschließend ein Zu- bzw. Abfluss erzeugt, so dass ein Masseaustausch generiert wird.

Tabelle 2: Pegelinformationen der am Modellrand gelegenen Stationen *Smogen* und *Skagen*.

Quelle		Δt	lat	lon	Verfügbarkeit
Smogen	Global Ocean	1 h	11.217°	58.353°	20.06.1910 - 30.11.2023*
Skagen	GESLA3	~10/15 min	10.585°	57.719°	04.12.1991 - 17.12.2020

*letzter Zugriff

Abbildung 3: Generierung der Randbedingungen über die zwischen dem Kattegat und Skagerrak gelegenen Pegel *Smogen* und *Skagen*.

Außerdem wurden die Abflussdaten der großen Flüsse, die in die Ostsee münden, als zeitlich konstante Werte aus dem Datensatz des *Global Runoff Data Center* (GRDC) ermittelt und integriert. Somit wurde die Wasserhaushaltsgleichung der Ostsee ausreichend berücksichtigt, was für lange Simulationen (> 1 Jahr) essenziell war.

3.2 Kalibrierung und Validierung

Trotz der naturwissenschaftlichen Basis gilt in der Modellierung Parameterkombinationen (subjektiv) zu wählen, die zu Ergebnissen führen, die den Naturbeobachtungen möglichst ähneln. Als Kalibrierungsparameter wird die Bodenrauigkeit zur Beeinflussung der Sohlschubspannung gewählt, die rechnerisch der Strömung entgegenwirkt. Die Bodenrauigkeit wird durch den Mannings Koeffizienten n in Abhängigkeit des Strickler Beiwertes k_{st} durch $n = 1/k_{st}$ abgebildet. Üblicherweise werden k_{st} -Werte zwischen 20 und 40 $m^{1/3}/s$ genutzt, wobei DHI einen Wert von 32 $m^{1/3}/s$ für Küsten- und Ästuarien vorschlägt, sofern keine abweichenden Informationen vorliegen. Durch mehrere Kalibrierungsläufe wurde sich für $k_{st} = 35 m^{1/3}/s$ entschieden, mit denen der Verlauf der Wasserstände abgebildet werden konnte.

Weiter werden die Windgeschwindigkeiten (u_{10} , v_{10}) um 10 % erhöht, um die Ausbildung der Wasserstandsscheitel zu begünstigen (vergleichbare Überlegungen wurden z. B. in Lorenz und Gräwe (2023) geführt).

Um die Genauigkeit der simulierten Wasserstände zu bestimmen, werden die modellierten Wasserstände (W_{mod}) mit Beobachtungsdaten an den gewählten Pegelstationen (W_{obs}) verglichen – sofern diese verfügbar sind. Wie von Krause et al. (2005) vorgeschlagen, wird eine Kombination aus dem mittleren quadratischen Fehler (RMSE) und verschiedenen Einzelkriterien zur Bewertung der Modellleistung verwendet.

Der RMSE stellt ein zentrales Maß zur Bewertung der Modellgüte dar, indem er die mittlere quadratische Abweichung zwischen simulierten und beobachteten Werten misst. Er gibt die durchschnittliche Fehlergröße in den Einheiten der betrachteten Größe an, was ihn physikalisch interpretierbar macht. Ein niedriger RMSE-Wert zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Beobachtung. Besonders im Kontext der Bewertung von Extremereignissen ist der RMSE aufgrund seiner Sensitivität (Quadrierung) gegenüber großen Abweichungen ein geeignetes Maß zur Beurteilung der Modellleistung. Der RMSE bestimmt sich durch:

$$RMSE \ [cm] = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_{obs,i} - W_{mod,i})^2} \quad 1$$

Als Effizienzkriterium wird der von Willmott (1981) beschriebene Index der Übereinstimmung (d) gewählt, der das Verhältnis zwischen dem mittleren quadratischen Fehler und dem potenziellen Fehler angibt, wobei $0 \geq d \geq 1$ und $d = 1$ eine perfekte Übereinstimmung und $d = 0$ keine Übereinstimmung bedeutet:

$$d \ [-] = \frac{1 - \sum_{i=1}^n (W_{obs,i} - W_{mod,i})^2}{\sum_{i=1}^n (|W_{mod,i} - \bar{W}_{obs}| + |W_{obs,i} - \bar{W}_{obs}|)^2} \quad 2$$

Um die Genauigkeit der simulierten Extremwerte abschließend gezielt zu bewerten, wird zusätzlich die Nachbildung des maximalen beobachteten Wasserstands zur Simulation berechnet (Peak to Peak (P2P)). Diese Kennzahl erlaubt eine direkte Einschätzung der Modellgüte im Hinblick auf die Reproduktion des beobachteten Maximums und wird wie folgt berechnet:

$$P2P \ [%] = \left(\frac{\max(W_{mod})}{\max(W_{obs})} \right) \cdot 100 \quad 3$$

Mit dem Ziel der möglichst akkurate Beschreibung von extremen Hochwasserereignissen, wurden zur Kalibrierung der Simulationen die höchsten Ereignisse an der deutschen Ostseeküste gewählt, die in der jüngeren Vergangenheit aufgetreten sind. Diese traten im Januar 1954, November 1995, Februar 2002, November 2006, Januar 2017 und Januar 2019 auf. Simuliert wird dazu - wie später angestrebt - das vollständige Kalenderjahr inkl. der „Einschwingphase“. Zur Ermittlung der Statistiken der Kalibrierungsparameter wird der Zeitraum 1.5 Tage vor und 3.5 Tage nach dem Eintreten des Scheitels des Sturmhochwassers betrachtet. Die Statistiken der kalibrierten Simulationen werden in Abbildung 4 dargestellt.

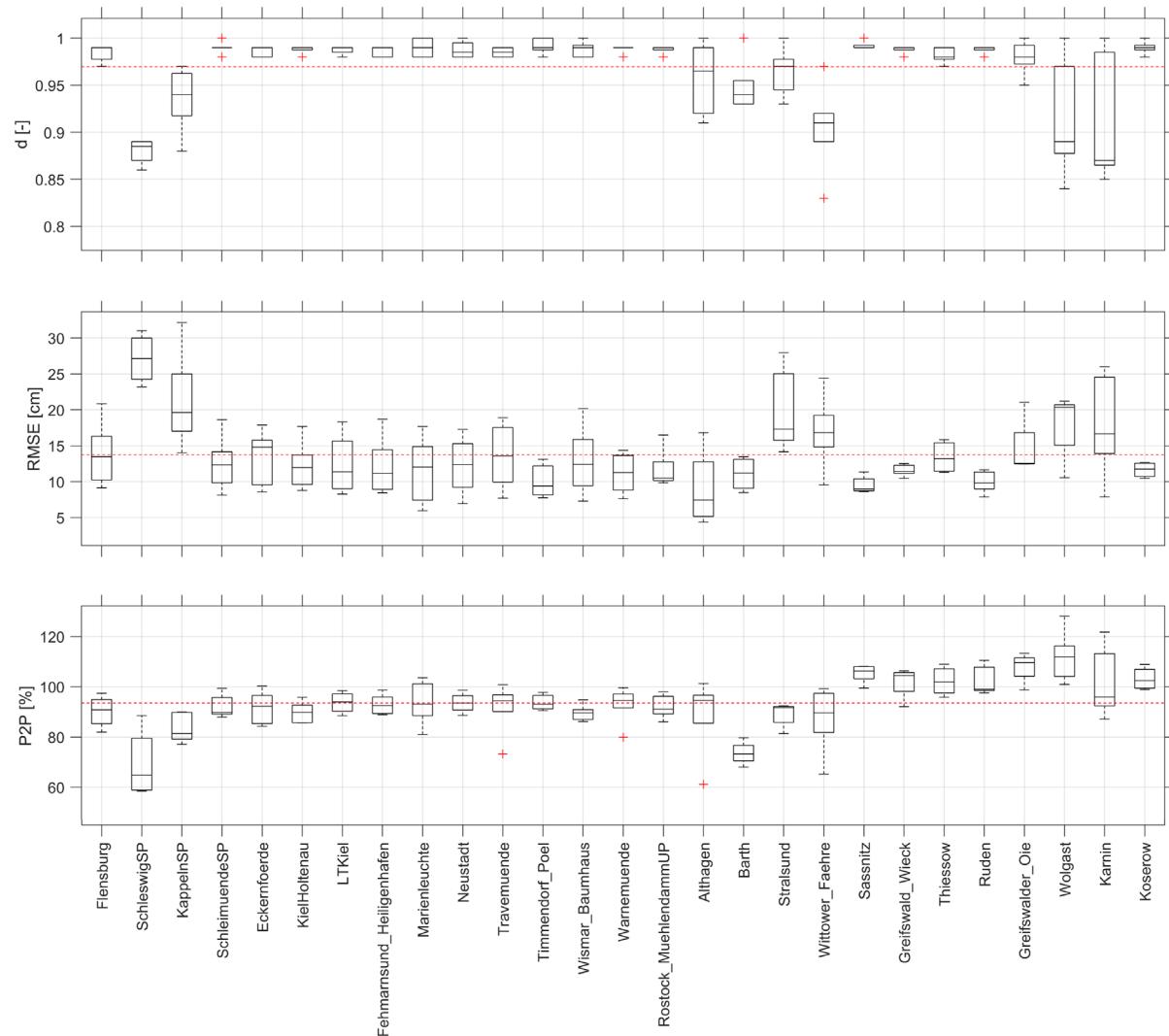


Abbildung 4: Statistiken für die Parameter des kalibrierten Modells anhand der höchsten Sturmhochwasserereignisse für Pegel entlang der südwestlichen Ostseeküste

Mit Gütekriterien von $\bar{d}=0,97$, $\overline{\text{RMSE}}=13,75$ cm und $\overline{\text{P2P}}= 93,5$ % zeigt das Modell im Mittel eine hohe Güte und somit realitätsnahe Nachbildung von Sturmhochwassern an der deutschen Ostseeküste auf.

Als wichtiges Kriterium von Sturmhochwassern wird der Fokus auf die Genauigkeit der nachgebildeten Hochwasserscheitel gelegt. Der P2P Wert zeigt einen räumlichen Anstieg von West nach Ost auf, also von einer tendenziellen Unterschätzung der Modellergebnisse hin zu einer Überschätzung. Mit einem Großteil der Werte im Bereich von $100\% \pm 20\%$ liegt der überwiegende Teil der simulierten Spitzenwasserstände innerhalb eines akzeptablen Abweichungskorridors.

Gestützt werden die Ergebnisse durch RMSE-Werte im Bereich von 5 bis 30 cm sowie dem Index der Übereinstimmung (d) zwischen 0,8 und 1,0, wobei der Großteil der Fälle in den oberen Gütebereich fällt.

An der Innenküste weisen die Ergebnisse generell eine höhere Ungenauigkeit auf, was im Wesentlichen durch die komplexe Bathymetrie, bzw. vernachlässigte Auflösung (da geringere Relevanz im Projekt), veralteter Bathymetrie und damit vernachlässigten morphodynamischen Veränderungen sowie fehlenden Überflutungsflächen zu erklären ist. Für

lokale Analysen dieser Gebiete wird daher empfohlen feinere Modelle, ggf. mit Überflutungsflächen auf Basis von aktualisierten Bathymetrien bzw. Topographien zu nutzen.

Mit wenigen Ausnahmen werden die Sturmhochwasser damit innerhalb einer tolerierten (Un-) Genauigkeit nachgebildet und die Eignung des Modells zur Nachbildung von Sturmhochwassern unter hohen Qualitätskriterien somit bestätigt.

4 Rekonstruktion des Oktoberhochwassers 2023

Mit den in der Kalibrierung ermittelten Einstellungen und getroffenen Annahmen wurde das Oktoberhochwasser 2023 rekonstruiert. Zur Simulation wurde der Zeitraum vom 01.09. bis 01.11.2023 gewählt. Somit konnte sichergestellt werden, dass die Anfangsbedingungen des Sturmhochwassers, wie ein veränderter Füllungsgrad und Schwingungsverhalten der Ostsee sich im Modell einstellen. Als Ausgangswasserstand wurde ein Mittlerer Wasserstand von 9 cm ü. NHN gewählt, der durch den Vergleich verschiedener Pegel für die deutsche Küste im Jahr 2023 repräsentativ erscheint. Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse vorgestellt, validiert und analysiert.

4.1 Maximale Wasserstände

Scheitelwerte stellen wohl das markanteste Merkmal eines Hochwasserereignisses dar und haben daher einen bemessungsrelevanten Charakter von Küstenschutzanlagen. Die Ergebnisse der Simulation werden über die gesamte Ostsee ausgeschrieben, jedoch nur für die kalibrierte und validierte deutschen Küste folgend ausgewertet. Die Darstellungen der simulierten und gemessenen zeitlichen Verläufe der Wasserstände im Zeitraum vom 18. bis 23.10.2023 werden beispielhaft für repräsentative Pegelstandorte in Abbildung 5 gegenübergestellt.

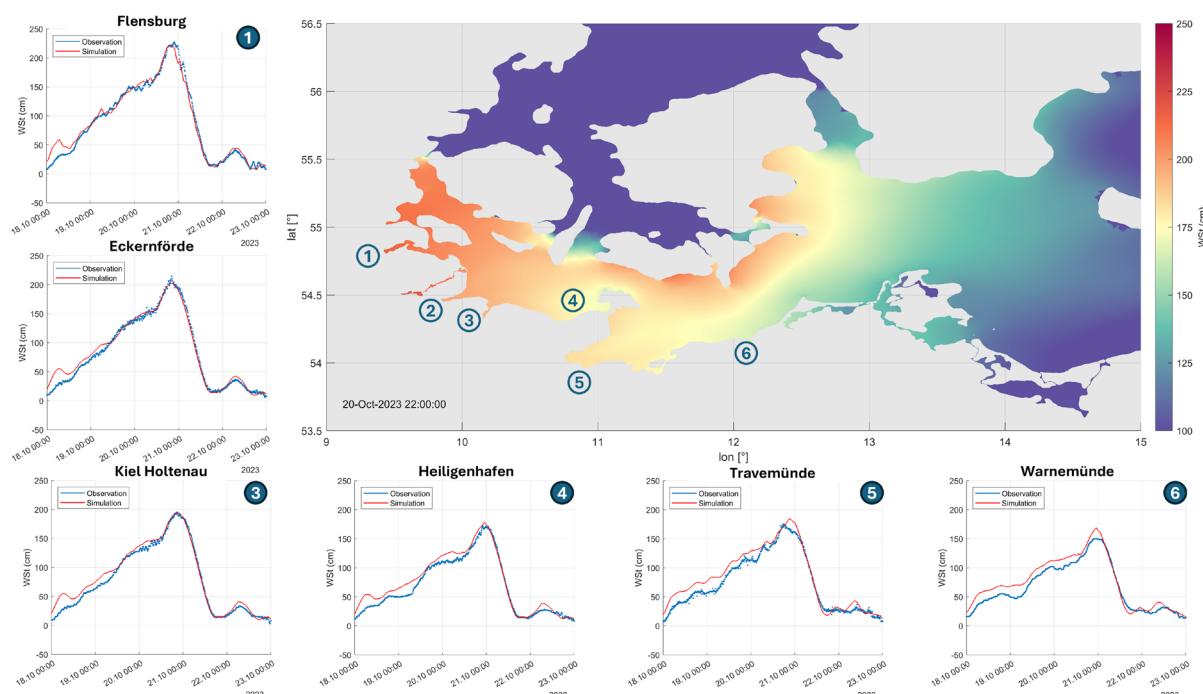


Abbildung 5: Gegenüberstellung der zeitlichen Verläufe der gemessenen und simulierten Wasserstände der südwestlichen Ostsee.

Die simulierten und gemessenen Wasserstandsverläufe zeigen eine hohe Übereinstimmung mit Abweichungen von wenigen Zentimetern. Besonders im Bereich der hier fokussierten schleswig-holsteinischen Küste weisen die Scheitelwerte nur geringe Abweichungen von wenigen Zentimetern auf. Da die Wasserstände an den Pegelstandorten einen geringen Fehler aufweisen, ist anzunehmen, dass dieser an nicht überwachten Standorten ebenfalls gering ausfällt. Durch die fehlenden tiefliegenden Überflutungsflächen, besonders im Bereich von Flussmündungen, Salzwiesen, Küstenmooren und den Boddengebieten, ist durch die fehlende Retention tendenziell mit einer Überschätzung der Wasserstände zu rechnen.

Die Simulationsergebnisse weisen im Abschnitt der Flensburger Förde bis zur Eckernförder Bucht einschließlich der Schlei Wasserstände von > 200 cm auf und lassen sich somit in die Kategorie des „sehr schweren Sturmhochwassers“ einordnen. In der Kieler Bucht, im Bereich Fehmarn und der Lübecker Bucht einschließlich der Untertrave und der Wismarbucht lassen sich Wasserstände zwischen 150 und 200 cm nachweisen und somit in die Kategorie des „schweren Sturmhochwasser“ einordnen. In den weiter östlich liegenden Bereichen wurden Scheitelwasserstände erreicht, die in die Kategorie des „mittleren Sturmhochwassers“ fallen.

Aufgrund der ausgefallenen Pegel und der besonderen Schadenslage soll der Schlei weitere Betrachtung geschenkt werden. In Abbildung 6 werden die simulierten Wasserstände innerhalb der Schlei dar- und den verfügbaren, örtlichen Messungen gegenübergestellt. Den Ergebnissen wird angemerkt, dass die echt eingetretenen Wasserstände durch die Deichbrüche, Überflutungen und Überschwemmungen/Durchbrüche des Nehrungshakens der Lotseninsel ggf. lokal gedämpft oder verstärkt wurden, so dass die Simulation keine Rekonstruktion des Geschehenen darstellt. Für Bemessungsaufgaben gilt es, Wasserstände als Grundlage anzusetzen, die gleiche Eintrittsvoraussetzungen aufweisen (Homogenität bzw. Stationarität). Durch Deichbrüche und infolgedessen Überflutungen von Niederungen (Retention), weisen Messwerte andere Eintrittsbedingungen auf, so dass die Bedingung der Homogenität als verletzt gilt. Infolgedessen sollten simulierte Daten für die statischen Analysen herangezogen werden, denen Homogenität durch das Vernachlässigen der Deichbrüche unterstellt werden kann.

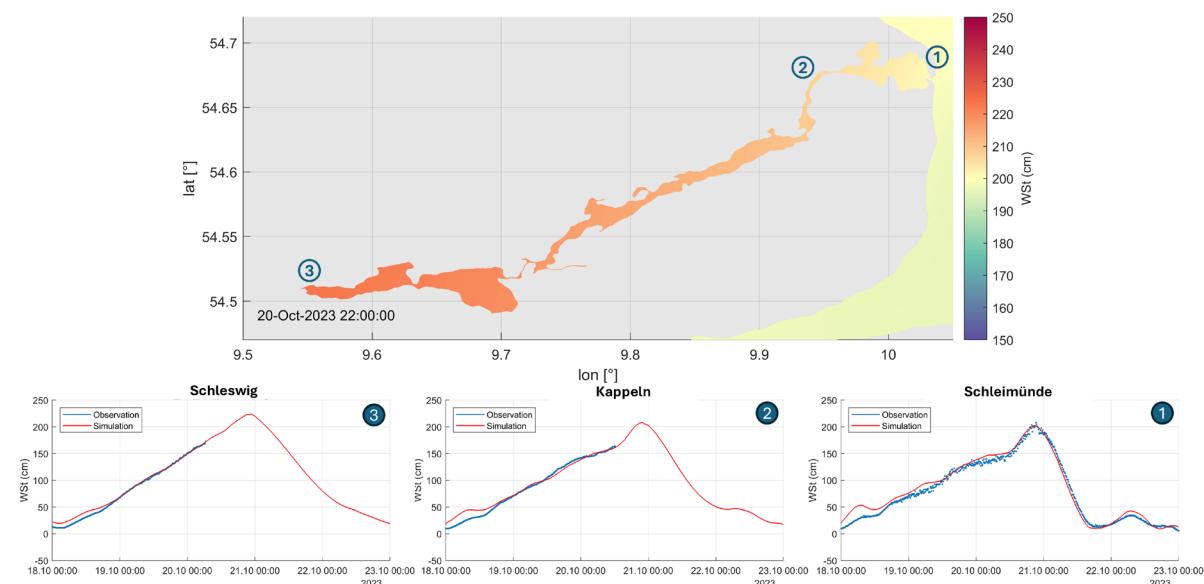


Abbildung 6: Wasserstände des Oktoberhochwassers 2023 in der Schlei.

Weiter anzumerken ist, dass die InSitu-Messdaten aus dem *Global Ocean* Datensatz Rohdaten darstellen und somit nicht qualitätsgeprüft sind, d. h. eine Streuung aufweisen und von offiziellen, geprüften Werten abweichen können.

Der beobachtete maximale Wasserstand während des Ereignisses beträgt in Schleimünde 208 cm ü. NHN. Die simulierten Wasserstände in Schleimünde betragen 202 cm ü. NHN und reichen damit auf wenige Zentimeter an den Messwert heran. Sie stellen somit eine gute Ausgangslage für die Simulation im weiteren Verlauf der Schlei dar. Die simulierten Wasserstände steigen im Verlauf der flussartigen Schlei von Kappeln mit 207 cm ü. NHN bis Schleswig auf 223 cm ü. NHN weiter an.

In der Kalibrierung und Validierung zeigten sich im Vorfeld jedoch bereits Unsicherheiten in der Schlei (vgl. Abschnitt 3.2). Die simulierten Werte für Schleswig kommen dennoch nahe an den vorläufigen WSV-Ersatzwert von 2,29 m ü. NHN heran bzw. den Wert der Modellstudie ECAS BALTIC (Knies/ Winter) mit 2,38 m NHN (Hofstede 2023).

4.2 Füllungsgrad der Ostsee

Als ozeanographische Größe spielt sowohl der über einen Zeitraum von mehreren Jahren gemittelte Mittlerer Wasserstand (MW), als auch der über einen kürzeren Zeitraum (Tage) gemittelte Wasserstand – genannt Füllungsgrad – eine wichtige Rolle. Infolge von kurzzeitigen Änderungen der Wasserhaushaltkomponenten, insbesondere durch Variationen des Ein- und Ausstromes durch Belte und Sunde, kann der Füllungsgrad der interkontinentalen Ostsee vom langjährigen Mittel bedeutend abweichen. Dabei sind Abweichungen von 50 bis 60 cm sowohl nach oben, infolge intensiver Einstromphasen, als auch nach unten, infolge intensiven Ausstroms, möglich (Hupfer et al. 2003). Hohe Füllungsgrade können die Entwicklung von Sturmfluten maßgeblich verstärken. Zur Ermittlung des Füllungsgrades werden für gewöhnlich die Wasserstandsinformationen des schwedischen Pegels *Landsort* genutzt, da dieser im Schwingungsknoten der Ostsee liegt und somit keine oder nur geringe Schwingungerscheinungen aufweist.

Die ermittelten Modelldaten bilden die weitere Möglichkeit die Wasserstände flächig zu mitteln und somit eine Abweichung zum Mittelwasserstand berechnen zu können. Zur Ermittlung des Füllungsgrades werden die Simulationsergebnisse über einen gleitenden Zeitraum von 7 Tagen gemittelt.

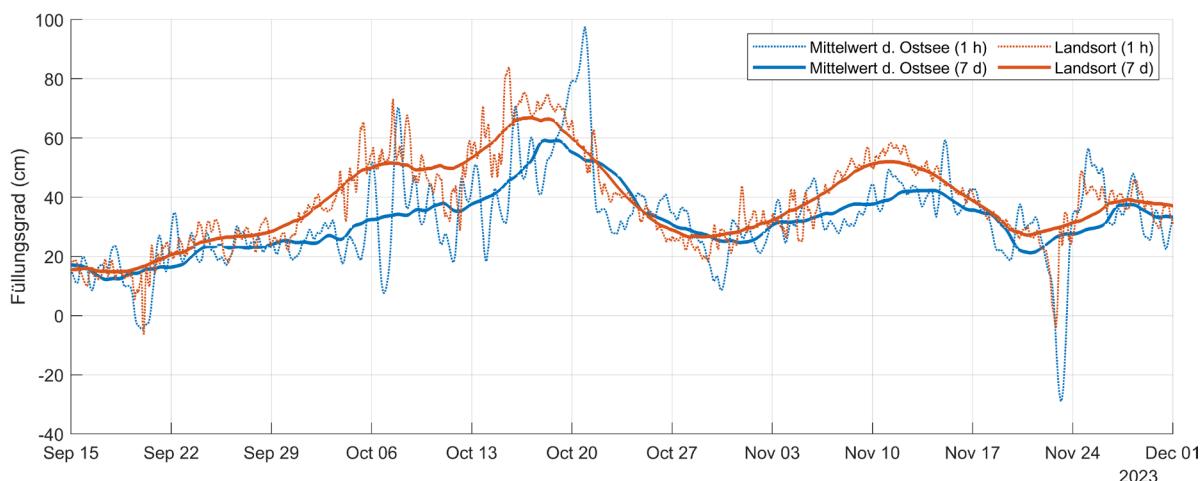


Abbildung 7: Ermittlung des Füllungsgrades der Ostsee: Vergleich zwischen dem im Schwingungsknoten liegenden Pegel *Landsort* (orange) und der gemittelten Wasserstände über die Ostsee (blau).

In Abbildung 7 werden die Graphen des Mittelwerts der gesamten Wasserstände der Ostsee dem simulierten Wasserstandsverlauf am Pegel *Landsort* gegenübergestellt.

Die Verläufe der Graphen zeigen optisch eine starke Abhängigkeit zueinander, weisen jedoch zeitliche und höhenbezogene Versätze auf, die sich insbesondere in den Spitzen verdeutlichen. Beide Ansätze zur Ermittlung des Füllungsgrades bilden einen Anstieg des Füllungsgrades auf ca. 30 bis 40 cm von Anfang September bis Anfang Oktober ab. Anfang Oktober zeigt sich eine starke Turbulenz der Verläufe auf stündlicher Basis, die mit einem ersten leichten Sturmhochwasser an der südwestlichen Ostsee im Vorfeld des hier betrachteten Ereignisses einherging. Verbunden mit den Westwinden im Vorfeld des Sturmhochwassers, die den Einstrom der Wassermassen aus der Nordsee begünstigten, steigt der Füllungsgrad weiter auf ein Niveau von ca. 60 bis 70 cm.

Mit dem Umschwung des Winds auf Ostwind ab dem 18.10. werden die Wassermassen in die südwestliche Ostsee gedrückt, so dass ein Ausstrom aus der Nordsee initiiert wird und der Füllungsgrad zu fallen beginnt. Zum Zeitpunkt der Sturmflut am 20./21.10. liegt der Füllungsgrad noch bei +55 bis 60 cm. Der stark erhöhte Füllstand im Vorfeld des Sturmhochwassers wirkt sich dementsprechend begünstigend auf die Entwicklung der Wasserstände während des Ereignisses aus. Nach dem Sturmhochwasser fällt der Füllungsgrad weiter ab und erreicht Anfang November wieder einen üblichen Wasserstand.

Anzumerken ist den Ergebnissen, dass der Füllungsgrad als Ergebnis von ein- bzw. ausströmenden Wassermassen nicht kalibriert ist und somit eine Unsicherheit aufweist.

4.3 Analyse der Eigenschwingung

Durch den Aufbau der Ostsee und die Gliederung in unterschiedliche Becken, entstehen interne hydrodynamische Schwingungssysteme, die „Badewanneneffekt“ genannt werden. Diese entstehen, wenn anhaltende Winde Wassermassen in einem Becken aufstauen und im richtigen Moment aussetzen bzw. sich drehen und somit ein Rückschwingen resonant verstärken (Huber 2000). Die Schwingungen können von unterschiedlicher Ordnung sein. Die Abmessungen der Ostsee und die vorherrschenden Winde lassen hauptsächlich die Bildungen einknotiger Schwingungen zu, d. h. es befinden sich an den äußeren Enden des Ostseebeckens die sog. Schwingungsbäuche und in der Mitte der Schwingungsknoten. Im Schwingungsknoten ist keine Erhöhung des Wasserstandes zu vernehmen, während an den Enden des Schwingungssystems die Schwingung ihr Maximum annimmt (Rheinheimer 1996). Für die Ostsee sind hauptsächlich die Schwingungssysteme „Ostsee ohne Bottnischen Meerbusen“ und „Gesamte Ostsee“ von Bedeutung (Huber 2000).

Die Genese von Sturmhochwasserereignissen und die Mitwirkungen von Schwingungen ist von Fall zu Fall unterschiedlich und individuell zu untersuchen. Grundsätzlich lässt sich daher von *reinen Windstauereignissen* und *Sturmhochwasserereignissen unter Beteiligung von hydrodynamischen Schwingungen* unterscheiden (Hupfer et. al 2003). Schwingungsmitwirkungen deuten sich durch ein Absinken des Wasserstandes wenige Stunden vor dem Ereignisbeginn an (vgl. Meinke 1999). Schwingungerscheinungen im Bereich der südwestlichen, deutschen Ostseeküste prägen sich als Schwingungsbäuch deutlich aus, so dass die Möglichkeit besteht, dass allein durch das Rückschwingen der Wassermassen Wasserstände erreicht werden, die Sturmhochwasser-Grenzwerte ($\leq 1,00$ m) ohne das Mitwirken von Wind erreichen. Zur Untersuchung der Genese des Ereignisses werden in Abbildung 8 die Wasserstandsverläufe am Pegel Flensburg am erwarteten Schwingungsbäuch den

Wasserständen der gesamten Ostsee zu verschiedenen Zeitpunkten zeitlich zugeordnet. Als Referenz werden weiter die beobachteten und simulierten Ganglinien gegenübergestellt.

Vorab ist zu anzumerken, dass die gemessenen und simulierten Wasserstandsverläufe am Pegel Flensburg im Vorfeld des Sturmhochwassers geringe Differenzen aufweisen, die während des Sturmhochwassers jedoch weitestgehend zu vernachlässigen sind und somit eine hohe Übereinstimmung aufweisen. Beide Wasserstandsverläufe (simuliert und beobachtet) lassen im Vorfeld des Ereignisses kein deutliches Absinken der Wasserstände unter MW erkennen, so dass ein klassisches resonantes Schwingen der Ostsee in dem Fall durch die Analyse eines Pegels nicht nachgewiesen werden kann.

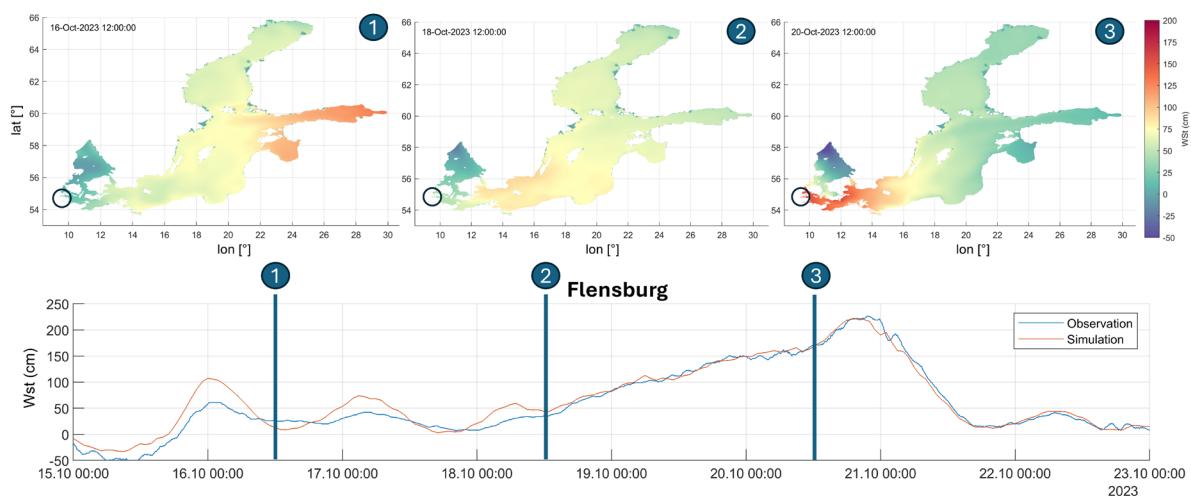


Abbildung 8: Wasserstandsentwicklungen (gemessen und simuliert) am Pegel Flensburg vom 15.10. bis zum 23.10.2023.

Die Darstellung der Wasserstände der gesamten Ostsee zeigt, dass bereits 5 Tage vor dem Sturmhochwasser, beginnend am 16.10. (1), ein Aufstau der Wassermassen auf > 100 cm im Bereich der östlichen Ostsee zu vermerken ist. Diese aufgestauten Wassermassen werden bis zum Erreichen des Peaks am 20./21.10. in den Bereich der südwestlichen Ostsee umverteilt. Dies zeigt sich am Pegel Flensburg ebenso durch ein kontinuierliches Ansteigen der Wasserstände, das sich seit dem 18.10. (2) registrieren lässt. Da die Wasserstände langsam und konstant ansteigen, ist anzunehmen, dass die Fließbewegung maßgebend windgestaut auftritt. Dementsprechend prägten sich die im Vorfeld im östlichen Bereich aufgestauten Wassermassen nicht als Eigenschwingung aus, wirkten sich jedoch durch ein Rückfließen maßgebend auf die Wasserstände an der deutschen Küste aus.

4.4 Verweilzeiten

Obwohl die Sturmhochwasserereignisse der Ostsee durch die fehlende astronomische Komponente im Vergleich zur Nordsee i. d. R. geringere Maximalhöhen erreichen, ist die Dauer eines Ereignisses nicht durch den Tiderhythmus begrenzt, so dass bei lang andauernden Starkwinden deutlich erhöhte Wasserstände auch ohne ausgeprägten Spitzenwasserstand, jedoch mit langen Verweildauern von mehreren Tagen auftreten können. Hierdurch ergeben sich auch bei (leicht) erhöhten Wasserständen hohe Energieeinträge auf die Küste und auf Küsten- und Hochwasserschutzbauwerke. Gefährdet sind insbesondere Hochwasserschutzdünen und Steilküsten, die bereits bei Wasserständen, die den Fuß der

Düne bzw. des Kliffs erreichen, erosiv abgetragen werden. So können in wenigen Tagen Küstenrückgänge von mehreren Metern erfolgen (Niedermeyer et al. 2011).

Weiter hat die Verweilzeit und zeitliche Entwicklung der Sturmflut einen wesentlichen Einfluss auf die Ausprägung von Überflutungen von Niederungen im Küstenbereich (Kupfer et al. 2024). Höffken et al. (2020) zeigt durch ein Überflutungsmodell für Eckernförde, dass die Überflutungsflächen bei einem 200 jährlichen Ereignis bei aktuellem MSL abhängig von der Dauer des Ereignisses um ca. 10 % variieren können und sich dies bei steigendem MSL weiter verstärken kann.

In Abbildung 9 werden die Verweilzeiten der Oktobersturmflut für verschiedene Grenzwerte dargestellt.

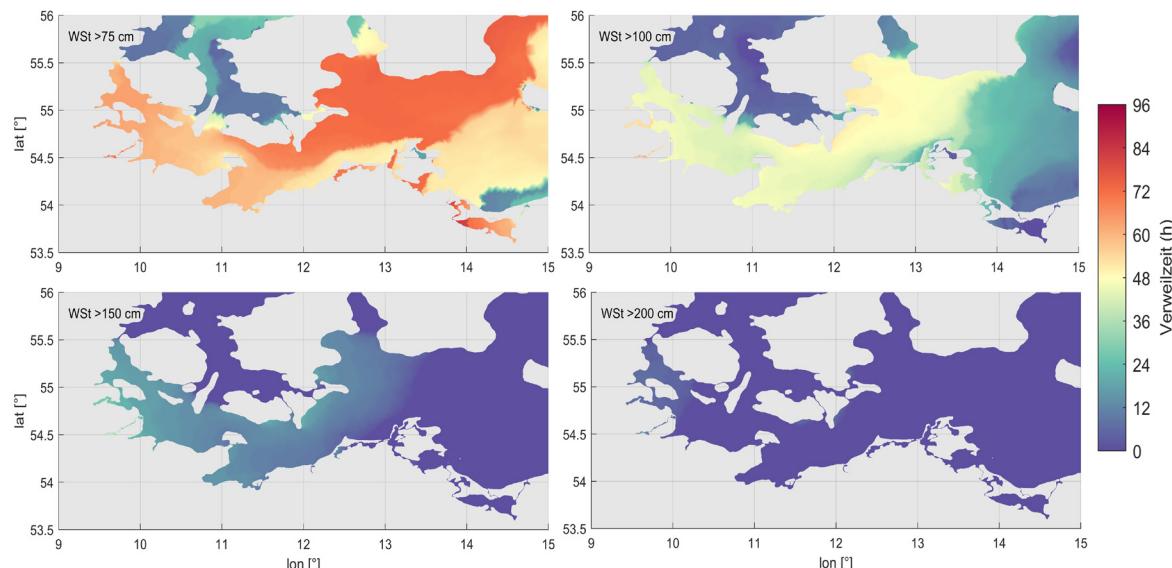


Abbildung 9: Verweilzeiten für die Überschreitung der Wasserstände von 75 cm; 100 cm, 150 cm und 200 cm.

Neben vielerorts besonders hohen Wasserständen verursachte der langanhaltende Oststurm erhöhte Wasserstände mit langen Verweildauern. Im Bereich der Kieler und Eckernförder Bucht verweilten die Wasserstände bis zu 47 h über 100 cm und 18 bis 25 h über einem Wasserstand von 150 cm. In Flensburg verweilten die Wasserstände 53 h über der Marke von 100 cm, 28 h über 150 cm und 9 h über 200 cm. Die längsten Verweilzeiten zeigen sich in der Schlei in Schleswig mit 61 h über einem Wasserstand von 100 cm, 37 h über 150 cm und 15 h über 200 cm.

Als ebenfalls betroffen zeigen sich die Boddengebiete in denen Wasserstände von > 75 cm mehr als 90 h verweilten.

5 OpenSource-Veröffentlichung

Die Ergebnisse der Simulationen werden im Sinne der guten wissenschaftlichen Praxis offen und transparent auf der Plattform PANGAEA veröffentlicht. PANGAEA ist ein vollständig kuratiertes Datenarchiv, das wissenschaftliche Daten langfristig entsprechend den FAIR-Prinzipien (auffindbar, zugänglich, interoperabel und wiederverwendbar) speichert. Durch die Veröffentlichung auf PANGAEA können die Daten eingesehen, nicht-

kommerziell genutzt und nachvollzogen bzw. weitergeführt werden. Dies soll die Transparenz und den offenen Austausch von wissenschaftlichen Informationen weiter fördern.

Die Daten werden in Beckmann und Arns (2025) selbstbeschreibend im Network Common Data Form (NetCDF-4) bereitgestellt.

6 Fazit

Das Oktoberhochwasser 2023 zeigte deutlich, dass trotz der Fortschritte im Küstenschutz weiterhin erhebliche Risiken bestehen, insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels und des steigenden Meeresspiegels. Das Ereignis unterstreicht die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Überprüfung und Anpassung der Küstenschutzmaßnahmen als Dauer- aufgabe, um den komplexen Herausforderungen gerecht zu werden.

Die hydrodynamische Modellierung hat sich als effektives Werkzeug erwiesen, um das vergangene Sturmhochwasserereignis zu rekonstruieren und zu analysieren. Für kleinräumige Analysen, besonders an Gebieten der Innenküste, wird empfohlen genestete, feinere Modelle, ggf. unter Berücksichtigung von Überflutungsflächen, zu nutzen, wozu die bereitgestellten Modellergebnisse als Input genutzt werden können. Durch die öffentliche Bereitstellung der Modellierungsdaten und deren Analyse wird ein wertvoller Beitrag zum Verständnis von Sturmhochwassern und zur praktischen Anwendung im Küstenschutz geleistet, um mögliche, zukünftige Sturmhochwasserereignisse bewerten zu können.

Auch wenn sich der Küstenschutz und das Warnsystem für solche Ereignisse in den letzten Jahrzehnten stark verbessert hat, gab es beim Sturmhochwasser im Oktober 2023 zahlreiche und hohe Schäden. Nach aktuellem Kenntnisstand können den Wasserständen unter Einbeziehung von historischen Sturmfluten ein Wiederkehrintervall von ca. 70 Jahren (Flensburg) zugeordnet werden (Beckmann et al. 2024). Weitere Schätzungen variieren zwischen Wiederkehrintervallen von 100 Jahren in Flensburg bzw. 250 Jahren im naheliegenden Schleswig (Hofstede 2023). Somit stellt das Sturmhochwasser ein außerordentliches Ereignis dar, das den Küstenschutz neu bewerten lässt.

Da zukünftige mögliche Auswirkungen des Klimawandels und des Meeresspiegelanstiegs berücksichtigt werden müssen, ist davon auszugehen, dass sich eine Erhöhung des Meeresspiegels auch auf die westliche Ostsee auswirken wird. Unabhängig von möglichen Variationen im Windklima muss dadurch mit einem erhöhten Ausgangsniveau für Sturmhochwasser gerechnet werden. Dass die Küsten der südwestlichen Ostsee wie beim letzten Mal etwa 100 Jahre Zeit haben bis sich ein ähnliches Ereignis ausbildet, ist daher unwahrscheinlich.

7 Referenzen

7.1 Datenverzeichnis

Beckmann, S.; Arns, A.: Results of the hydrodynamic reconstruction of the storm surge of October 20/21 2023, in the Baltic Sea [dataset]. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.974303>, 2025.

ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) - ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present (ERA 5)

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>, zuletzt geprüft am: 01.04.2024.

GeoSeaPortal-BSH: Digitale Topographie der deutschen Ostsee <https://www.geoseaportal.de/mapapps/?lang=de>, zuletzt geprüft am: 01.04.2024.

GESLA3 (Global Extreme Sea Level Analysis): high-quality sea-level measurements: <https://gesla787883612.wordpress.com/>, zuletzt geprüft am: 01.04.2024.

Global Ocean des Copernicus Marine Service (CMEMS): <https://marineinsitu.eu>, zuletzt geprüft am: 01.04.2024.

HELCOM (Helsinki Comission) Map and data service: Digitale Küstenlinie: <https://maps.helcom.fi/website/mapservice/?datasetID=e1ee256a-03a1-4619-b1e6-ec058f59459e>, zuletzt geprüft am: 01.04.2024.

IOW (Leibniz-Insitut für Ostseeforschung Warnemünde): Digitale Topographie der Ostsee <https://www.io-warnemuende.de/topografie-der-ostsee.html>, zuletzt geprüft am: 01.04.2024.

7.2 Literaturverzeichnis

Beckmann, S.; Jensen, J.; Arns, A.; Niehüser, S.: Integration von erweiterten Informationen in die statistische Analyse am Beispiel von Flensburg, Einordnung des Wiederkehrintervalls des Sturmhochwassers vom 20./21. Oktober 2023. In: Die Küste, 94, <https://doi.org/10.18171/1.094111>, 2024.

BSH: Hydrologischer Monatsbericht Oktober 2023 für die Schleswig-Holsteinische und Mecklenburg-Vorpommersche Ostseeküste, 2023.

DWD: Das Ostseesturmhochwasser im Oktober 2023. Ein hundertjähriges Ereignis. https://www.dwd.de/DE/leistungen/jahresberichte_dwd/jahresberichte/2023_07_wv_ostseesturm.html, zuletzt geprüft am: 12.08.2024, 2023.

Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P.; Hirahara, S.; Horányi, A.; Muñoz S. J.; Nicolas, J.; Peubey, C.; Radu, R.; Schepers, D.; Simmons, A.; Soci, C.; Abdalla, S.; Abellán, X.; Balsamo, G.; Bechtold, P.; Biavati, G.; Bidlot, J.; Bonavita, M.; Thépaut, J.-N.: The ERA5 global reanalysis. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>, 2020.

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

Höffken, J.; Vafeidis, A. T.; MacPherson, L. R.; Dangendorf, S.: Effects of the temporal variability of storm surges on coastal flooding. In: Frontiers in Marine Science 7, 98, <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00098>, 2020.

Huber, K.: Hochwasserstände an Nord- und Ostseeküsten. In: Zimmermann, C.: Risikomanagement im Küstenraum, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küstingenieurwesen, 15–26, 2000.

Hupfer, P.; Harff, J.; Sterr, H.; Stigge, H.-J.: Die Wasserstände an der Ostseeküste. Entwicklung-Sturmfluten-Klimawandel. In: *Die Küste*, 66 (Ostsee), 1–331, 2003.

Jensen, J.; Habib, M.; 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. In: *Die Küste*, 92, 5–39, <https://doi.org/10.18171/1.092102>, 2022.

Kiesel, J.; Lorenz, M.; König, M.; Gräwe, U.; Vafeidis, A.T.: Regional assessment of extreme sea levels and associated coastal flooding along the German Baltic Sea coast. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23, 2961–2985, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-2961-2023>, 2023.

Krause, P.; Boyle, D. P.; Bäse, F.: Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. In: *Adv. Geosci.*, 5, 89–97, <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>, 2005.

Kupfer, S.; MacPherson, L. R.; Hinkel, J.; Arns, A.; Vafeidis, A. T.: A comprehensive probabilistic flood assessment accounting for hydrograph variability of ESL events. In: *Journal of Geophysical Research, Oceans* 129(1), 1–19, <https://doi.org/10.1029/2023JC019886>, 2024.

Lorenz, M.; Gräwe, U.: Uncertainties and discrepancies in the representation of recent storm surges in a non-tidal semi-enclosed basin: a hindcast ensemble for the Baltic Sea. In: *Ocean Sci.*, 19, 1753–1771, <https://doi.org/10.5194/os-19-1753-2023>, 2023.

Meinke: Sturmfluten in der südwestlichen Ostsee-dargestellt am Beispiel des Pegels Warnemünde, *Marburger Geographische Schriften* 134, 1–23, 1999.

Niedermeyer, R.-O.; Lampe, R.; Janke, W.; Schwarzer, K.; Duphorn, K.; Kliewe, H.; Werner, F.: Die deutsche Ostseeküste, 2. Auflage (Bde. Sammlung geologischer Führer, Band 105), 2011.

Rheinheimer, G.: Meereskunde der Ostsee. Springer Verlag, 1996.

Rosenhagen, G.; Bork, I.: Rekonstruktion der Sturmwetterlage vom 13. November 1872. In: *Die Küste*, 75, 51–70, <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101628>, 2009.

Seifert, T.; Tauber, F.; Kayser, B.: A high-resolution spherical grid topography of the Baltic Sea - 2nd edition. Baltic Sea Science Congress, Stockholm 25-29; Poster #147. Von www.io-warnemuende.de/iowtopo abgerufen, 2001.

Smith, S. D.; Banke, E. G.: Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. In: *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 101, 665–673, <https://doi.org/10.1002/qj.49710142920>, 1975.

Willmott, C. J.: On the Validation of Models. In: *Physical Geography*, 2(2), 184–194, <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>, 1981.

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 Jenser², Arne Arns³ und Sebastian Niehüser⁴

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

² Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)

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 Wasserstandsinformationen 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. Sturmmeinwirkungen. 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 be-messungsrelevanten 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 Pegeldaten 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 Schreibrögen, 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. Sturmwasserstände 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 Extremwasserstände ist es weiterhin zwingend erforderlich, die Extremwasserstände 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 Wasserstandsinformationen 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 extremwertstatischen 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, Fördern 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, Schwingungsstau, 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 anhalten 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 Ablesung 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 Pegelnulppunkte 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. vertrauenswürdigere 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 Meeresspielanstieg 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 gezeitengrempärgten 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 Mittelwertsbildung 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 Schiffahrtsamt 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.

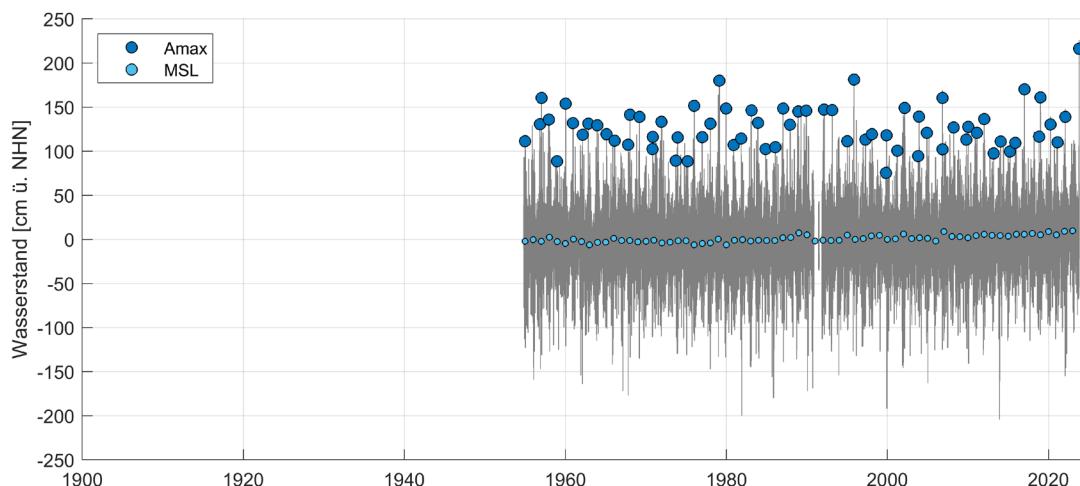


Abbildung 2: Verfügbarkeit und Verteilung der digitalen Wasserstandsinformationen des Pegels Flensburg, inkl. der jährlich höchsten Wasserstände (Amax) und mittleren Wasserstände (MSL) über den Zeitraum der hydrologischen Jahre 1955 bis 2023.

Das Ereignis vom Oktober 2023 stellt mit 226 cm ü. NHN das höchste Ereignis der digitalen Datenreihe dar. Unter Berücksichtigung des mittleren Wasserstandes ($MW_{2023} \approx 10 \text{ cm NHN}$) 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 Normalhöhennull 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 Witterungereignisse von den ältesten Zeiten bis zum Jahre 1800* durch Henning (1904) genannt werden. Ab 1876 wurden von der Deutschen Seewarte (heute Bundesamt für Seeschiffahrt 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 Vergleichspiegel 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.

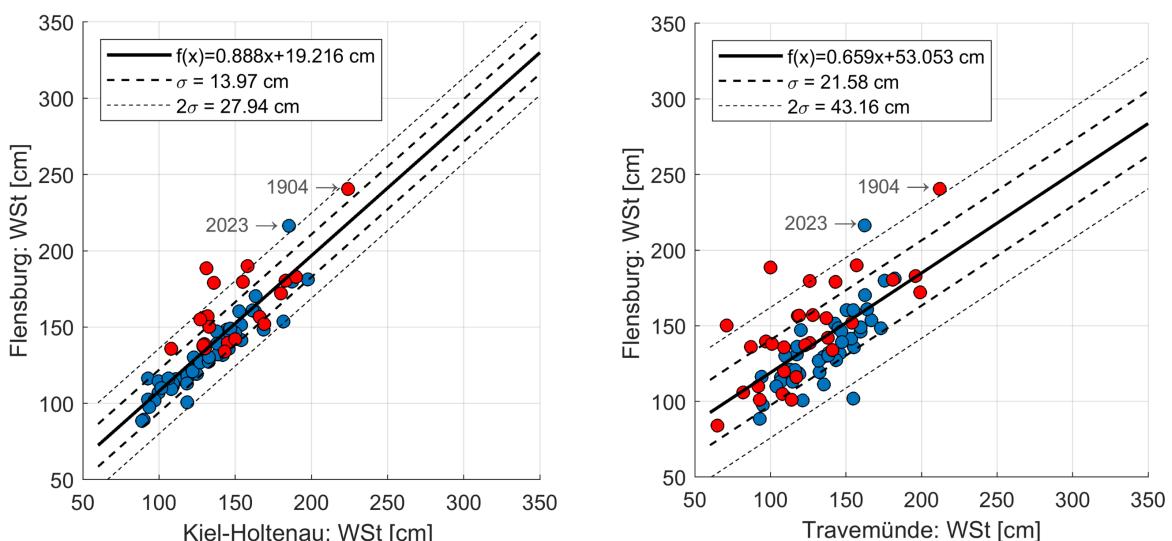


Abbildung 3: Regressionsbeziehungen der Pegel Travemünde und Kiel-Holtenau zu Flensburg. Digital verfügbare Wasserstandsinformationen werden blau dargestellt, analoge Informationen rot. Die einfache und zweifache Standardabweichung (σ) dient als Konfidenzintervall.

Die Wertepaare der analogen Messungen (rot) beider Pegel weisen eine größere Streuung zur Regressionsbeziehung auf als die der digitalen Messungen (blau), so wie es 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 Achtsamkeit 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/.

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 alleinig 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.

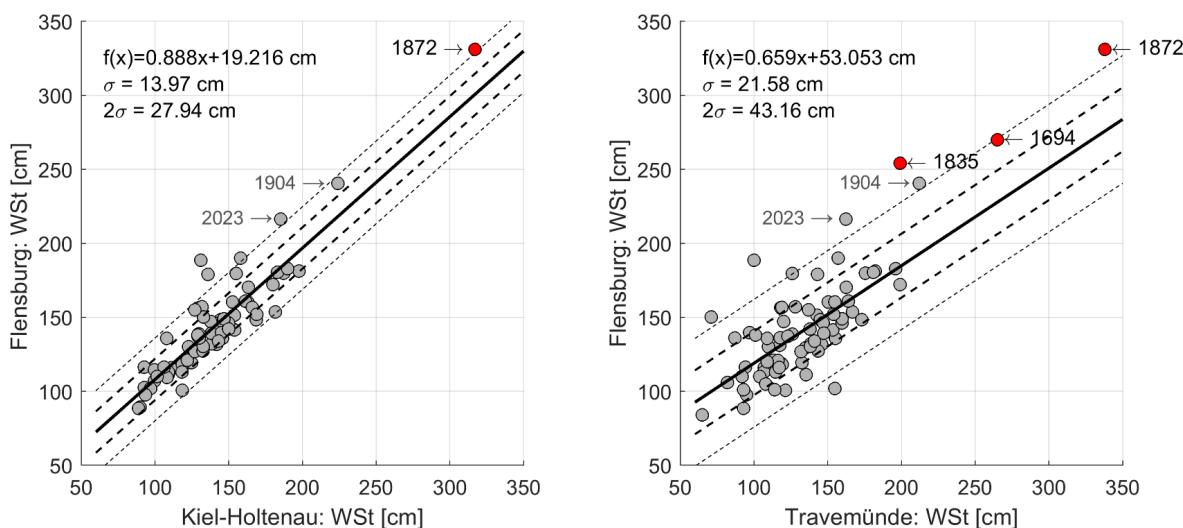


Abbildung 5: Einordnung der historischen Informationen (rot) in die Regressionsbeziehungen der Pegel Kiel-Holtenau (links) und Travemünde zum Pegel Flensburg (rechts).

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 $\geq 200 \text{ cm ü. MW}$ erreicht haben und das Sturmhochwasser vom Oktober 2023 damit das fünfhöchste 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 einzurichten, 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.

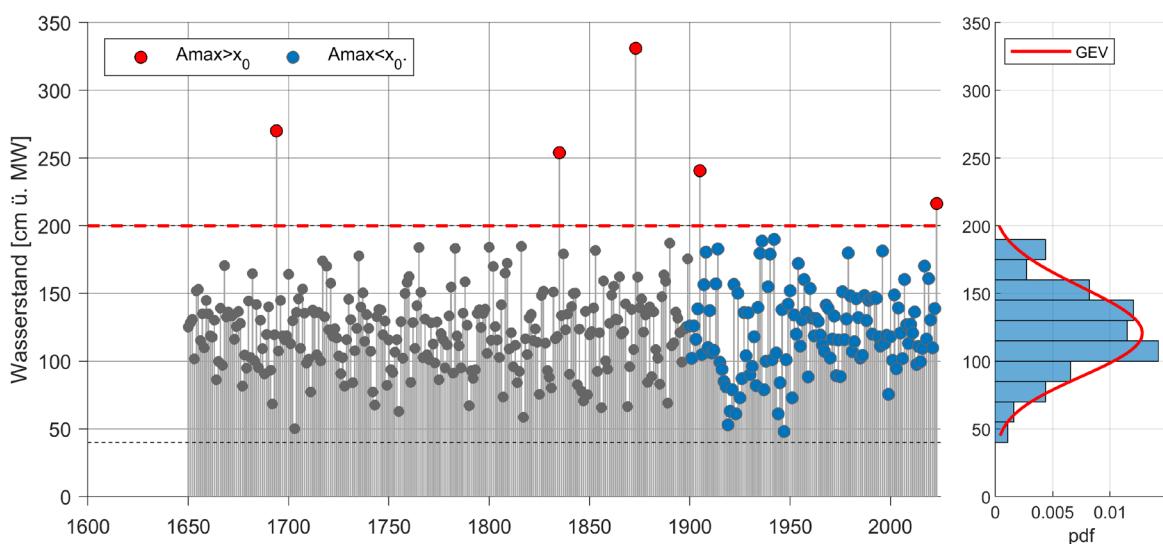


Abbildung 6: Möglichkeit der Integration von historischen Informationen in eine systematische Datenbasis am Beispiel des Pegels Flensburg.

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.

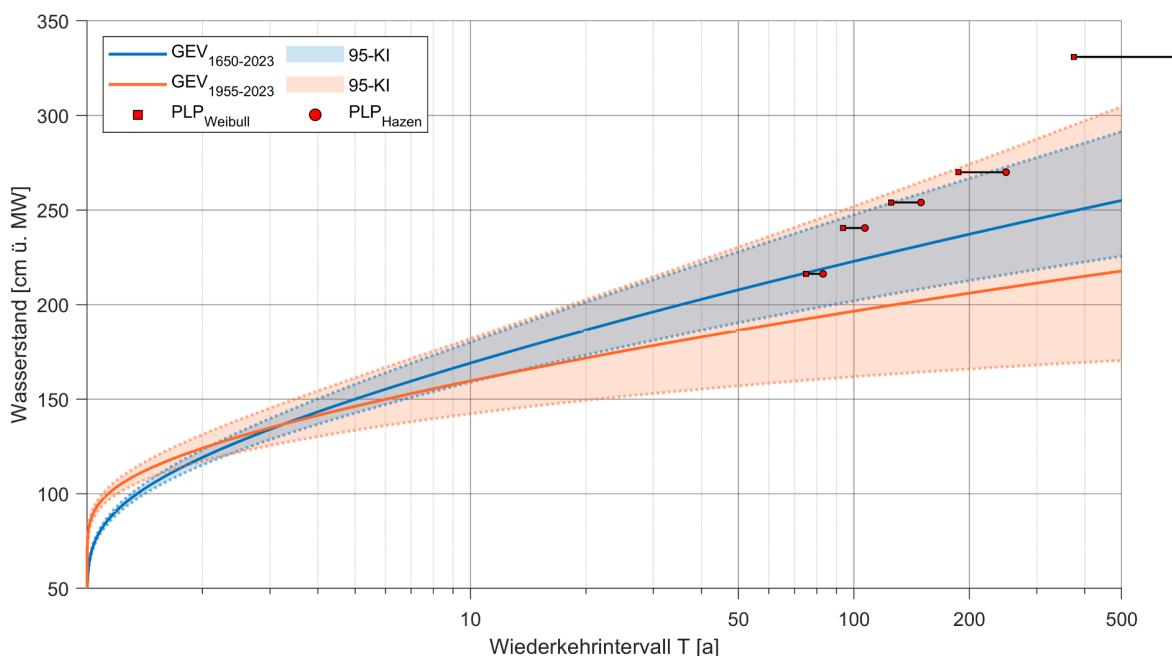


Abbildung 7: Gegenüberstellung der Verteilungsfunktion der systematischen Zeitreihe (1955–2023) (rot) und der Verteilungsfunktion als Resultat der Integrierten Extremwertstatistik (blau), inkl. der 95 % Konfidenzintervalle und Einordnung der empirischen Wahrscheinlichkeiten der 5 höchsten Ereignisse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

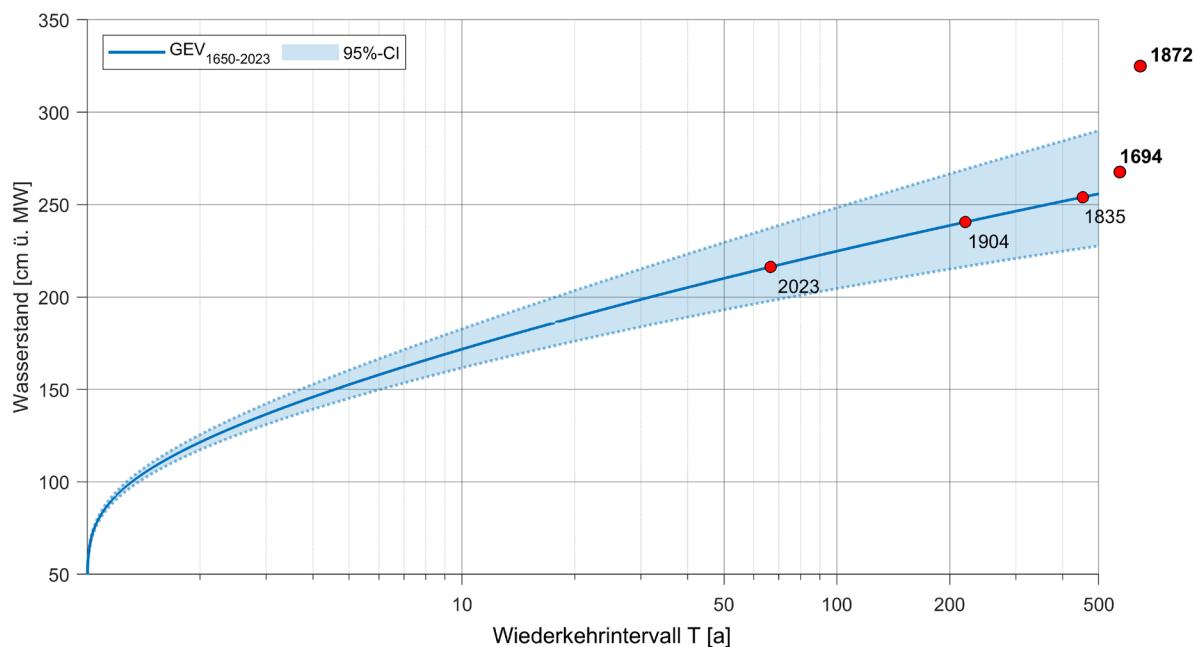


Abbildung 8: Einordnung der historischen Sturmhochwasser in Flensburg anhand der integrierten GEV bis zu einem statistischen Wiederkehrintervall von 500 Jahren.

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 darstellen. 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 Hochwassereignisse 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: Schweres 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 Königlichen 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 Witterungereignisse 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.

Kannenberg, 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, 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.

Impact and response of storm Babet from a Swedish perspective

Sebastian Bokhari Irminger¹, Anna Adell², Marianne Karlsson³, Sofie Schöld⁴ and Åke Magnusson³

¹ Swedish Geotechnical Institute, SGI, sebastian.bokhari-irminger@sgi.se

² Division of Water Resources Engineering, Lund University

³ Swedish Geotechnical Institute, SGI

⁴ Swedish Meteorological and Hydrological Institute, SMHI

Summary

In October 2023, storm Babet led to the most severe erosion in decades along the Swedish South coast. In this study we approach the affected coastal landscape as a coupled social-ecological system where environmental components (e.g. geology, bathymetry, waves) interact with social components (e.g. infrastructure, management, economic activities) to influence the outcome of an extreme event. We use observational data to analyse the meteorological and oceanographic conditions prior to and during Babet, and numerical modelling to create hindcast wave data covering 1959–2023. To understand Babet relative to other events we compare sea levels and waves during Babet to normal conditions and other extremes, especially focusing on the joint occurrence of high sea levels and large waves. Using LiDAR data, we quantify the morphological changes between 2019 and 2023 along approximately 220 km of coast. By interviewing stakeholders from municipal, regional and national level and from private and public sector, we analyse how Babet impacted coastal societies and how key authorities responded to the event. We also analyse how relevant stakeholders received, understood and acted on weather warnings issued by authorities.

Our findings show Babet to be an unusual but not unprecedented event. The high sea levels were caused by westerly winds pushing large amounts of water in to the Baltic basin prior to the event and wind setup during the event. We show the combination of high sea levels and large onshore waves seen during Babet to be unusual, explaining why Babet was more impactful than other events of similar sea levels. Weather warnings were available from October 17th, but many struggled to understand the combined risks associated to forecast high sea levels and easterly winds. Affected municipalities were differently organized before and during Babet, but mostly managed to deal with the event well. The larger organisational challenges were identified in the aftermath due to increased workloads and new types of tasks. As for the morphological changes they are in places significant. The total erosion is close to 1.3 million m³ and the total accretion close to 760 000 m³, resulting in a net loss of 510 000 m³. Expressed as normalized values in the longshore direction changes range from erosion surpassing 150 m³/m to accretion reaching almost 50 m³/m. We identify parts along the coast where we believe most of the erosion between 2019 and 2023 stems from Babet, but also stretches where changes can only partially be attributed to Babet. We see that societal impacts during Babet were dictated more by coastal assets' type and proximity to the sea than by the magnitude of morphological change.

Keywords

Erosion, morphological evolution, storm surge, LiDAR, wave modelling, weather warnings, crisis management, Scania, Baltic Sea

Zusammenfassung

Im Oktober 2023 führte der Sturm Babet an der schwedischen Südküste zur stärksten Erosion seit Jahrzehnten. In dieser Studie betrachten wir die betroffene Küstenlandschaft als ein gekoppeltes sozial-ökologisches System, in dem Umweltkomponenten (z. B. Geologie, Bathymetrie, Wellen) mit sozialen Komponenten (z. B. Infrastruktur, Management, wirtschaftliche Aktivitäten) zusammenwirken, um die Auswirkungen eines Extremereignisses zu bestimmen.

Wir verwenden Beobachtungsdaten, um die meteorologischen und ozeanografischen Bedingungen vor und während Babet zu analysieren, und numerische Modellierung zur Erstellung von Hindcast-Daten für den Zeitraum 1959-2023.

Um Babet im Verhältnis zu anderen Ereignissen zu verstehen, vergleichen wir Wasserstände und Seegang während Babet mit normalen Bedingungen und mit anderen Extremereignissen, wobei wir uns insbesondere auf das zeitgleiche Auftreten von hohen Wasserständen und großen Wellen fokussieren. Mithilfe von LiDAR-Daten quantifizieren wir die morphologischen Veränderungen zwischen 2019 und 2023 entlang eines Küstenabschnitts von etwa 220 km Länge. Durch die Befragung von Stakeholdern auf kommunaler, regionaler und nationaler Ebene sowie aus dem privaten und öffentlichen Sektor analysieren wir die Bedeutung von Babet für die Gesellschaft im küstennahen Raum, und wie die maßgebenden Behörden auf das Ereignis reagierten. Wir analysieren auch, wie die relevanten Interessengruppen die von den Behörden herausgegebenen Wetterwarnungen aufgenommen, verstanden und darauf reagiert haben.

Unsere Ergebnisse zeigen, dass Babet ein ungewöhnliches, aber nicht beispielloses Ereignis war. Die hohen Wasserstände wurden durch Westwinde verursacht, die vor dem Ereignis große Wassermengen in das Ostseebecken drückten, sowie durch Windstau während des Ereignisses. Wir zeigen, dass die Kombination aus hohen Wasserständen und großen aufländigen Wellen während Babet ungewöhnlich war, was erklärt, warum Babet größere Auswirkungen hatte als andere Ereignisse mit ähnlichen Wasserständen. Wetterwarnungen wurden ab dem 17. Oktober ausgegeben, aber viele Empfänger hatten Schwierigkeiten, die kombinierten Risiken zu verstehen, die mit vorhergesagten hohen Wasserständen und Ostwinden verbunden waren. Die betroffenen Gemeinden waren vor und während des Babet-Ereignisses unterschiedlich organisiert, konnten das Ereignis aber meist gut bewältigen. Die größeren organisatorischen Herausforderungen wurden im Anschluss an das Ereignis aufgrund der erhöhten Arbeitsbelastung und neuen Arten von Aufgaben festgestellt. Was die morphologischen Veränderungen betrifft, so sind sie zum Teil erheblich. Die Gesamterosion beläuft sich auf fast 1,3 Mio. m³ und die Gesamtdeposition auf fast 760 000 m³, was zu einem Nettoverlust von 510 000 m³ führt. Ausgedrückt als normalisierte Werte in Richtung entlang der Küste reichen die Veränderungen von einer Erosion von mehr als 150 m³/m bis zu einer Deposition von bis zu 50 m³/m. Wir identifizieren Abschnitte entlang der Küste, an denen wir annehmen, dass der größte Teil der Erosion zwischen 2019 und 2023 von Babet herrührt, aber auch Abschnitte, in denen die Veränderungen nur teilweise auf Babet zurückzuführen sind. Wir sehen, dass die gesellschaftlichen Auswirkungen während Babet eher durch den Typ der Küsten-Assets und deren Nähe zum Meer als durch das Ausmaß der morphologischen Veränderungen bestimmt wurden.

Schlagwörter

Erosion, morphologische Entwicklung, Sturmflut, LiDAR, Wellenmodellierung, Wetterwarnung, Krisenmanagement, Scania, Ostsee

1 Introduction

The Swedish Geotechnical Institute (SGI) and the Swedish Civil Contingencies Agency (MSB) have identified ten Swedish regions at particular risk of negative impacts from floods, landslides or erosion as the climate changes (SGI and MSB 2021). The Swedish South coast is one such region. Parts of the coast already suffer from erosion in today's climate (Malmberg-Persson et al. 2016), and due to a high presence of coastal settlements, erodible soils and low-lying coastal landscapes, flood and erosion risks are expected to multiply manifold with sea level rise (SGI and MSB 2021).

The South coast of Sweden undergoes both morphological (Malmberg-Persson et al. 2016) and societal changes (Blomberg 2001). Many simpler summer houses have been converted to all-year residential homes, leading to a more permanent human presence and increased investments in societal services along the coast. Such societal growth can affect the coastal morphology, just as the morphological evolution can affect the growth or decline of coastal societies.

In October 2023, storm Babet impacted the coast of Sweden at a scale not seen for decades. The storm impacted the physical landscape through erosion and accretion, but it also impacted societies along the coast. It highlighted coastal vulnerabilities and tested stakeholders' ability to prepare for, and deal with the aftermath of, the event under current management systems and distribution of responsibilities. In this study, we adopt a multidisciplinary approach to analysing storm Babet and its impacts from a Swedish perspective. We approach the coastal landscape as a coupled social-ecological system (Walker et al. 2004) where environmental components (e.g. geology, bathymetry or waves) interact with social components (e.g. infrastructure, economic activities or management) to influence the outcome of an extreme event (Malvarez et al. 2021). We ask what the meteorological, oceanographic and hydrodynamic conditions were prior to and during Babet, how they compare to normal conditions and other extremes, how Babet impacted societies along the coast and how key authorities responded to the event. We also investigate the morphological evolution between 2019 and 2023 and how the severity of the societal impacts seen after Babet correspond to the magnitude of morphological change 2019–2023.

2 Study area

In Sweden, storm Babet mainly impacted the South and East coasts of Scania County (see Figure 1A), Sweden's southernmost and third largest region with a population of approximately 1.4 million. It consists of 33 municipalities, of which six were foremost affected by Babet and are the focus of this study; Vellinge, Trelleborg, Skurup, Ystad, Simrishamn and Kristianstad (see Figure 1B). The coastline is complex and irregular in shape. Its geological composition has been surveyed from land and from sea by the Swedish Geological Survey (SGU), result shown in Figure 2A (Malmberg-Persson et al. 2016). The survey shows sand and gravel beaches to dominate the area, followed by glacial till deposits with boulders and

eroding bluffs. There are also sections of hard material like cobbles or bedrock headlands, especially to the South-east. Long-term morphological evolution was studied by (Malmberg-Persson et al. 2016) by analysing aerial photos from the mid-20th century and comparing to 2010 (see Figure 2B). In (Stelzer and Philipson 2023) the coastline evolution between 2015 and 2022 was studied in eastern Ystad municipality using Sentinel 2 satellite scenes. While the long-term morphological evolution is generally slow in the study area there are exceptions. East of Löderup Strandbad the coast has eroded at rates of up to 5–10 m/year (Malmberg-Persson et al. 2016, Stelzer and Philipson 2023) which is exceptionally high for Swedish conditions. Further East a pivoting point between erosion and accretion can be seen at Sandhammaren (see Figure 2B), and accretion rates of 3–5 m/year or more are not uncommon (Malmberg-Persson et al. 2016, Stelzer and Philipson 2023).

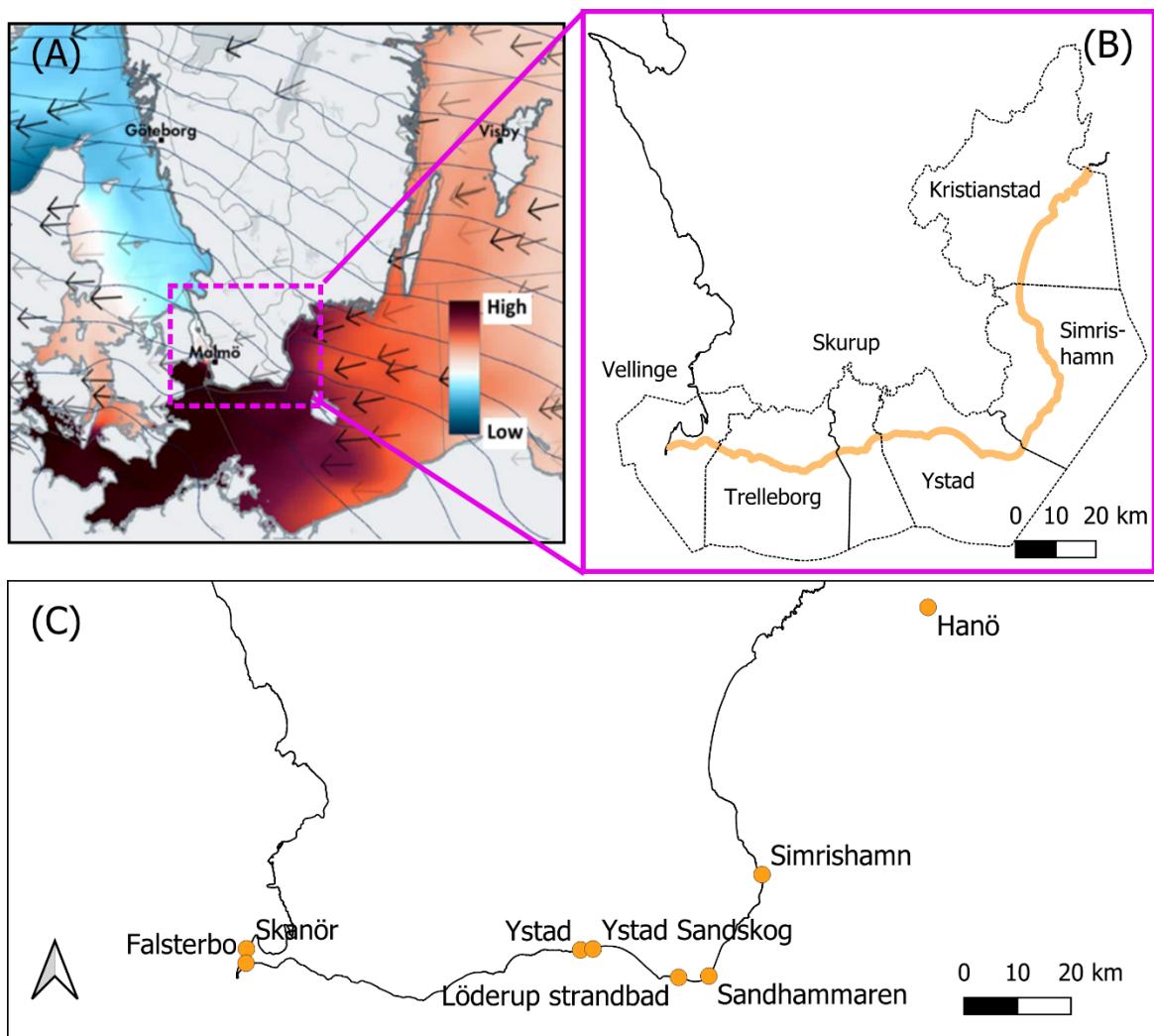


Figure 1: (A) Wind direction (arrows) and sea levels (colors) during night towards October 21st, showing the coast of the study area to be the most affected in Sweden by Babet. (B) The coastline included in the study (orange) along with borders and names of affected municipalities. (C) Locations of interest that are referenced in the study.

Active coastal management is uncommon and mostly limited to hard structures. A noteworthy exception is Ystad municipality who after decades of unsuccessful attempts to combat erosion using hard structures started a nourishment program in 2011. Since then, Ystad Sandskog and Löderups Strandbad (see Figure 1C) have been nourished on four occasions

(2011, 2014, 2017, 2020). The total volumes of added sand amounts to 245 000 m³ for Ystad Sandskog and 91 000 m³ for Löderups Strandbad. These are the only recurring beach nourishments operations of scale in Sweden, but at least two other municipalities (Trelleborg and Kristianstad) are planning nourishments in the coming years.

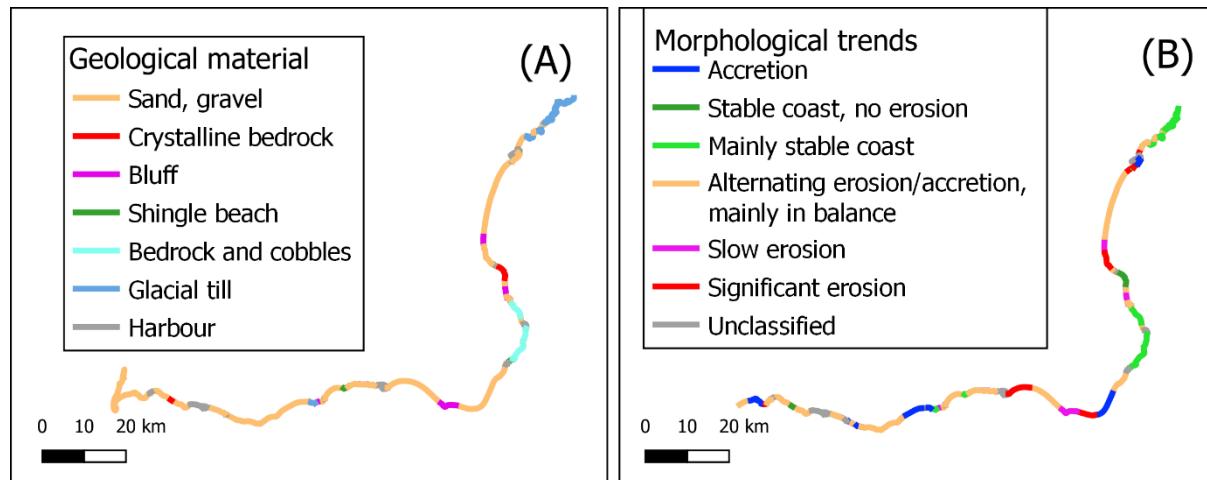


Figure 2: (A) The material along the coast is dominated by sand and gravel, followed by glacial till and eroding bluffs. (B) Morphological trends, based on analysis of aerial photos between mid-20th century and 2010. Both (A) and (B) are adapted from (Malmberg-Persson et al. 2016).

3 Governance and crises management in Sweden

Municipalities in Sweden are self-governing units with an elected council. All municipalities have equal obligations towards their inhabitants, but factors like size, demography, taxpayer collective and population density vary between municipalities. Municipalities' de facto capacity to engage with issues such as coastal management and climate change adaptation varies in terms of human and financial resources, leading to differences in how and to what extent municipalities organize themselves (Storbjörk and Uggla 2015).

The Swedish Planning and Building Act gives municipalities extensive power to decide how land and water within their jurisdiction should be used. Municipalities must ensure that new development does not take place in areas exposed to natural hazards, but do not hold the same responsibility to protect existing buildings. This responsibility lies with the individual property owner.

The regional governance relevant to this study is the County Administrative Board of Scania (CAB), a non-elected extension of the government. CAB is responsible for coordinating crisis management within Scania and plays a role in legal permitting processes related to water or coastal management.

Managing extreme weather events falls under the Swedish system of crisis management, hinged on the principle that an extraordinary event should as far as possible be managed locally (Law 2006:544). There are three geographical levels of responsibility: local, regional and national. Municipalities are responsible at the local level, CAB at the regional level and the Swedish Civil Contingencies Agency at the national level.

In cases of extreme weather events, the Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) play a critical role to the crisis management system as they issue weather forecasts and weather warnings. Since 2021, the Swedish warning system is impact based, meaning warnings are based on the potential level of impact that an expected weather event

may cause. Warning thresholds (i.e. weather intensity such as expected wind speed or sea level) and interacting risk factors are adapted to regional conditions and prerequisites. Most types of warnings are issued with integrated collaboration, meaning that when forecast models indicate that a regional threshold might be surpassed, SMHI initiates a collaboration chain and decision-making process involving relevant regional and local stakeholders. Based on the forecast and pre-existing thresholds, SMHI will draft a proposal for a weather warning and discuss it with the CAB of the relevant region. If needed CAB will initiate further cooperation at local levels with municipalities and other relevant stakeholders, and report back to SMHI. Based on the input received through this process, SMHI will finalize and release a weather warning. This process commonly takes a few hours from warning proposal to issued warning but factors such as the severity of the weather situation and the foresight with which the warnings have been proposed play a role for the urgency of the process. Most collaboration is conducted during office hours, but the operation is maintained 24/7 if necessary. When local stakeholders have been informed of an upcoming weather event, they should implement necessary action at a local level. The timescale of this varies depending on the type of action required (e.g. dissemination of information to residents or physical barriers) and the resources and preparedness at the relevant municipality. The purpose of the collaboration is to make the weather warning system as precise as possible by combining forecasts with a contextualised understanding of potential impacts. Warnings are designated as yellow, orange or red according to the expected level of consequence, with red being the most serious.

It is up to the municipalities to interpret if an event should be considered extraordinary, and if so whether to enter an elevated state of emergency preparedness. According to (Becker and Bynander 2018), it is unusual that an event is formally declared extraordinary.

4 Available data and methodology

Elevation data, sea level data and wind data are collected regularly by state agencies, but they do not feed into any monitoring aimed at coastal morphology. Sporadic measurement campaigns, mainly transect measurements, have been done by municipalities, researchers, consultants or others, but they have largely been project-specific and uncoordinated.

4.1 Meteorological, oceanographic and hydrodynamic data

4.1.1 Wind and sea level observations

The meteorological and oceanographic conditions prior to and during Babet are investigated using SMHI wind and sea level observational data. Sea level data is obtained from three SMHI tide gauges within the study area; Skanör, Ystad and Simrishamn (see Figure 3). The operational period of each gauge is presented in Table 1, Sect. 5.1, along with the station's max recorded sea level and the max recorded sea level during Babet. Figure 6A, Sect. 5.1, shows observed sea levels between October 12th and 24th.

Wind observational data including wind speed, gust wind speed and wind direction is available at several locations, e.g. close to the tide gauges in Skanör or Simrishamn. In spite of this, wind station Hanö located in the North-east of the study area (see Figure 3) is used as it is deemed more representative of the general conditions leading to wind setup and

wave generation (see Sect. 5.1 for more details). Figure 6B, Sect. 5.1, shows observed wind data at Hanö between October 12th and 24th. By comparing wind data to sea levels, we investigate how wind patterns influenced the sea levels prior to and during Babet.

To investigate if Babet is an outlier event, sea levels during Babet are compared to other events from the tide gauge records. To further understand Babet relative to other events, we compare the joint occurrence of high waves and high sea levels seen during Babet to the joint occurrence of these factors during other events by plotting observational sea level data against hindcast wave data (see Sect. 4.1.2). We also compare the simulated wave conditions during Babet to the simulated wave conditions during the 1872 November storm.

4.1.2 Simulated wave data

There are no operating wave buoys in the study area, but wave data simulated using a SWAN (Booij et al. 1999) regional hindcast wave model is available, initially formulated and validated in a study by (Adell et al. 2023). The model is forced with wind data from ERA5 global reanalysis dataset provided by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (Hersbach et al. 2020). The existing hindcast data covers the period 1959–2021. It has been calibrated and validated against wave observations in the Baltic Sea and indicate robust results for both offshore and nearshore performance (Adell et al. 2023). The model uses an unstructured grid. For layout and bathymetry, see Figure 3. Simulated wave conditions include significant wave height (H_s), peak wave period (T_p) and wave direction (θ). The same model configuration has been used in (Sukchaiwan et al. 2024) to simulate wave conditions during the 1872 November storm, using reconstructed wind conditions from (Rosenhangen and Bork 2009) as forcing.

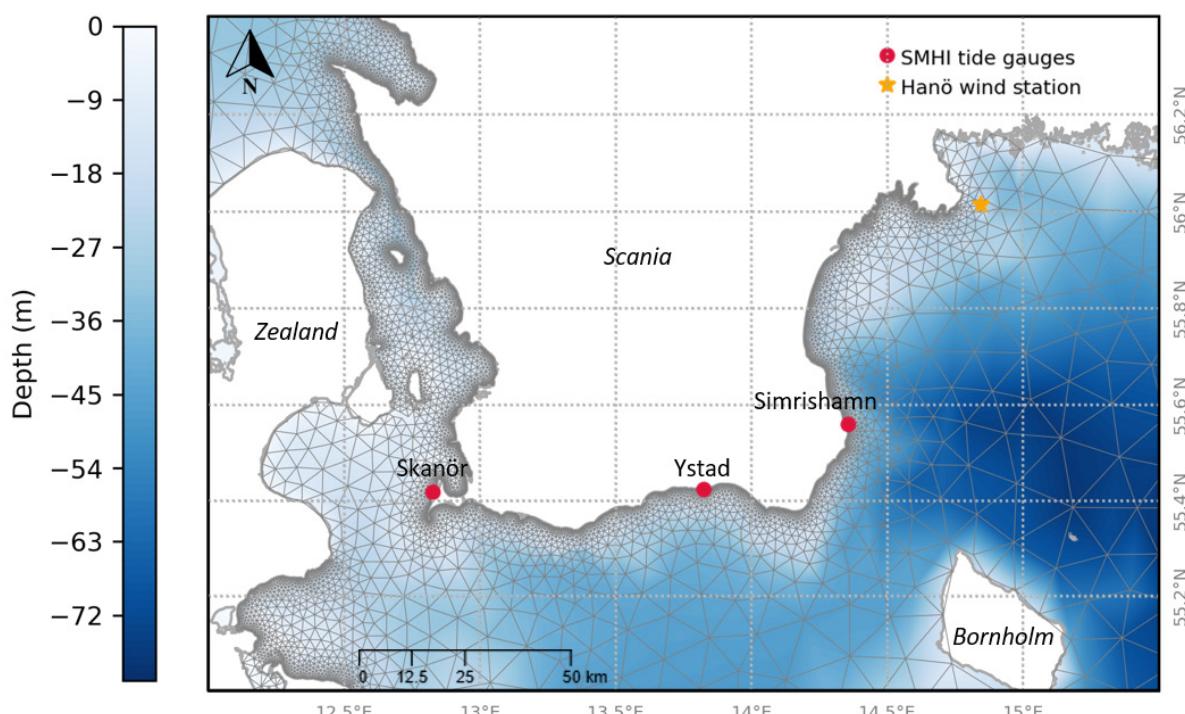


Figure 3 Setup of the SWAN regional hindcast model, showing the layout of the unstructured model grid and the bathymetry for the study area. The locations of tide gauges operated by SMHI are indicated with red points and the location of Hanö wind station is indicated with the orange star.

In this study we produce new hindcast wave data through a similar modelling procedure, using the same model setup as (Adell et al. 2023), but with input data extended to December 2023 to include Babet. This renders a hindcast wave data set covering 1959–2023. The wave conditions during Babet are compared to the overall wave conditions during 1959–2023 and to the 1872 November storm at three locations close to SMHI tide gauge stations. Wave conditions during Babet are also compared to coastal morphological evolutions seen between 2019 and 2023 (see Sect. 5.4) to qualitatively assess Babet's contribution to the changes between 2019 and 2023.

4.2 Elevation data

4.2.1 Digital terrain models (DTM)

There are high-resolution (1x1 m) digital terrain models available from February 2019 (DTM₂₀₁₉) and December 2023 (DTM₂₀₂₃), based on LiDAR data from the Swedish Land Survey. Subtracting DTM₂₀₁₉ from DTM₂₀₂₃ gives a difference raster (DTM₂₀₂₃₋₂₀₁₉) showing changes in elevation in every raster cell between 2019 and 2023 (see Figure 4A). By multiplying the elevational change of a raster cell by its area, we obtain the volumetric change of the cell. The cell area is 1 m², so the elevational change per cell equals the volumetric change per cell. To normalise the data in the longshore direction, we split the coast into 100 m long segments by introducing equidistant transects perpendicular to the coast (see Figure 4A). Next, we introduce a boundary to limit the landward extension of the analysis to areas exhibiting actual elevational change between 2019 and 2023, and a seaward boundary to exclude water (see Figure 4A). Using the transects and boundary lines we create polygons of varying cross-sectional width but equal longshore length (see Figure 4B), and use the polygons to summarise raster cell values within each polygon. The sum of all cell values within a polygon equals the volumetric change within that polygon. We summarise negative, positive and all raster values separately to separate total erosion, total accretion and net volumetric change within each polygon. We divide the obtained volumes by the longshore length of each polygon, i.e. 100 m, to express erosion, accretion and net volumetric changes between 2019 and 2023 as a normalized m³/m value in the longshore direction (see Figure 4C). The normalized values allow analysis along hundreds of kilometres of coast, while still utilising all the information in the underlaying dataset (see Figure 4D).

The landward extent of areas experiencing change in elevation between 2019 and 2023 is generally clear in DTM₂₀₂₃₋₂₀₁₉ (see Figure 4A), and coincides with a clear and sharp crest line in DTM₂₀₂₃. As our landward boundary we use a manual digitization of crest lines from DTM₂₀₂₃, following a methodology described in (Tremasova 2024).

The seaward boundary used to exclude water from DTM₂₀₂₃₋₂₀₁₉ is a national water polygon supplied by the Swedish Land Survey. The polygon does not mimic conditions during any specific LiDAR scan, it is a generalized water line over time, so if sea levels are elevated during a LiDAR scan sea water can extend further inland than the polygon. During the 2023 scan sea levels were elevated 20–40 cm above MSL. This creates some risk of false accretion since water surfaces not excluded by the water polygon will be interpreted as increased terrain, i.e. accretion. Methods of identifying water directly from the LiDAR or DTM data were tested, e.g. slope or aspect analysis of terrain data or intensity analysis of LiDAR data. At first glance all methods seemed promising, but in the end the amount of

data noise led the automated processes to generate greater errors than utilizing the Land Survey's polygon. Results from slope, aspect and intensity analysis were still used to manually cross-check the water polygon's coverage at several locations along the coast to qualitatively understand the risk of false accretion in the results. The overall effect of false accretion is deemed small but not negligible, and most pronounced along the East coast.

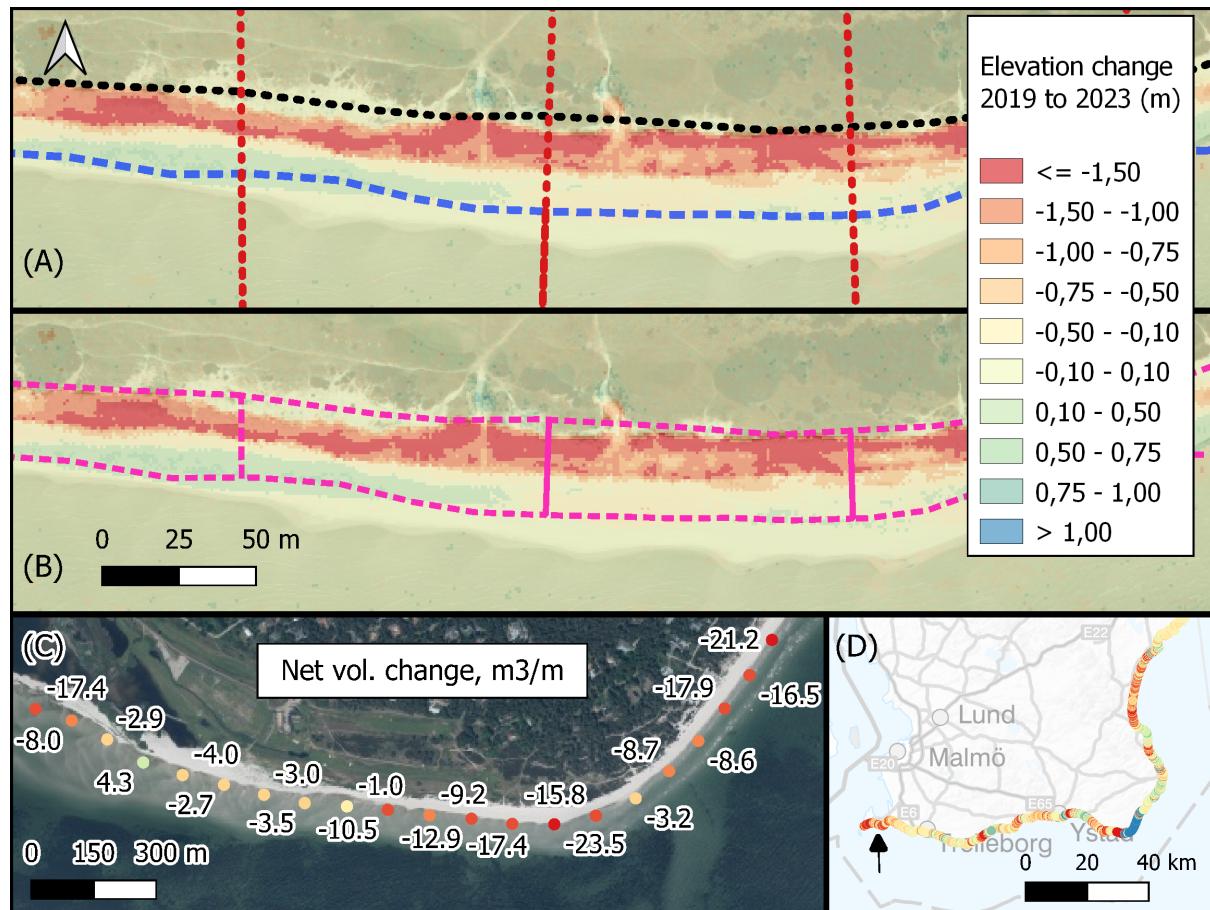


Figure 4: (A) Raster showing change in elevation per raster cell. Black line – crest line, blue line – waterline, red lines – transects every 100 m, perpendicular to the coastline. (B) Crest, water and transect lines merged to polygons for summarizing raster values. (C) Normalized net volumetric change presented as m^3/m in the longshore direction. (D) Same information as (C), but presented at regional scale. Arrow shows location of (A), (B) and (C).

4.2.2 GNSS-GPS (transect measurements)

Terrain transect measurements can show the morphological evolution of a coast, especially if done consecutively along the same transect. There are some transects measurements within the study area, both pre- and post-Babet, collected by municipalities, academia, state or private sector using high precision GNSS-GPS (see Figure 5). The data is from 2021, 2022 and 2023 (pre- and post-Babet). The measurements do not cover a sufficient portion of the coast for a regional analysis of morphological change, but they supplement the DTM analysis by offering local insight into the morphological evolution between 2021 and 2023. The measurements are used as part of the qualitative analysis of Babet's contributing to the morphological changes observed between 2019 and 2023.

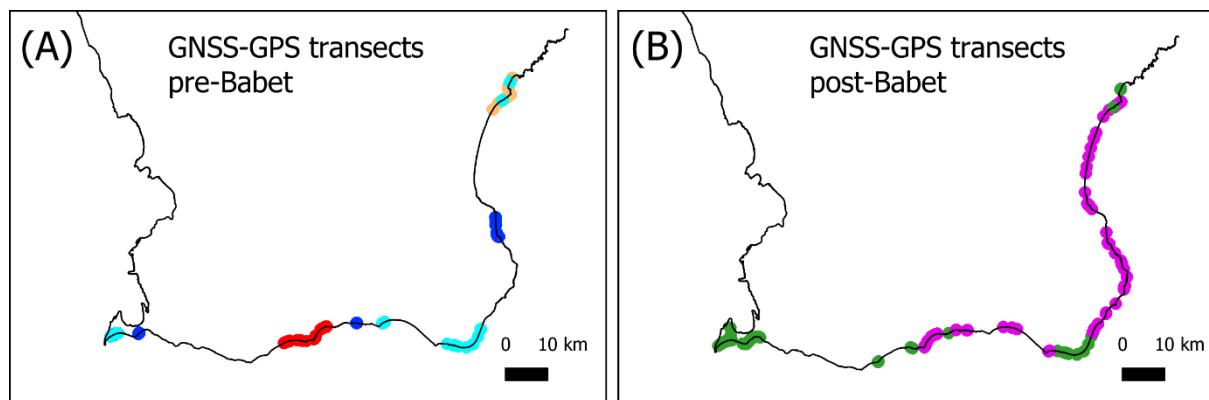


Figure 5: A) GNSS-GPS transect measurements available pre-Babet (red=2021, orange=2022, blue=2023, cyan=Oct 2023, pre-Babet. Sometimes there are measurements from multiple years in the same area, this cannot be seen due to the scale). (B) GNSS-GPS measurements post-Babet (magenta=collected by SGI, green=collected by other parties).

4.3 Societal impact and response

To capture the relevant authorities' response to Babet, along with main damages and lessons learnt, 22 semi-structured interviews were conducted. All the interviews were conducted over Zoom between April and July 2024 and lasted between 35 and 70 minutes. Two informants were interviewed at the same time in three interviews. The interviews were based on a dynamic interview guide encompassing themes including previous experiences of extreme coastal storms and erosion, existing routines, plans and strategies related to crisis management and climate adaptation, preparations and actions before, during and after Babet, and their overall view of lessons learnt from Babet.

Relevant informants were first identified through the network "Regional coastal cooperation" with the aim to include informants from the affected municipalities, CAB Scania, the Swedish Transport Administration (STA) and SMHI. Additional informants were located through a snowballing approach, where one informant recommends additional people to interview. The roles and titles of the municipal informants ranged from head of municipal administrations, climate and environmental strategists to more technical and operative roles. The interviews were recorded through detailed note taken and imported and analysed in NVivo.

5 Results

5.1 Sea levels and winds prior to and during Babet

Figure 6A and B show sea levels and wind measurements prior to, during and after Babet. In the time series it is possible to identify two key characteristics 1) the sea level is elevated in the days before Babet and 2) the further increase in sea level during Babet corresponds to a shift from westerly to easterly winds followed by a build-up of easterly wind speeds.

The first point is a consequence of dense low-pressure traffic during the first half of October leading to sustained and predominantly South-westerly winds pushing large volumes of water to the Baltic Sea through Öresund. Figure 7A shows outflow (negative inflow) of water from the Baltic Sea through Öresund to be the norm during 2023, but during

the first half of October the flow direction is reversed and an accumulated inflow of approximately 20 km³ can be seen (see Figure 7B). The large inflow of water led to increased sea levels throughout the study area.

Regarding the second point, the increase in sea level starting on the 18th coincides with westerly winds decreasing in speed, allowing water previously pushed to the East of the basin to flow back towards the West. As the wind shifts rapidly from West to East and increases in speed during the 18th, the semi-enclosed nature of the basin along with the unusually large volume of water in the Baltic Sea caused significant wind setup in the study area. The dips in sea levels around the 12th and 15th are related to westerly winds first pushing water from the West to the East, lowering levels in the western Baltic Sea, and water then running back and elevating sea levels as the westerly wind speeds decrease.

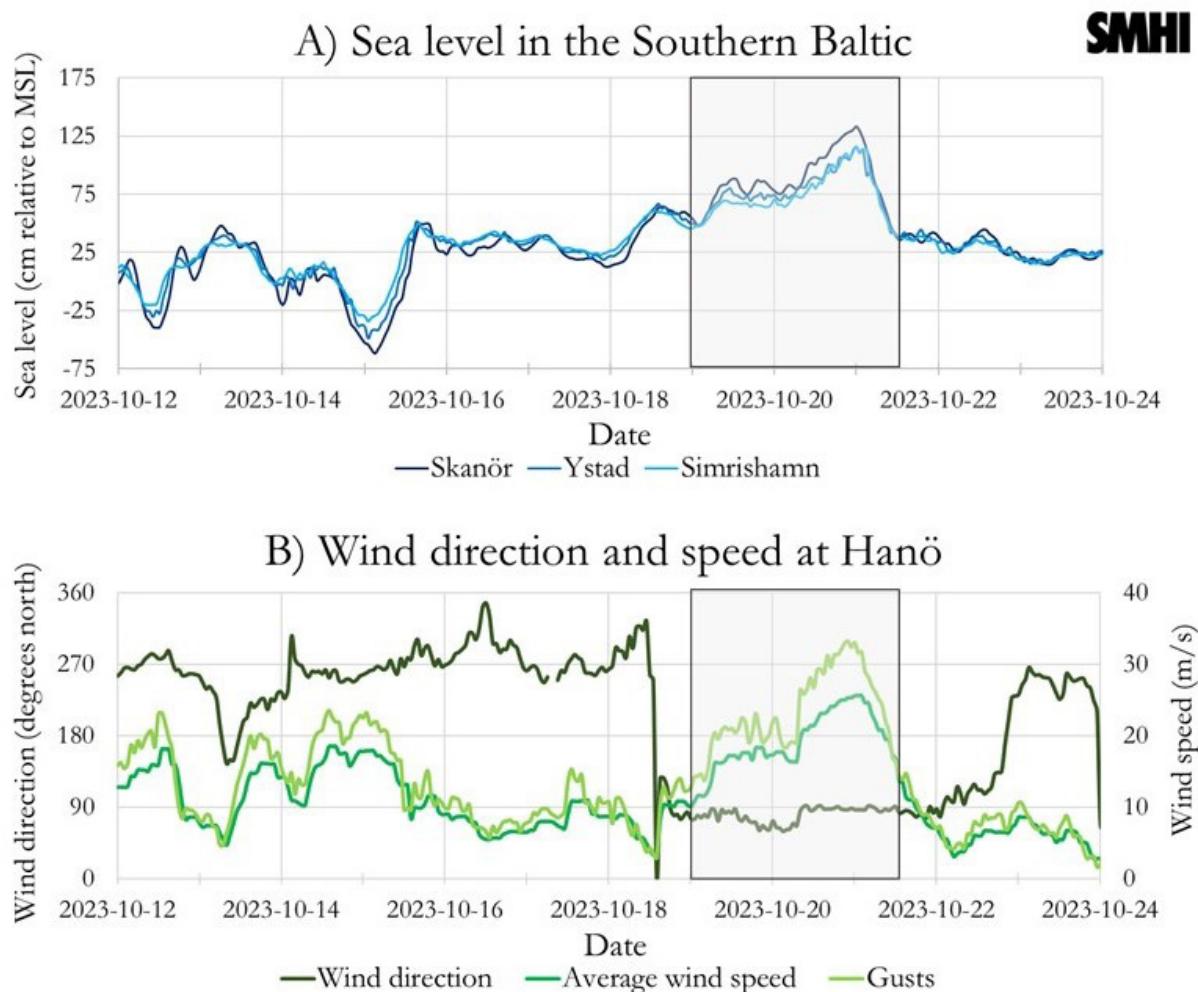


Figure 6: (A) Observed sea levels in the study area, note the increased sea levels in the days before Babet. (B) Wind speed and wind direction at Hanö. Note how the increased sea levels during Babet coincide with a sharp turn in wind direction. This is due to wind setup caused by easterly winds.

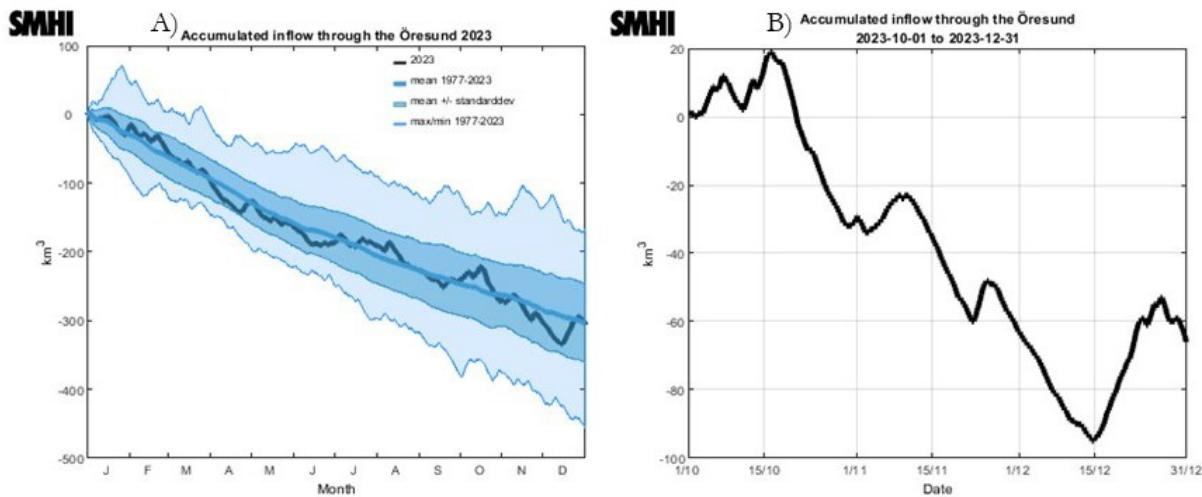


Figure 7: (A) Accumulated inflow through the Sound during 2023 (black line), mean and max/min for the period 1977–2023 (different shades of blue). (B) Accumulated inflow through the Sound 2023-10-01 to 2023-12-31, showing an accumulated inflow of 20 km³ prior to Babet.

5.2 Waves during Babet

Figure 8 shows simulated significant wave height (H_s) at the peak of the event, white arrows show wave directions. Waves were higher along the East coast, especially in the South-east around Simrishamn (location c), where H_s reached >6 m offshore with directly incident wave attack. The South coast was more sheltered than the East, but still experienced H_s in the order of 2–3 m. Sections of the South coast that are South-east facing were hit more head-on by waves compared to sections that are South-west facing (see Figure 8).

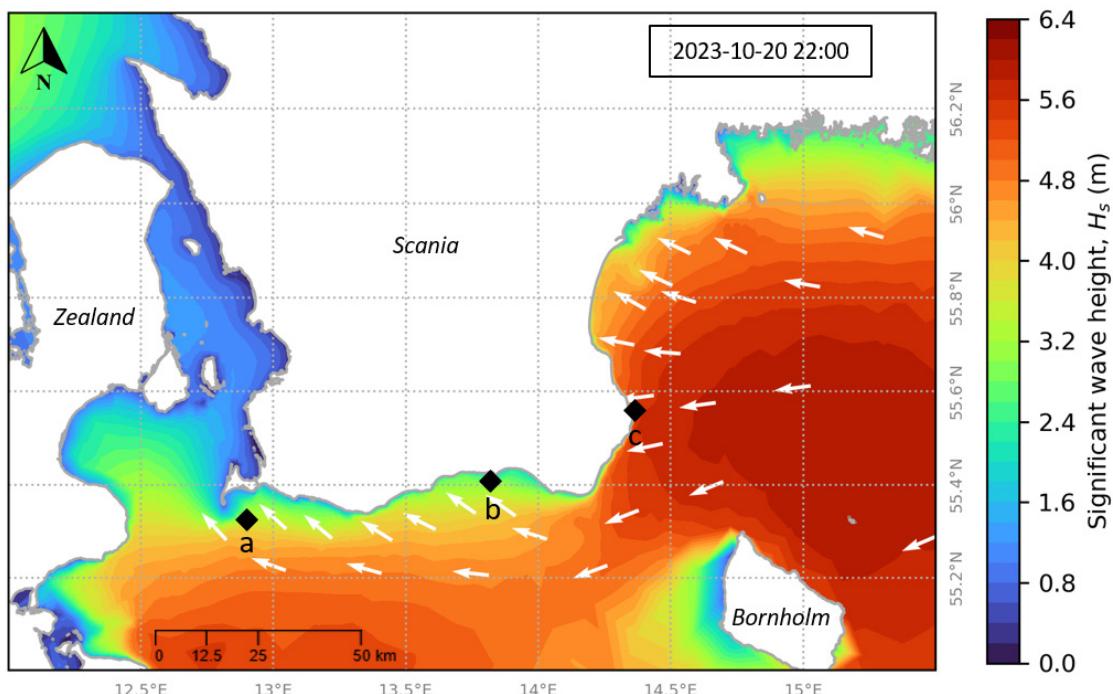


Figure 8: Map showing the simulated significant wave height during the storm peak, the arrows represent wave direction. Locations a, b and c correspond to locations at approximately 10 m depth where time series of wave conditions is extracted from the model and approximately correspond to locations of the tide gauges.

5.3 Babet compared to other events

Table 1 shows data from the SMHI tide gauges in the study area. The table shows that sea levels during Babet were high but not extreme compared to other recorded events. An event in January 2017 led to similar or higher levels at Skanör and Simrishamn, and at Ystad the New Year's Eve storm of 1904 led to considerably higher levels, 167 cm relative MSL compared to 121 cm relative MSL for Babet.

Table 1: Tide gauge records available within the study area, including operational period, maximum recorded level and maximum level recorded during Babet. The stations are operated by SMHI and data is available open-access at www.smhi.se/data.

Station	Operational period	Max recorded level *	Max level* Babet
Skanör	1992 – ongoing	154 (2017-01-04)	135
Ystad	1886 – 1987 and 2014 – ongoing	167 (1904-12-31)	121
Simrishamn	1982 – ongoing	126 (2023-10-21)**	126

* cm, relative to mean sea level, MSL

** max level prior to Babet was 121 cm, relative MSL, 2017-01-04

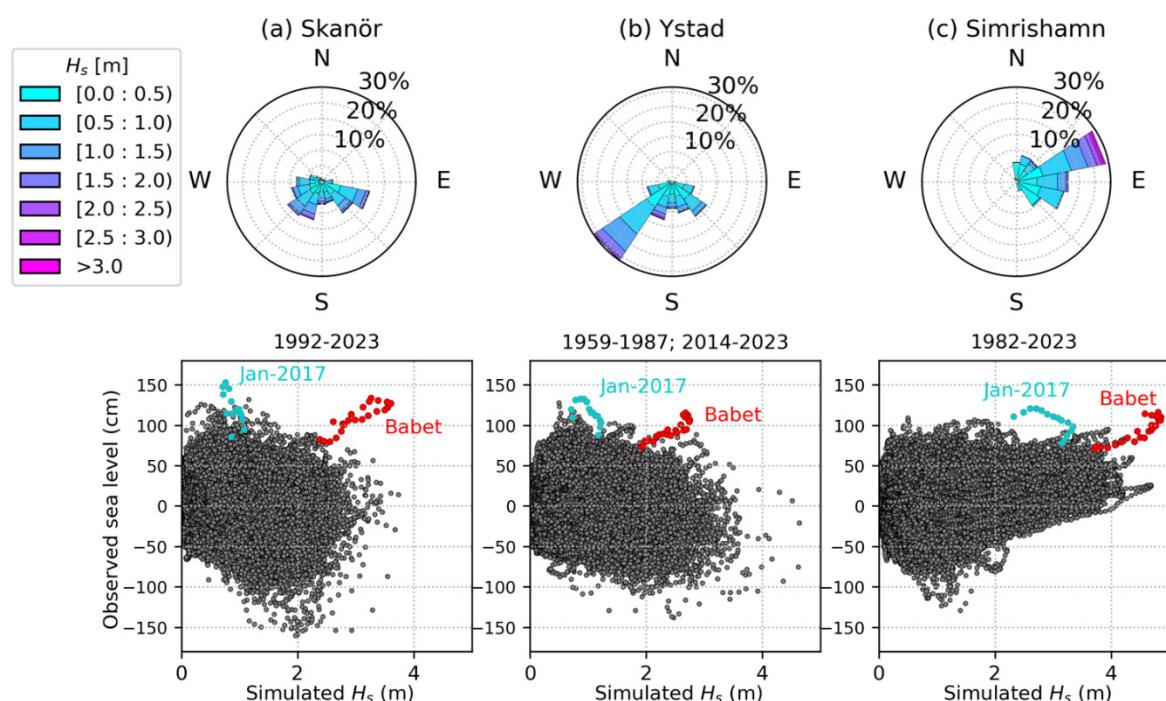


Figure 9: Wave roses with data extracted at 10 m depth (see Figure 8 locations a-c) covering the period 1959–2023 to illustrate the typical wave climate conditions. The scatter plots show the joint occurrence of wave heights and observed sea level for the overlapping periods of available data. Observed sea levels is in relation to MSL.

Even though January 2017 and Babet are comparable events in terms of sea level, damages seen along the coast were more severe during Babet than in 2017. This is due to Babet being a rare occasion of high sea levels coinciding with high onshore waves. The top panel of Figure 9 shows wave roses at locations close to the tide gauges (see Figure 8 for locations), data extracted at approximately 10 m depth. The roses show large waves from East to South-east (i.e., the conditions during Babet) to be unusual, especially at Skanör and

Ystad on the South coast. The bottom panel of Figure 9 shows the joint occurrence of wave heights and observed sea level for the overlapping periods of available data. Data points from 12 h on either side of Babet's peak are indicated with red points to set the storm in context to available historic data. The January 2017 event is shown in turquoise. Although sea levels in January 2017 were similar or higher when compared to Babet, wave heights were much lower, making Babet a different and more energetic event with more erosive potential. At all three locations Babet represents an outlier, but for partially different reasons. At Skanör Babet is a clear outlier both in terms of sea level and H_s . At Ystad, Babet is not as clearly an outlier in terms of H_s , but $H_s > 2$ m in combination with sea levels > 1 m is an outlier, especially when considering that the wave direction was from the South-east instead of the South-west. In Simrishamn high waves in combination with high sea levels is more frequent, but here it is $H_s > 4$ m in combination with sea levels > 1 m that makes Babet an outlier.

While Babet is an outlier in modern times, historical events like the 1904 New Year's Eve storm or the 1872 November storm (Andrée et al. 2023) followed a similar but more severe development as Babet. Figure 10 shows wave conditions during Babet compared to wave conditions during the 1872 storm (Sukchaiwan et al. 2024). The two events are largely similar, but the 1872 storm is more extreme. Simulated wave heights are approximately 0.5–1 m higher during the 24 hours leading up to the peak. Sea levels were also considerably higher during the 1872 storm (Sukchaiwan et al. 2024) due to the stronger winds. Comparing Babet to other events shows Babet to be an unusual, but not unique, event.

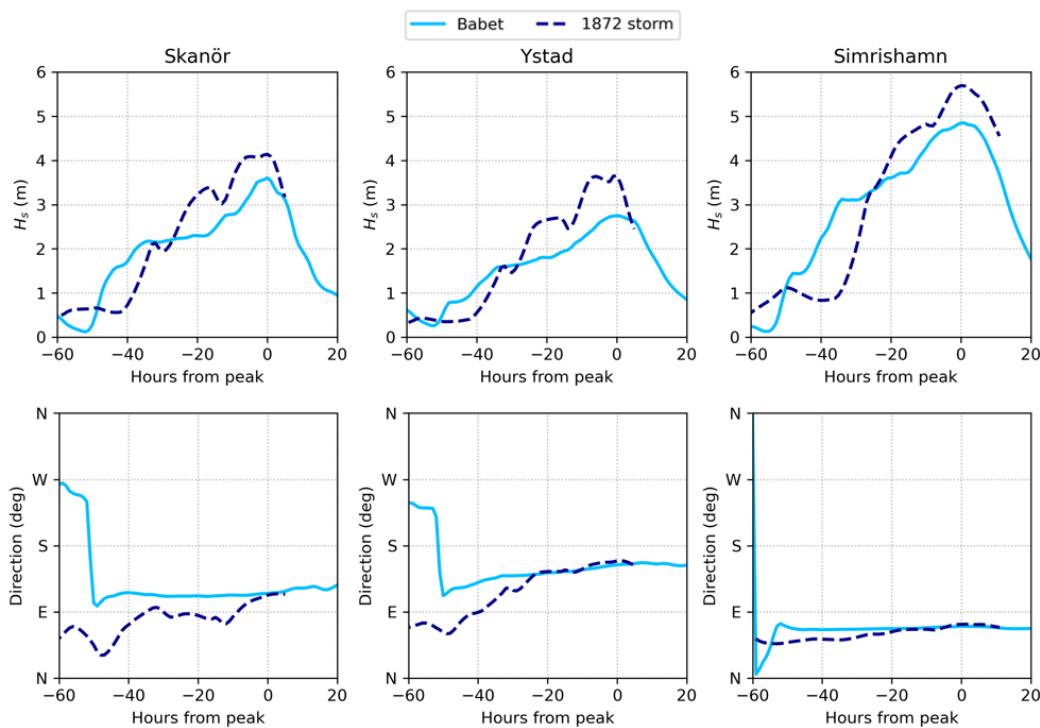


Figure 10: Simulated significant wave height (H_s) and wave direction during the 1872 November storm (dashed line) and Babet (solid line). The locations match those of the scatter plots and wave roses in Figure 9. The two events show similarities, but 1872 led to larger waves.

5.4 Morphological change

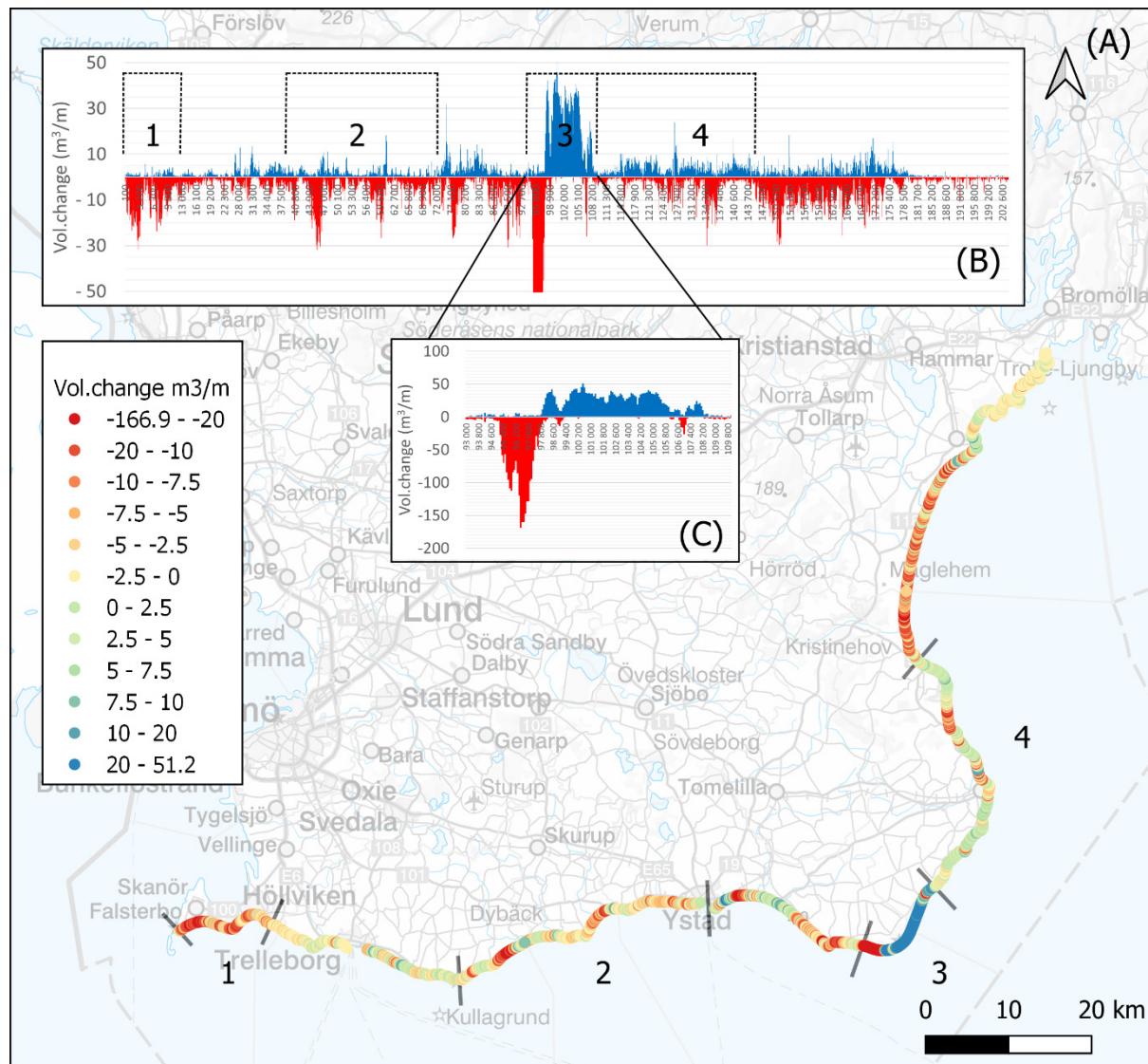


Figure 11: Volumetric changes between 2019 and 2023, expressed as normalized m^3/m in the longshore direction. (A) Net volumetric change plotted on a map. Segments 1–4 are discussed further in Sect. 6.1. (B) Erosion and accretion as a bar chart. Segment numbers are the same as in (A) to facilitate orientation. The Y-axis is cut at $\pm 50 \text{ m}^3/\text{m}$ for increased readability. (C) A subset of (B) requiring a larger Y-axis span to read results.

Figure 11 shows morphological change between 2019 and 2023, expressed as a normalized m^3/m value in the longshore direction. (A) shows net volumetric change on a map, facilitating orientation and offering geographical context. (B) shows the components erosion and accretion separated and presented as bar charts, offering understanding of magnitudes and hotspots. The x-axis of (B) is distance in meters along the coast, starting in the Southwest and finishing in the North-east. The y-axis of (B) is cut at $\pm 50 \text{ m}^3/\text{m}$ to facilitate reading. (C) is a subset of (B) that requires a larger y-axis span. Segments 1–4 are areas that are discussed further in Sect. 6.1. Figure 11 shows that most of the coast experienced morphological changes between 2019 and 2023, but the type and magnitude varies along the coast. The subset (C) in Figure 11 shows changes that are exceptional in a Swedish context, with erosion reaching $>150 \text{ m}^3/\text{m}$ and accretion close to $50 \text{ m}^3/\text{m}$. The pattern follows a

long-term trend in the area (see Figure 2B). Total erosion in the study area is close to 1.3 million m³, total accretion close to 760 000 m³, resulting in a net loss of 510 000 m³ between 2019 and 2023. As stated in Sect. 4.2.1 results contain some false accretion, so accretion is likely slightly lower and the net loss slightly higher.

5.5 Impacts and damages from Babet

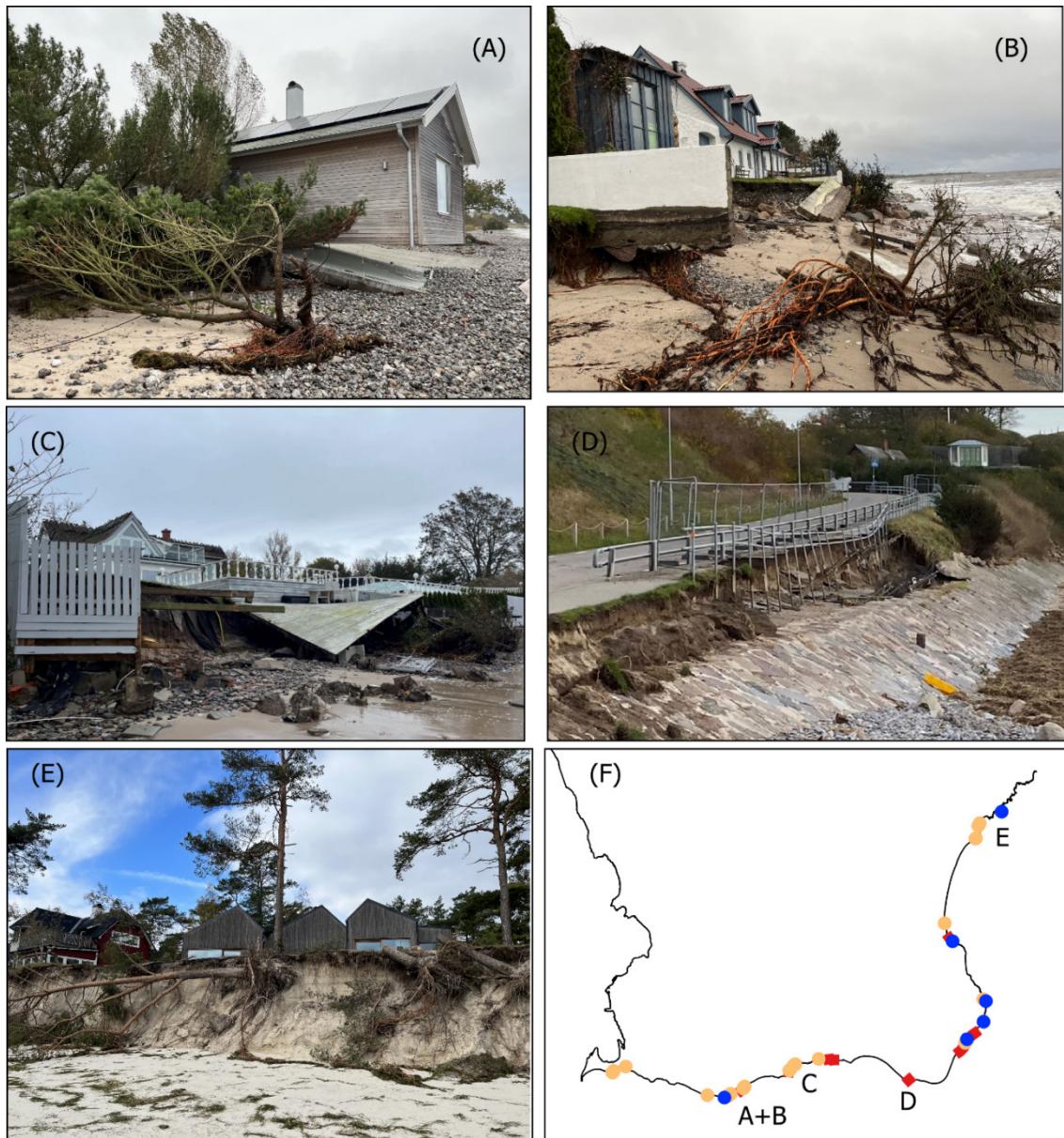


Figure 12: Examples of damages occurred during Babet. (A), (B) and (C) shows residential houses that suffered damages. (D) shows an undermined access road to a harbour and (E) shows residential houses that were not damaged by the storm, but where there is a risk that subsequent landslides in the unstable slope will lead to damages. (F) Some of the recorded damages along the coast. Orange=buildings, red=roads, blue=harbours.

Impacts and damages to coastal societies caused by Babet can be found throughout the study area (see Figure 12F), but the type and severity of the impacts vary and the highest levels of erosion in DTM₂₀₂₃₋₂₀₁₉ do not coincide with the highest societal impacts post-Babet. E.g., segment 1 in Figure 11 (Vellinge) suffered more widespread erosion than

segment 2 (Trelleborg/Skurup), yet the societal impacts were greater in segment 2 due to residential houses being located very close to the sea (see Figure 12A, B, C). Figure 12F shows buildings were also damaged in segment 1, but these were small and simple beach huts with limited societal impacts. Around Simrishamn (segment 4) the erosion was more limited due to the geology of the segment (see Figure 2A), yet Simrishamn experienced significant damages to their harbours due to high waves, e.g., 3000 kg stone blocks were pushed off the crest of a harbour pier. In Kristianstad the steep cliff faces left by Babet led to fear amongst some property owners that their buildings would be damaged by subsequent landslides (see Figure 12E). Coastal roads were also damaged, e.g. in Ystad municipality where an access road to Kåseberga harbour was undermined (see Figure 12D). Several roads also had to temporarily close due to overwashed debris and sand blocking the road. Beyond the initial damages, Babet also led to secondary impacts such as delayed investments and delayed development projects when municipal units had to reorganise their funds toward damage repairs.

5.6 Interpretation of warnings and preparations

On October 17th, SMHI published an orange warning for very high sea-levels along Scania's coast, as well as a warning for easterly wind up to 24 m/s. On the morning of the 19th, the severity increased and yellow warnings for wind over land were also issued, describing persistent eastern storm gusts up to 30 m/s from the evening of the 20th over southern parts of Scania. The warnings were preceded by a collaboration between SMHI and CAB Scania. CAB's crisis management unit also arranged regional coordination conferences on October 19th and 20th, where municipalities and SMHI participated.

All interviewed informants had noted the weather warnings, and some had participated at the coordination conferences. Many referenced the 1872 storm, but several interviewed municipal officials still found it difficult to fully understand the combined risks of the forecast high sea levels and easterly winds.

In SMHI's warning, coastal erosion was listed as a potential impact of high sea levels, but this was communicated as one of several possible risks. For some municipal officers in Ystad and Vellinge, the severity of the situation was only realised after a consultant with specific expertise in coastal processes contacted them, explicitly warning them of the potential erosion risk. Like this consultant who had spent a lot of time in the coastal landscape, it appears as those with specific and experiential knowledge of the sea and shoreline combined with the ability to read forecasts could best interpret the severity of the warnings.

Once the warnings were received within the different organisations, the preparations mainly followed the same patterns. For the municipalities, it involved clearing manholes, in- and outlets, pulling up jetties, mooring boats and securing marinas. For the STA, it involved closing off and monitoring roads. In Vellinge, temporary flood defences were erected according to pre-existing plans, the municipality also established a secondary defence line and had trucks with gravel on standby should there be a breach.

No interviewed organisation formally elevated their emergency preparedness and declared an extraordinary event, but the municipalities of Trelleborg, Ystad and Vellinge elevated their preparedness within relevant administrative units such as the technical and communication unit. In Simrishamn and Skurup, a form of informal preparedness took place with select staff members working extra hours over the weekend.

5.7 Dealing with the aftermath

In the immediate aftermath of Babet, the municipalities and the STA focused on clearing rubble from roads and public areas as well as conducting acute repairs on critical infrastructure such as roads, harbour, sewers and securing public areas. While the immediate phase appears to have worked well, more challenging aspects included communication with property owners and how to interpret the existing legislation. At the core of the problem was a misconception on behalf of the public that the municipality held a responsibility to help repair or protect private property, a responsibility that lies on the property owner (see Sect. 3). Another issue was informing property owners of the need for adequate legal processing before repair or protective measures were implemented along the coast. The erosion caused by Babet left some property owners with a sense of urgency and a perceived need to build protective measures immediately.

Municipal informants as well as the STA had difficulties interpreting what legal permits were required during repairs and reconstructions of coastal defences. More readily available information on the necessary legal processing at different stages of erosion damage, for example in urgent situations when facilities needed immediate repairs, were therefore called for by informants.

Babet's aftermath also proved challenging for the CAB's water unit as the number and size of cases associated to Babet was unprecedented. The workload limited the unit's possibilities to pursue reports of coastal defences being built without the proper permits. Babet triggered internal discussions on where to draw the line on what a property owner may or may not do without first seeking legal permits. To facilitate the legal interpretation the officers at the unit also engaged in outreach and information to municipalities and property owners.

5.8 A window of opportunity? Lessons learnt and moving forward

Babet was by informants interpreted as a precursor of anticipated climate change effects that manifested earlier than expected and the event was seen to have created a greater awareness of extreme events, climate change and the need for adequate response and adaptation. As such, Babet strengthened commitments to existing or planned strategies related to coastal preparedness and climate change adaptation. For example, informants in Vellinge said that the support for the ongoing development of a large coastal defence had increased after Babet. In Ystad and Simrishamn, insights gained from Babet led to plans to revise their action plans for the coast. An informant from Skurup also stated that the event had put more weight behind arguments to restrict development in coastal zones and vulnerable locations. The extreme event was by informants deemed as an eye-opener for local politicians, which they hoped could provide more resources for risk reduction and spur further discussion on sustainable coastal development. In Simrishamn, a heightened political awareness had already been noticed as the municipal unit received the funds requested for repairs and climate change adaptation. Still, some cautioned that the public memory is short and the attention Babet received might diminish as other new pressing issues emerge.

Within the area of emergency preparedness, informants generally praised the immediate response to Babet regardless of how the preparedness was set-up. Within the municipalities, units were described as having pulled together as a team with an overwhelming

commitment and engagement from the involved staff members. Babet also catalysed learning and reflections within the organisations with the potential to change existing routines and practices. One such reflection that informants from both Trelleborg and Ystad made was the need for an overarching coordinator between the different municipal units during the operations and responses to an emergency.

In Simrishamn, informants said they would assess the possibility to elevate the level of preparedness within one municipal unit to ensure sufficient staff and resources during an emergency response. Officials from Skurup expressed the most vocal need to strengthen their emergency preparedness and argued that Babet had showed the necessity for a more formalised preparedness procedure including clearer routines, mandates and funds for preparedness.

6 Discussion and conclusion

6.1 Morphology evolution and the importance of Babet

In Sect. 5.4 we show morphological changes between 2019 and 2023. If the effect of Babet could be isolated it would yield new insights into storm erosion during an outlier event. Due to the four-year gap in the LiDAR data, we cannot quantitatively isolate Babet, but the supplementary data (e.g. geological conditions, long-term trends, transect measurements, stakeholder testimonies) gives us site-specific contextual understandings that allow us to qualitatively estimate if Babet is the main driver of change along different parts of the coast. Below we show four examples of segments along the coast where we have done this.

Segment 1 in Figure 11 (Vellinge). Mostly high erosion values in DTM₂₀₂₃₋₂₀₁₉, 15–20 m³/m or more not being uncommon. Sandy beaches with a long-term trend of *mainly in balance* or *accreting* along most of the segment (Figure 2B). Comparing GNSS-GPS data from March and (pre-storm) October 2023 to DTM₂₀₁₉ shows generally good agreement, indicating limited change in elevation between 2019 and 2023 pre-storm. Available data suggest limited to no erosion between 2019 and 2023 pre-storm, leading us to the conclusion that most of the erosion in DTM₂₀₂₃₋₂₀₁₉ can be attributed to Babet.

Segment 2 in Figure 11 (Eastern Trelleborg and Skurup). General net erosion in DTM₂₀₂₃₋₂₀₁₉ along most of the segment, with some pockets of net accretion. Higher erosion numbers, in the order of 15–25 m³/m, are found at coastal segments facing SSE and located in the western parts of bay-shapes. A long-term morphological trend of *mainly in balance* or *accreting* (Figure 2B) can be seen, and (Ziolkowska 2024) indicate mostly stable or growing dunes 2019–2023 pre-storm, however one of the erosion hotspots shows slight dune retreat in the years before Babet. Available data suggests some morphological activity prior to Babet, but at a limited scale. We therefore conclude most of the changes seen in DTM₂₀₂₃₋₂₀₁₉ to stem from Babet.

Segment 3 in Figure 11 (East of Löderup strandbad). The coast shows very high morphological activity, erosion reaching >150 m³/m and accretion >40 m³/m. The coastal segment has for decades been one of the morphologically most active in Sweden, and we can conclusively say that not all changes seen in DTM₂₀₂₃₋₂₀₁₉ stem from Babet.

Segment 4 in Figure 11 (Simrishamn). Erosion is comparatively low in DTM₂₀₂₃₋₂₀₁₉ and limited to a few hotspots, even though the coast likely experienced the largest waves during Babet (see Figure 8). The low erosion is likely due to the geology of the coast being mainly

bedrock and cobbles (see Figure 2A). The erosion hotspots correspond well to stretches classified as *sand/gravel* or *bluff coast*. The dominating long-term morphological trend is *mainly stable*, but there is a stretch of *slow erosion* (Figure 2B). Based on available data we conclude Babet to be an important driver of change along the segment, likely the main driver along most stretches.

We recommend continued research into isolating Babet's impact on the morphology of the coast. The Swedish Land Survey have LiDAR data of the study area from 2010 and from 2025. Extending the analysis to 2010–2025 would be one way of quantitatively comparing the 2019–2023 period to the years before and after, creating relevant context for the changes seen between 2019 and 2023.

6.2 Societal impact and response

Already on October 17th it was possible to identify Babet as an upcoming event with the potential to alter the coastal landscape at region scale, but understanding the full severity required specialized skills and knowledge of coastal processes as well as local conditions. SMHI correctly forecast and issued warnings for high sea levels and strong easterly winds, but many recipients of the warnings did at first not grasp the potential severity of the upcoming weather. One way of conveying the severity might have been to point out similarities between the forecast and the 1872 storm, as this storm is well understood in the region as an extreme. At the same time, it is unattainable for a national authority to have insight into all relevant regional and local contexts in Sweden, and it can be argued that since the 1872 storm is well-known then a forecast of high sea levels and strong easterly winds should set off alarms with stakeholders at regional and local levels. The initial struggle to grasp the severity showcases the need for clear and explicit warnings from SMHI, but also the need for regional and local authorities to analyse weather warnings through a lens of local contexts and consequences.

The municipalities' right to self-organise their emergency preparedness is reflected in the differences in municipal responses to Babet, but preparations and the immediate responses to Babet seem to have worked well irrespective of how it was formally organized. The aftermath however proved more challenging, revealing organisational difficulties of sustainably coping with drastically increased workloads and new types of tasks over periods of weeks or months. This is true both for the municipalities and for CAB.

In the absence of a national or regional actor with a strong mandate for cross-organisational coordination, coastal professionals within and between organisations still found ways of coordinating efforts prior to, during and after Babet, sharing data and knowledge and drawing upon each-other's strengths and opportunities. This led to extensive documentation of Babet, laying the ground for a better understanding of the event through continued research. The Swedish experiences show that with well-established and cross-organisational connections between a variety of stakeholders prior to an event, significant self-organisation can take place. This shows the importance of not working in silos, and having good dialogue between public sector, private sector, academia and local stakeholders.

Babet can be considered a focusing event that exposed existing challenges. The event illustrated ongoing tensions, knowledge gaps and uncertainties related to the roles and responsibilities between municipalities and property owners in developing and financing coastal management and adaptation, and it shed light on the need to bring more clarity into

the division of responsibility on how to develop and fund preventive measures and coastal defences. Related to this was a request for more expert and government support and funding on how to plan and adapt coastal areas to climate change including the contentious issue of managed retreat. This ties in to overarching questions on the capacity of individual municipalities to respond to current and future extreme weather events and whether responses should be taken at a regional rather than municipal level. Despite these challenges stakeholders such as the municipalities and CAB pulled together and engaged in information and dialog with property owners. Still, the findings show that these questions need further clarification from the government. Babet also catalysed learning and reflections within the organisations both in terms of how to best organise emergency preparedness and the direction of climate change adaptation, which has the potential to change existing routines, practices and policy directions. From a Swedish perspective, Babet serves as a warning and a reminder of how severely our coasts can be hit by individual storms, without having to experience the full effects of historical extremes such as the 1872 November Storm. In this sense Babet offers a window of opportunity for learning and building coastal awareness, capacity and resilience in Sweden, both for the next storm under present conditions and for the challenges ahead due to climate change.

7 References

- Adell, A.; Almström, B.; Kroon, A.; Larson, M.; Uvo, C. B.; Hallin, C.: Spatial and temporal wave climate variability along the south coast of Sweden during 1959–2021. In: *Regional Studies in Marine Science*, 63, 103011, 2023.
- Andrée, E.; Su, J.; Dahl Larsen, M. A.; Drews, M.; Stendel, M.; & Skovgaard Madsen, K: The role of preconditioning for extreme storm surges in the western Baltic Sea. In *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23 (5), 1817–1834, 2023.
- Becker, P.; Bynander, F.: The system for crisis management in Sweden: Collaborative, conformist, contradictory. In: *Handbook of disaster risk reduction & management*, 69–95, 2018.
- Blomberg, P.: 2001:35 Skånes kustområden - ett nationallandskap: Report from the County Administrative Board of Scania, <https://www.lansstyrelsen.se/skane/om-oss/vara-tjanster/publikationer/2001/200135-skanes-kustomrade---ett-nationallandskap.html>, 2001.
- Booij, N.; Ris, R. C.; Holthuijsen, L. H.: A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104 (C4), 7649–7666, 1999.
- Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P.; Hirahara, S.; Horányi, A.; Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J.; Peubey, C.; Radu, R.; Schepers, D.; Simmons, A.; Soci, C.; Abdalla, S.; Abellan, X.; Balsamo, G.; Bechtold, P.; Biavati, G.; Bidlot, J.; Bonavita, M.; Thépaut, J. N.: The ERA5 global reanalysis. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146 (730), 1999–2049, 2020.
- Malmberg-Persson K.; Nyberg J.; Ising J.; Rodhe L.: Skånes känsliga stränder – erosionsförhållanden och geologi för samhällsplanering. In: *SGU-report 2016:17. Sveriges geologiska undersökning*, 2016.

Malvarez, G.; Ferreira, O.; Navas, F.; Cooper, J. A. G.; Gracia-Prieto, F.J.; Talavera, L.: Storm impacts on a coupled human-natural coastal system: Resilience of developed coasts. In: *Science of the Total Environment*, 768, 144987, 2021.

Rosenhagen, G; Bork, I.: Rekonstruktion der Sturmflutwetterlage vom 13. November 1872. In: *Die Küste*, 75, 51–70, 2009.

SGI and MSB: Riskområden för ras, skred, erosion och översvämning, Redovisning av regeringsuppdrag enligt regeringsbeslut M2019/0124/KI, 2021.

Stelzer, K.; Philipson, P: Coastline Extraction and Change Analysis from Satellite Data - 2015–2022, https://www.regionalkustsamverkanskanehalland.se/wp-content/uploads/CoastlineChangeAnalysis_2015-2022.pdf, 2023.

Storbjörk, S.; Uggla, Y.: The practice of settling and enacting strategic guidelines for climate adaptation in spatial planning: lessons from ten Swedish municipalities. In: *Regional environmental change* 15: 1133–1143, 2015.

Sukchaiwan, E.; Adell, A.; Hallin, C.; Almström, B.: Analysis of the wave conditions during the 1872 storm. In: *VATTEN – Journal of Water Management and Research*, 80 (3), 142–151, 2024.

Tremasova, Y.: Assessment of Sediment Transportation Along the Southern and Eastern Coast of Scania, Sweden: A Case Study of Storm Babet, at <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9163881>, 2024.

Ziolkowska, P.: Beräkning av Net Shoreline Movement - En jämförelse mellan DSAS och FME, 2024.

Die Ostseesturmflut Oktober 2023 in Schleswig-Holstein

Thomas Hirschhäuser¹, Maria Blümel², Thorsten Dey², Hauke Thiesen², Jörg Peters², Lutz Christiansen² und Benjamin Franz³

¹ Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein; thomas.hirschbaeuser@lkn.landsh.de

² Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein

³ Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur des Landes Schleswig-Holstein

Zusammenfassung

Die Ostseesturmflut 2023 war in weiten Teilen der schleswig-holsteinischen Ostseeküste das stärkste Sturmflutereignis seit mehr als 100 Jahren. Die aufgetretenen Wasserstands- und Seegangsverhältnisse werden mit den vorliegenden Planungsgrundlagen verglichen und statistisch eingeordnet. Im Ergebnis ist das Wiederkehrintervall der Belastungen hinsichtlich des Wasserstandes sowie der für die Küstenschutzanlagen relevanten Belastungsgröße kombinierte Belastung aus Wasserstand und Seegang mit seltener als einmal in 100 Jahren zu bewerten.

Die langfristige Küstenschutzstrategie des Landes Schleswig-Holstein wird anhand der Gesamtstrategie Ostseeküste 2100 erläutert. Morphologische Auswertungen konnten in den Beitrag nicht aufgenommen werden, da die relevanten Daten zu Redaktionsschluss noch nicht vorlagen.

Schlagwörter

Ostsee, Sturmflut, Hydrologie

Summary

The 2023 Baltic Sea storm surge was the strongest storm surge event in more than 100 years in large parts of Schleswig-Holstein's Baltic Sea coast. The water level and sea conditions that occurred are compared with the existing planning bases and statistically classified. As a result, the recurrence interval of the impact with regard to the water level and the impact variable relevant for the coastal defences, combined impact water level and waves, is to be assessed as less than once in 100 years.

The long-term coastal protection strategy of the state of Schleswig-Holstein is explained on the basis of the overall Baltic Sea Coast Strategy 2100. Morphological evaluations could not be included in the article, as the relevant data were not yet available at the time of going to press.

Keywords

Baltic Sea, storm surge, hydrology



1 Einleitung

Vom 19. bis 21.10.2023 traf die Ostseeküste Schleswig-Holsteins eine schwere und in den nördlicheren Landesteilen sehr schwere Sturmflut. Sie war an etlichen Küstenabschnitten die höchste Sturmflut seit der verheerenden Sturmflutkatastrophe von 1872. Nicht nur die außergewöhnlich hohen Wasserstände, sondern auch ihre Dauer und der starke Seegang führten insbesondere an den nach Osten ausgerichteten Küstenabschnitten zu erheblichen Schäden. Insgesamt richtete die Sturmflut Schäden in einer Größenordnung von 200 Millionen Euro an, davon allein rund 50 Millionen Euro an Küstenschutzanlagen.

Im vorliegenden Beitrag sollen die während der Sturmflut aufgetretenen hydrologischen Verhältnisse beleuchtet und analysiert werden, um mit den vorhandenen Planungsgrundlagen abgeglichen und bewertet zu werden.

2 Planungsgrundlagen

2.1 Referenzwasserstand

Küstenschutzanlagen in der Zuständigkeit des Landes werden in Schleswig-Holstein im Allgemeinen auf ein 200-jährliches Hochwasser (HW_{200}) ausgelegt. Der global ansteigende mittlere Meeresspiegel führt dazu, dass sich auch zu erwartende Extremwasserstände verändern. Daher wird der Referenzwasserstand HW_{200} für die schleswig-holsteinische Ostseeküste alle 10 Jahre fortgeschrieben und ist in seiner gültigen Form mit Bezug auf das Jahr 2030 als $HW_{200,2030}$ im Generalplan Küstenschutz (MELUND 2022) veröffentlicht.

Der Referenzwasserstand stellt die wesentliche Grundlage zur Bemessung von Küstenschutzanlagen und die Erstellung von Hochwassergefahrenkarten dar. Er wird auf Grundlage eines statistischen Regionalisierungsverfahrens ermittelt (IAWG 2020). Das Verfahren besteht in Grundzügen aus den folgenden Schritten:

- Pegelbezogene Trendbereinigung der jährlichen Höchstwasserstände
- Ermittlung des pegelbezogenen, trendbereinigten mittleren Hochwassers MHW
- Bildung von Serien der relativen Hochwasserhöhe als Verhältnis jährlicher trendbereinigter Hochwasser zum mittleren trendbereinigten Hochwasser
- Ermittlung von Quantilen der Auftretenswahrscheinlichkeit der relativen Hochwasserhöhe in homogenen Regionen. Dabei wurde die gesamte Ostseeküste Schleswig-Holsteins als homogene Region identifiziert.
- Ermittlung pegelbezogener Hochwasserquantile durch Multiplikation des Quantils der relativen Hochwasserhöhe mit dem trendbereinigten mittleren Hochwasser
- Regionalisierte Interpolation entlang der schleswig-holsteinischen Ostseeküste. Abschließende Aufrundung auf volle 5 cm für zusammenhängende Küstenabschnitte

Das Ergebnis ist in Abbildung 1 dargestellt. Die statistische Einordnung der während der Sturmflut aufgetretenen Wasserstände kann durch einen Abgleich mit den regionalisierten Referenzwasserständen vorgenommen werden.

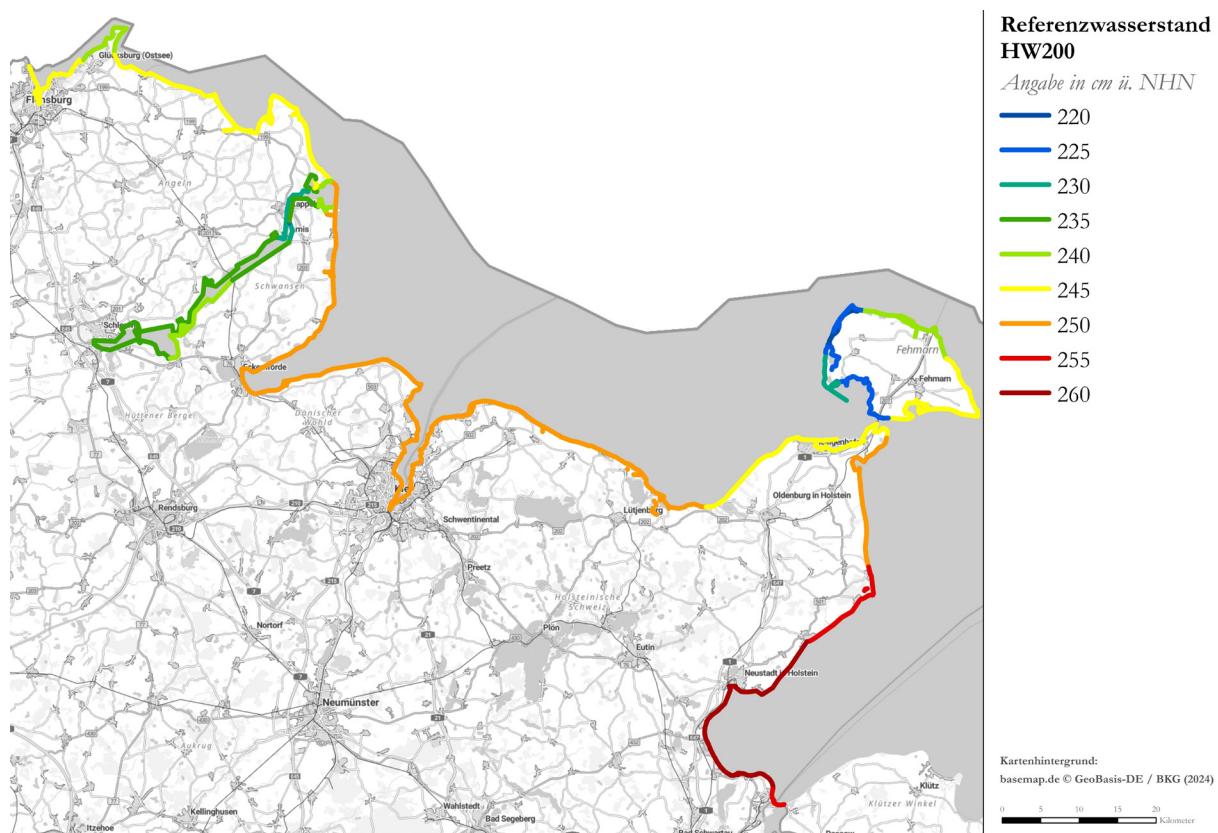


Abbildung 1: Referenzwasserstand HW_{200,2030}.

2.2 Hochwassergefahrenkarten

Die EG-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie verpflichtet zur Erstellung von Hochwassergefahren- und -risikokarten. Diese sind unter www.schleswig-holstein.de/hochwasserkarten veröffentlicht.

In der Darstellung der Hochwassergefahr durch ein Extremeszenario (200-jährliches Hochwasser mit Deichbruch) werden in Schleswig-Holstein die folgenden Schutzkategorien unterschieden (vgl. Abbildung 2):

- Gebiete ohne technischen Hochwasserschutz
- Eingeschränkt geschützte Gebiete: Gebiete, die durch Regionaldeiche oder sonstige Hochwasserschutzanlagen geschützt werden, deren Schutzwirkung im Allgemeinen nicht bekannt ist
- Ausreichend geschützte Gebiete: Gebiete, die durch einen Landesschutzdeich oder eine sonstige Hochwasserschutzanlage geschützt werden, die ein einem Landesschutzdeich vergleichbares Schutzniveau aufweist (HW₂₀₀)

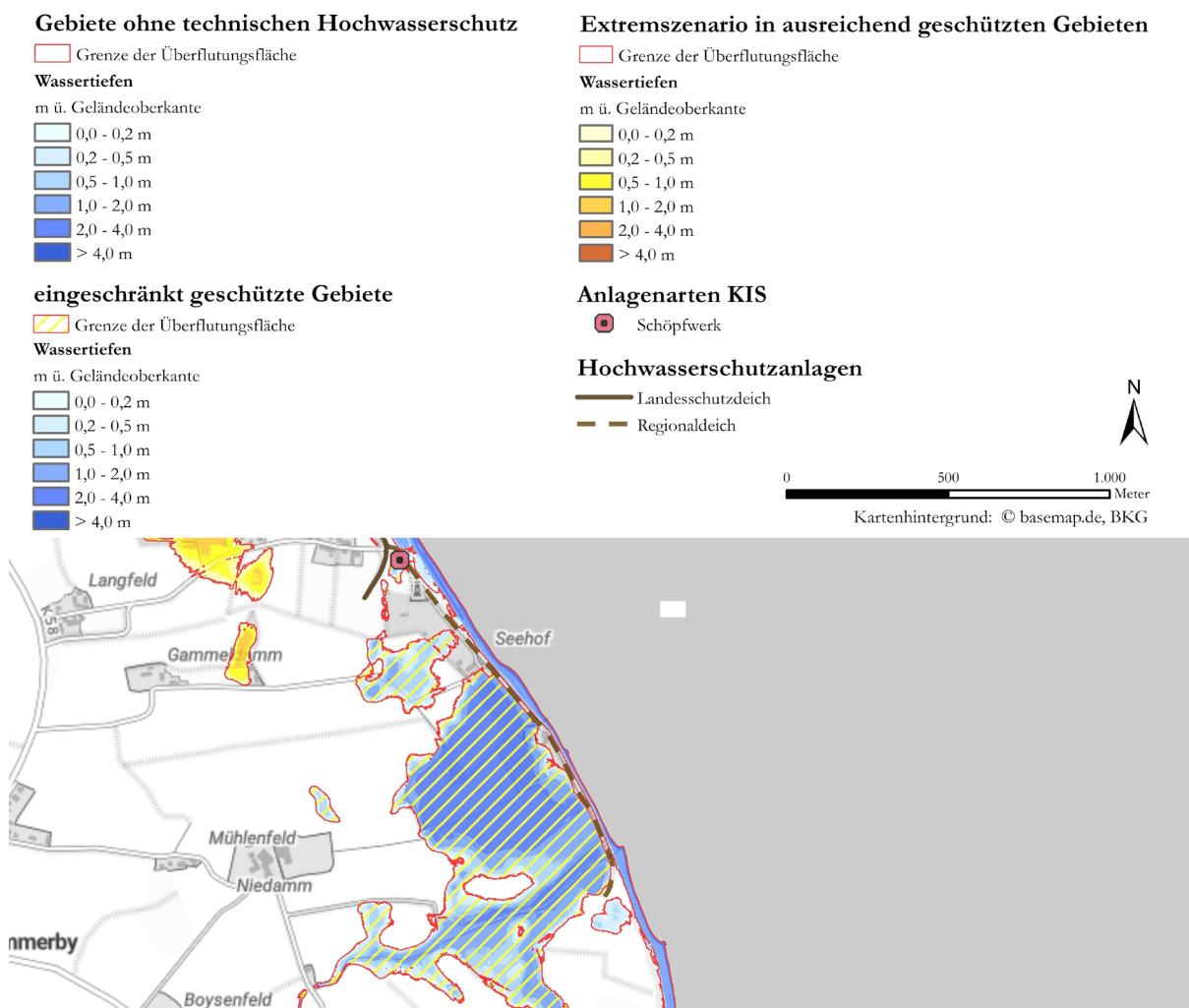


Abbildung 2: Beispiel einer Hochwassergefahrenkarte.

Wird der lokale HW₂₀₀-Wasserstand ausgespiegelt, erstrecken sich die Gebiete ohne technischen Hochwasserschutz sowie die nur eingeschränkt geschützten Küstenniederungen an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste auf eine Fläche von etwa 150 km². Davon werden ca. 41 % (61 km²) durch Regionaldeiche oder sonstige Hochwasserschutzanlagen unterschiedlicher Bemessung geschützt. Zusätzlich sind die Gebiete mit ausreichendem Hochwasserschutz zu betrachten. Landesschutzdeiche sowie Schutzanlagen mit einem mit den Landesschutzdeichen vergleichbaren ausreichenden Schutzstandard schützen bei Ausspiegelung des lokalen HW₂₀₀-Wasserstands an der Ostseeküste eine Fläche von etwa 138 km².

Landseitig der ca. 47 km Regionaldeiche an der Ostseeküste lassen sich durch eine Verschneidung mit der HW₂₀₀-Kulisse 1578 Einwohner ermitteln, die von einer direkten Überflutung betroffen wären. Teilweise wird ebenfalls die Zuwegung zu auf Höheninseln gelegenen Wohnlagen geschützt, was eine mittelbare Gefährdung darstellen kann. Gemäß Generalplan Küstenschutz 2022 (MELUND 2022) befinden sich landseitig dieser Deiche insgesamt Sachwerte in einer Höhe von 832 Mio. €.

3 Hydrologie

3.1 Wasserstand

Bereits am 18.10.2023 baute sich ein Hochwasser an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste auf. Im Verlauf des 19.10.2023 wurden Sturmflutwasserstände von mehr als 1 m über dem mittleren Wasserstand erreicht. Die Scheitelwerte wurden am 20.10.2023 in den Abendstunden und der Nacht zum 21.10.2023 erreicht. Dabei wurde oft die Schwelle zur sehr schweren Sturmflut (mehr als 2 m über mittlerem Wasserstand) überschritten (Tabelle 1).

Tabelle 1: Sturmflutwasserstände und deren statistische Einordnung.

Pegel	PNP [cm NHN]	Wasser- stand [cm NHN]	MW 2011-2020 [cm NHN]	Wasserstand [cm ü MW]	Sturmflut- kategorie	Statistische Einordnung
Flensburg	-500	227	5	222	sehr schwer	HW ₅₀ -HW ₁₀₀
Langballigau	-502	220	6	214	sehr schwer	HW ₅₀ -HW ₁₀₀
LT Kalkgrund	-498	209	7	202	sehr schwer	HW ₂₀ -HW ₅₀
Schleimünde	-500	207	4	203	sehr schwer	HW ₂₀ -HW ₅₀
Schleswig	-502	229	6	223	sehr schwer	HW ₁₀₀ -HW ₂₀₀
Eckernförde	-500	215	5	210	sehr schwer	HW ₂₀ -HW ₅₀
LT Kiel	-499	194	4	190	schwer	< HW ₂₀
Kiel Holtenau	-500	195	4	191	schwer	< HW ₂₀
Lippe	-501	184	6	178	schwer	< HW ₂₀
Weißenhaus	-500	171	15	156	schwer	< HW ₂₀
Heiligenhafen	-500	172	6	166	schwer	< HW ₂₀
Marienleuchte	-500	166	5	161	schwer	< HW ₂₀
Neustadt	-502	178	7	171	schwer	< HW ₂₀
Travemünde	-502	177	7	170	schwer	< HW ₂₀
Lübeck Bauhof	-502	179	9	170	schwer	-

Die höchsten Wasserstände traten im nördlichen Teil der schleswig-holsteinischen Ostseeküste zwischen Flensburg und Eckernförde auf. Der höchste Wasserstand wurde in der Schlei am Pegel Schleswig mit 2,29 m NHN gemessen, was 2,23 m über dem mittleren Wasserstand entspricht. Südlich von Eckernförde wurden niedrigere Wasserstände von unter 2,00 m NHN bzw. unter 2,00 m über dem Mittelwasser erreicht, die aber an allen Pegeln bis zur Grenze zu Mecklenburg-Vorpommern als schwere Sturmflut einzustufen sind.

Nach Mitternacht am 21.10.2023 sanken die Wasserstände bis zur Mittagszeit relativ schnell unter Sturmflutniveau ab, an der Schlei dauerte es wegen des verzögerten Abflusses etwas länger (Abbildung 3).

Durch die Ostwinde bedingt, gab es in der Elbe und an der deutschen Nordseeküste eine Sturmebbe.

Neben der Höhe der Sturmflutwasserstände stellte auch ihre außergewöhnlich lange Dauer eine starke Belastung für die Küstenschutzanlagen dar.

In Flensburg wurde ein Wasserstand von 1 m NHN 52 Stunden und von 2 m NHN 9 Stunden überschritten, in Schleswig betrug die Verweilzeit sogar 62 Stunden über 1 m NHN und 16 Stunden über 2 m NHN.

Eine Zusammenstellung der Verweilzeiten an den Pegeln der schleswig-holsteinischen Ostseeküste findet sich in Tabelle 2

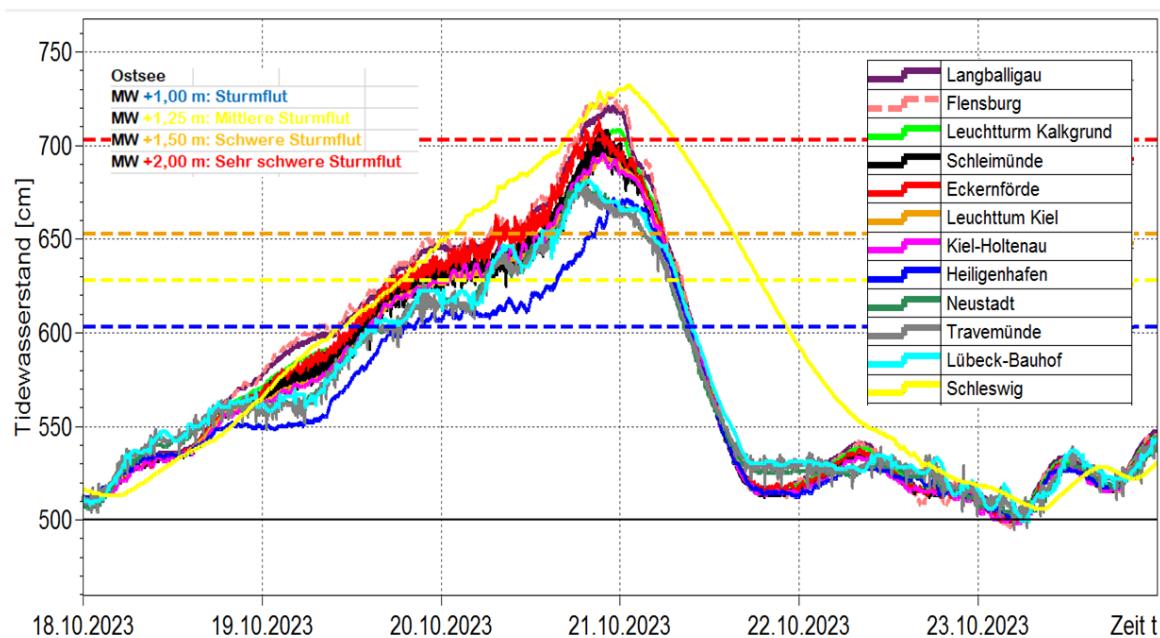


Abbildung 3: Wasserstandsganglinien an Pegeln der schleswig-holsteinischen Ostseeküste.

Tabelle 2: Überschreitungsdauer relevanter Wasserstände.

Pegel	Überschreitungsdauer [h] 1,00 m NHN	Überschreitungsdauer [h] 1,25 m NHN	Überschreitungsdauer [h] 1,5 m NHN	Überschreitungsdauer [h] 1,75 m NHN	Überschreitungsdauer [h] 2,00 m NHN	Überschreitungsdauer [h] 2,25 m NHN
Flensburg	52	40	32	14	9	1
Langballigau	51	40	25	14	8	-
LT Kalkgrund	45	37	17	10	4	-
Schleimünde	45	37	18	12	4	-
Schleswig	62	50	40	29	16	7
Eckernförde	47	40	26	13	6	-
LT Kiel	44	33	16	9	-	-
Kiel Holtenau	44	34	17	10	-	-
Lippe	43	31	15	7	-	-
Weissenhaus	39	21	11	-	-	-
Heiligenhafen	41	17	10	-	-	-
Marienleuchte	38	18	9	-	-	-
Neustadt	43	26	14	4	-	-
Travemünde	43	34	16	3	-	-
Lübeck Bauhof	45	35	16	4	-	-

Tabelle 3: Wasserstandsscheitel während bedeutender Sturmfluten der Vergangenheit (orange: höchstes gemessenes Ereignis; gelb: zweithöchstes gemessenes Ereignis; hellgelb: dritthöchstes gemessenes Ereignis).

	10.02. 1625	10.01. 1694	13.11. 1872	31.12. 1904	09.01. 1908	31.12. 1913	04.01. 1954	30/31.12. 1978	15.02. 1979	04.11. 1995	01/02.11. 2006	04/05.01. 2017	02.01. 2019	20/21.10. 2023
	W [cmNHN]	W [cmNHN]	W [cmNHN]	W [cmNHN]	W [cmNHN]	W [cmNHN]	W [cmNHN]							
Lübeck	280	290	338	222	197	206	208		143	187	199	178	179	177
Travemünde	280		330	218	187	200	202		137	181	186	173	171	173
Neustadt			282	203			185		134	178	176	173	175	174
Marienleuchte				187	137	183	160			189	163	157	164	166
Heiligenhafen							174		135	154	185		162	170
Kiel			297	225	183	190	180	168	190	199	166	162	159	195
Eckernförde			315	212	162		175	163	183	198	167	170	164	215
Schleimünde			321	211			160	151		182	163	164	158	207
Schleswig			325				182	170			148		124	105
Langballigau								170	157	182	185	170	170	162
Flensburg		270	308	223	157	167	172	164	180	185	172	179	168	227

Die aufgetretenen Maximalwasserstände werden in Tabelle 3 mit den Wasserständen während bedeutender Sturmfluten der Vergangenheit verglichen. Farblich gekennzeichnet sind die jeweils höchsten, zweit- und dritthöchsten aufgetretenen Wasserstände seit Aufzeichnungsbeginn. Diese Einordnung ist durch die Länge der jeweils zur Verfügung stehenden Zeitreihe beeinflusst. An keinem der Pegel wurde der Wasserstand der Ostseesturmflut vom 13.11.1872 erreicht. Eine weitere bedeutende Sturmflut fand am 31.12.1904 statt, die an vielen Pegeln die zweithöchste bisher registrierte Sturmflut darstellt. Bemerkenswert ist, dass an den Pegeln Eckernförde und Flensburg der Sturmflutscheitelwasserstand 2023 höher ausfiel als bei der Sturmflut 1904 und dieses Ereignis somit das höchste seit mehr als 150 Jahren darstellt.

3.2 Seegangsmessungen

Der LKN.SH hatte zum Zeitpunkt der Sturmflut keine Wellenmessbojen in der Ostsee betrieben. Daher liegen keine eigenen Messdaten zu diesem Ereignis vor.

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) führt im Zuge des Ausbaus der Oststrecke des Nordostseekanals ein Monitoring in der Kieler Bucht nördlich der Untiefe Stollergrund durch. Dabei wird u. a. auch der Seegang gemessen. Die Messpositionen sind in Abbildung 4 dargestellt. Bei den Messwerten handelt es sich um ungeprüfte Rohdaten.

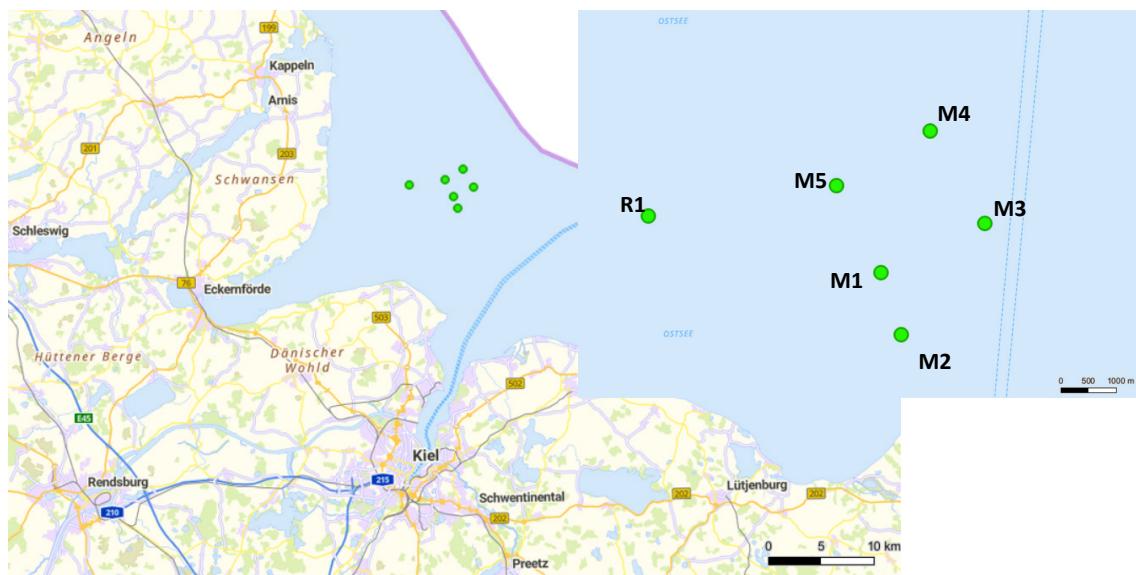


Abbildung 4: Lage der Seegangsmessstationen.

Während der Sturmflut wurden an den Messpositionen signifikante Wellenhöhen von 2,0 bis 2,5 m aufgezeichnet, die über einen Zeitraum von über 24 Stunden anhielten. An der Messposition M5 traten sogar signifikante Wellenhöhen bis zu 2,9 m auf (siehe Abbildung 5). Es kam bei diesem Ereignis teils zu Aufzeichnungsfehlern der Wellensensoren.

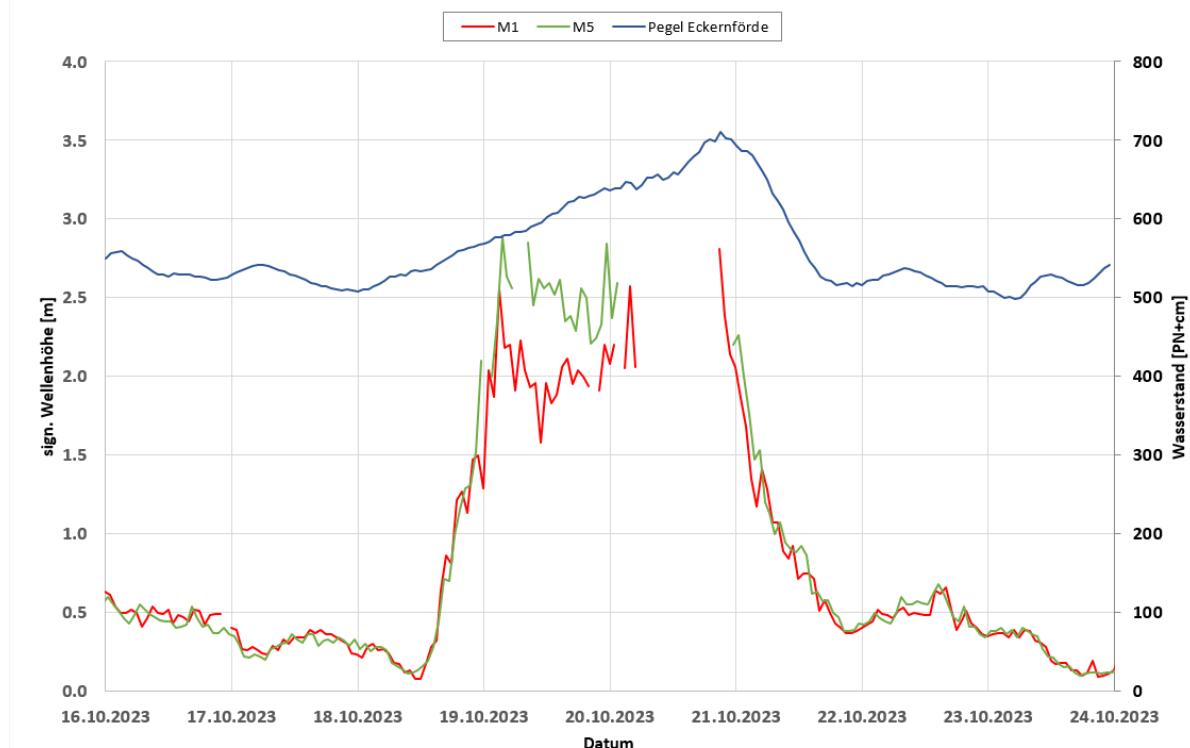


Abbildung 5: Signifikante Wellenhöhe an den Stationen M1 und M5.

3.3 Abschätzung Seegangsbedingungen

Zur Abschätzung der Seegangsbelastung stehen nur wenig Messdaten zur Verfügung (siehe Kapitel 3.2). Die verfügbaren Daten weisen zudem gerade während des Zeitraums maximaler Wasserstände Lücken auf.

Um dennoch einen Eindruck über die flächenhafte Seegangsbelastung zu erhalten, wurde mit der Software StatWave auf Grundlage von gemessenen Windgeschwindigkeiten und -richtungen Seegangsparameter berechnet.

Beispielhaft sind in Abbildung 6 die Ergebnisse für einige küstennahe Berechnungspunkte dargestellt, die sich in einem Abstand von weniger als 500 Metern von der Küste befinden. Das zugrundeliegende Modell liefert Daten bis an den Übergangsbereich von Tief- zu Flachwasser.

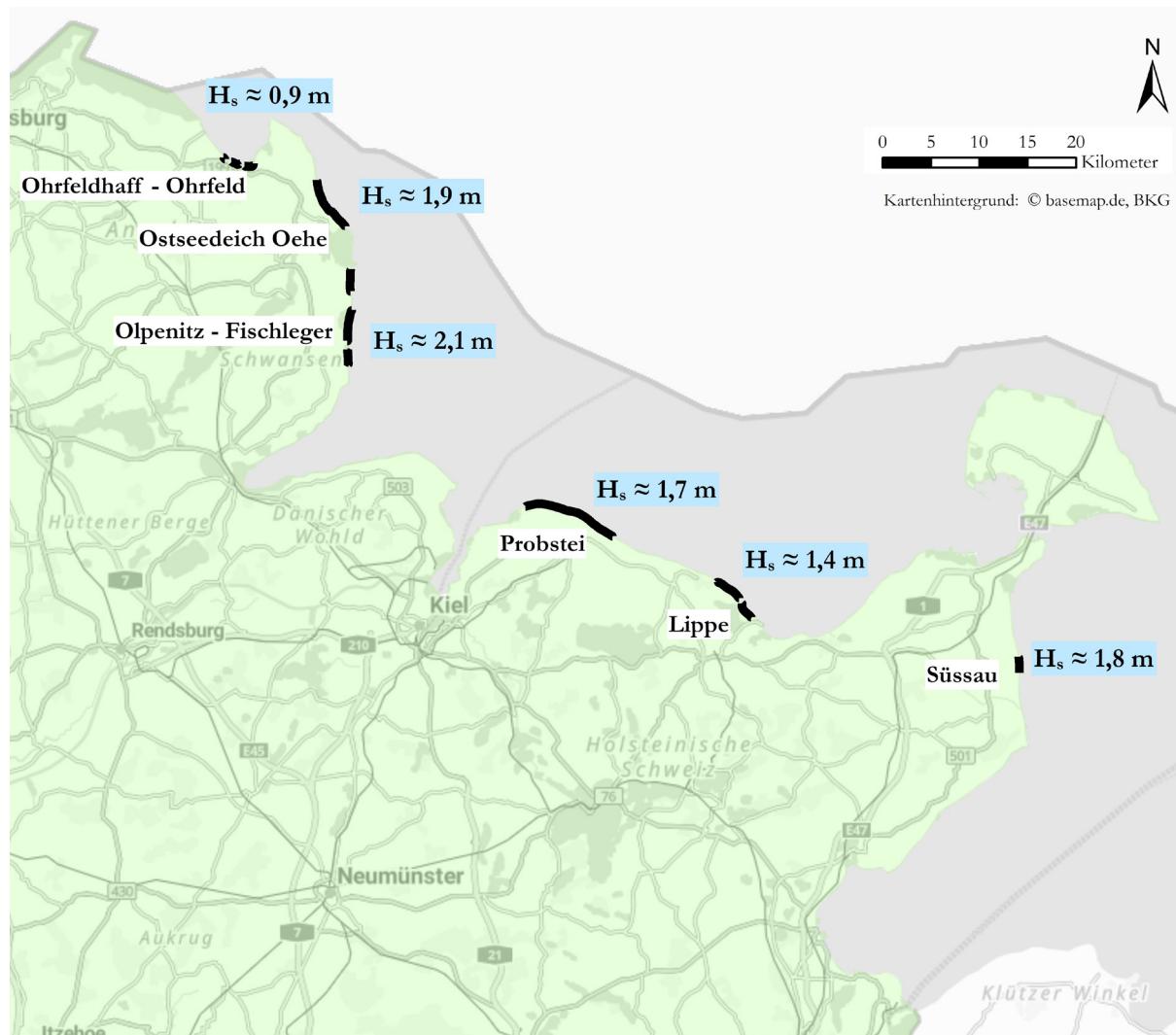


Abbildung 6: Abschätzung H_s gemäß StatWave im küstennahen Bereich, der Deich in der Probstei ist ein Landesschutzdeich, die übrigen sind Regionaldeiche.

4 Belastungen der Küstenschutzbauwerke

Die Küstenschutzbauwerke wurden während der Sturmflut im Wesentlichen durch die lang anhaltenden erhöhten Wasserstände sowie je nach Expositionsrichtung im unterschiedlichen Maße durch den auftretenden Seegang belastet. Einzelne Bauwerke wurden aufgrund ihrer zu geringen Höhe überströmt.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die vorhandenen Grundlagen zur Einordnung des Sicherheitsstandards der Küstenschutzanlagen beschrieben und der Versuch unternommen, diesen im Kontext der während der Ostseesturmflut 2023 aufgetretenen Belastungen einzuordnen.

4.1 Sicherheitsstandard Küstenschutzanlagen

Der Zustand der Küstenschutzanlagen an der Ostsee ist sehr heterogen. Die Landesschutzeiche werden wie an der Nordsee auf ein 200-jährliches Ereignis ausgelegt. Bei Regionaldeichen ist der Sicherheitsstandard sehr unterschiedlich: Es finden sich Anlagen, die ursprünglich Strandwälle waren und in ihrem Aufbau daher nicht dem eines Landeschutzeichs entsprechen, oder solche, bei denen die Deichkrone größere Lunken aufweisen kann.

Mit dem Generalplan Küstenschutz Schleswig-Holstein 2022 (MELUND 2022) hat das Land Schleswig-Holstein eine Sicherheitsüberprüfung der Regionaldeiche an der Ostseeküste durchgeführt und den vorhandenen Sicherheitsstandard der Anlagen bewertet. Hierbei wurde untersucht, wie häufig mit dem Eintreten des kritischen Ereignisses von einem Wellenüberlauf $q > 2 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{m})$ zu rechnen ist. Die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit des kritischen Ereignisses ist methodisch komplex, da zwischen dem Auftreten von hohen Wasserständen und hohem Seegang eine bedingte Abhängigkeit besteht, die eine Beschreibung über Copulamodelle erforderlich macht (Saathoff 2021).

Der in der Sicherheitsüberprüfung verwendete Ansatz berücksichtigt nicht die bauliche Qualität oder den Unterhaltungszustand der Anlagen.

Die Ergebnisse der Sicherheitsüberprüfung wurden nach dem Wiederkehrintervall des Auftretens des kritischen Ereignisses klassifiziert. Das Ergebnis ist in Abbildung 7 dargestellt, eine umfassendere Beschreibung findet sich im Generalplan Küstenschutz (MELUND 2022) und im Fachplan Küstenschutz Ostsee.

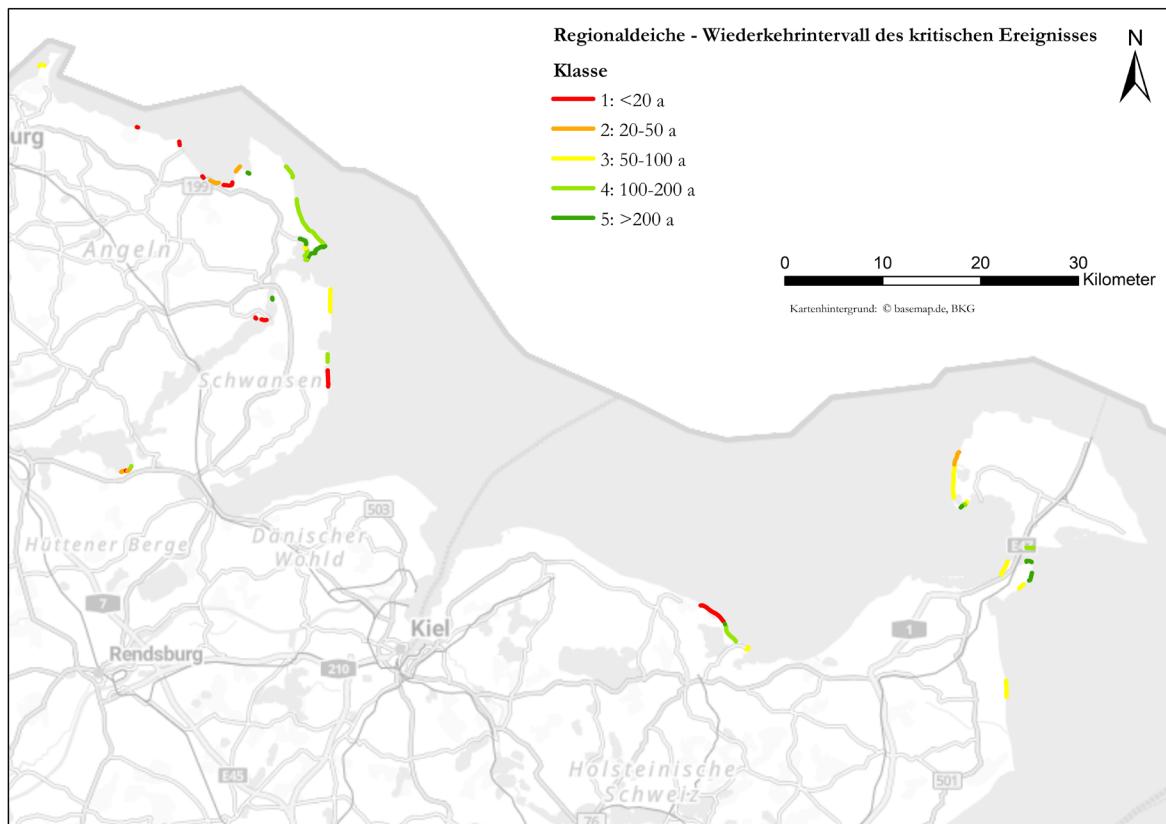


Abbildung 7: Sicherheitsüberprüfung Regionaldeiche Ostseeküste – Wiederkehrintervall des kritischen Ereignisses mit Wellenüberlauf $q > 2\text{ l}/(\text{s*m})$.

4.2 Statistische Einordnung der aufgetretenen Kombination von Wasserstand und Seegangsbelastung

Im Rahmen der Sicherheitsüberprüfung der Regionaldeiche wurde davon ausgegangen, dass der maximale Seegang und der maximale Wasserstand nicht zeitgleich auftreten. Daher wurde eine kombinierte Wahrscheinlichkeit aus Wasserstand und dazugehörigem Seegang ermittelt.

Für die statistische Einordnung der Sturmflut vom Oktober 2023 werden zwei Kombinationen betrachtet, da der Zeitpunkt des maximalen Wasserstands und der Zeitpunkt der maximalen Seegangshöhe nicht identisch sind:

- maximaler aufgetretener Wasserstand und berechneter Seegang zum selben Zeitpunkt
- maximaler berechneter Seegang und Wasserstand zum selben Zeitpunkt

Bei diesem Ereignis ergab die Abschätzung der beiden Kombinationen in etwa dieselbe Jährlichkeit. Für diejenigen Küstenabschnitte, bei denen in der Sicherheitsüberprüfung eine kritische Seegangsrichtung angesetzt wurde, wie sie im Oktober 2023 aufgetreten ist, ist in Abbildung 8 eine Abschätzung der kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeit dargestellt.

Die großen Unterschiede in der Jährlichkeit zweier ähnlich exponierter Küstenabschnitte wie Olpenitz bis Fischleger und Süssau liegen zu einem großen Teil an der unterschiedlichen Jährlichkeit des Wasserstandes. Die unterschiedlichen Werte der relativ nah

gelegenen Orte Oehe und Olpenitz liegen darin begründet, dass unterschiedlich hoher Seegang abgeschätzt wurde.

Generell gilt, dass sich der Einfluss der Wellenhöhe auf die kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeit erst ab großen Wellenhöhen spürbar bemerkbar macht.

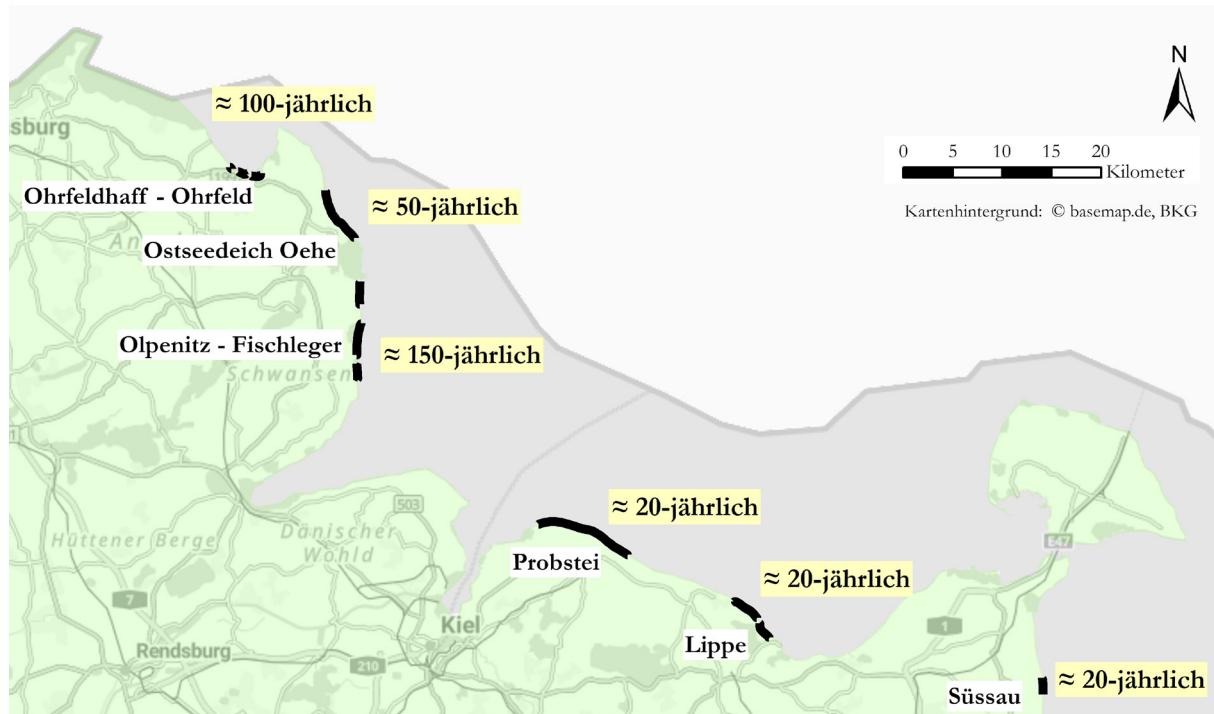


Abbildung 8: Kombinierte Jährlichkeit aus gemessenem Wasserstand und abgeschätztem Seegang an ausgewählten Küstenabschnitten.

4.3 Belastungen der Regionaldeiche

In Tabelle 4 sind die Deichabschnitte mit starken Schäden aufgeführt (Hofstede und Aufderbeck 2024). Für die Regionaldeiche Weidefeld, Damp-Fischleger und Arnis ist das naheliegend, da die hydrodynamische Belastung während der Sturmflut höher war als das im Rahmen der Sicherheitsüberprüfung errechnete kritische Ereignis.

Tabelle 4: Deiche mit schweren Schäden und deren Klassifizierung (1: Wiederkehrintervall <20 Jahre bis 5: Wiederkehrintervall >200 Jahre) im Rahmen der Sicherheitsüberprüfung (SÜP).

Deichabschnitt	Spanne Wiederkehrintervall $q \geq 21 / (s \cdot m)$	Klassifizierung im Mittel gemäß SÜP
Oehe (Maasholm)	39 – 300 a	Klasse 4: 100 – 200 a
Weidefeld (Maasholm)	14 – 159 a	Klasse 3: 50 – 100 a
Damp Fischleger	8 – 9 a	Klasse 1: <20 a
Arnis	5 – 9 a	Klasse 1: <20 a

Die hohen Schäden am Regionaldeich Oehe erklären sich dadurch, dass die lange Verweildauer hoher Wasserstände mit der damit einhergehenden starken Seegangsbelastung wie auch der konstruktive Aufbau und Unterhaltungszustand der Anlage bei der Sicherheitsüberprüfung unberücksichtigt bleibt. Darüber hinaus gibt es auch zwei längere Abschnitte, an denen ein signifikanter Wellenüberlauf von $21 / (s \cdot m)$ deutlich häufiger als im Mittel der

Gesamtanlage auftritt, wie aus Abbildung 9 zu erkennen ist. Allerdings wurden diese Bereiche bei der Inaugenscheinnahme nicht explizit als Bereiche mit besonders hohen Schäden angesprochen (Aufderbeck 2024).

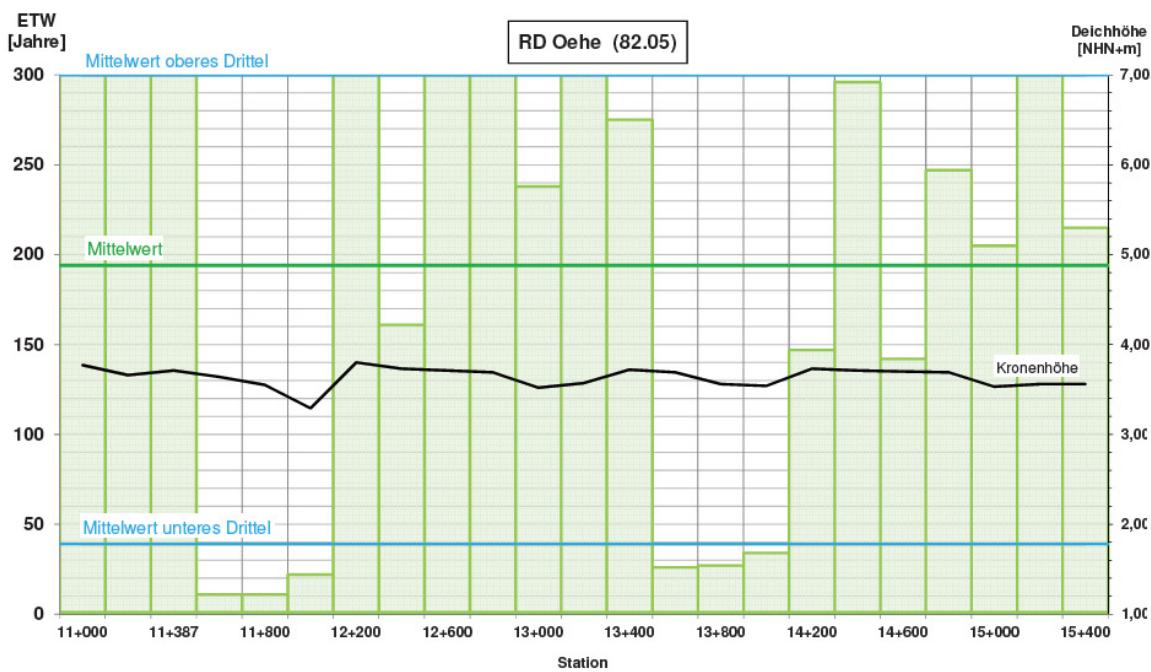


Abbildung 9: Wiederkehrintervall des kritischen Wellenüberlaufs $q > 2 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{m})$ am Regionaldeich Oehe (Abschnitt 82.05). Mittelwerte beziehen sich auf den gesamten Abschnitt.

Dafür weisen einige Deiche keine Schäden auf, obwohl das Wiederkehrintervall des kritischen Ereignisses mit häufiger als einmal in 20 Jahren eingeschätzt wurde (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Deiche ohne Schäden trotz Klassifizierung 1 (Wiederkehrintervall < 20 Jahre) im Rahmen der Sicherheitsüberprüfung (SÜP).

Deichabschnitt	Klassifizierung gemäß SÜP
Behrendorf	1
Watestelle (Arnis)	1
Fleckby (Mitte)	1
Ohrfeldhaff	1

Das Ereignis vom Oktober 2023 lässt Rückschlüsse auf die Plausibilität der Sicherheitsüberprüfung zu. Durch den in der Sicherheitsüberprüfung bewusst konservativ gewählten Ansatz, vorgelagerte Strandwälle wie z. B. in Behrensdorf nicht zu berücksichtigen, wurde der Sicherheitszustand schlechter eingeschätzt, als er sich real verhalten hat. Die Regionaldeiche Watestelle (Arnis), Fleckby (Mitte) und Ohrfeldhaff zeigten zwar wegen fehlender Belastung durch Seegang keine Schäden auf, wurden aber durch ihre sehr geringe Höhe überströmt und versagten deshalb trotzdem (Hofstede und Aufderbeck, dieses Heft). Es zeigt sich auch, dass die an der Ostsee besonders relevanten Belastungsfaktoren wie Verweilzeit und die damit verbundene Dauer der Seegangsbelastrung nicht in die Bewertung eingehen und künftig besser berücksichtigt werden sollten. Es sollte überlegt werden, in die Bewertung zusätzlich den baulichen Zustand der Anlagen einfließen zu lassen. Dieser war grundsätzlich bekannt, wurde aber nicht explizit in die Bewertung einbezogen.

5 Morphologische Veränderungen durch die Sturmflut

Die Erfassung morphologischer Veränderungen an den Küsten und im Küstenvorfeld erfolgt seitens des LKN.SH durch Laserdaten, die flugzeuggestützt flächendeckend erhoben werden. Dazu wird das Verfahren der Laserbathymetrie eingesetzt, bei dem ein Laser mit rotem Laserlicht trockene Bereiche und zeitgleich mit grünem Laserlicht Flachwasserbereiche in Abhängigkeit von der Trübung des Wasserkörpers erfasst. Für den Bereich der Ostseeküste werden Tiefen von etwa 3 bis 5 Meter erreicht.

Die regelmäßige Erfassung der schleswig-holsteinischen Küstenbereiche der Nord- und Ostsee erfolgt auf Grundlage eines Vermessungskonzeptes alle 6 Jahre, in morphologisch dynamischeren Gebieten alle 3 Jahre, wie an der Ostseeküste im Bereich Schleimünde und der nördliche Bereich Fehmarns. Die aktuellste Erfassung der gesamten Ostseeküste erfolgte 2021/2022.

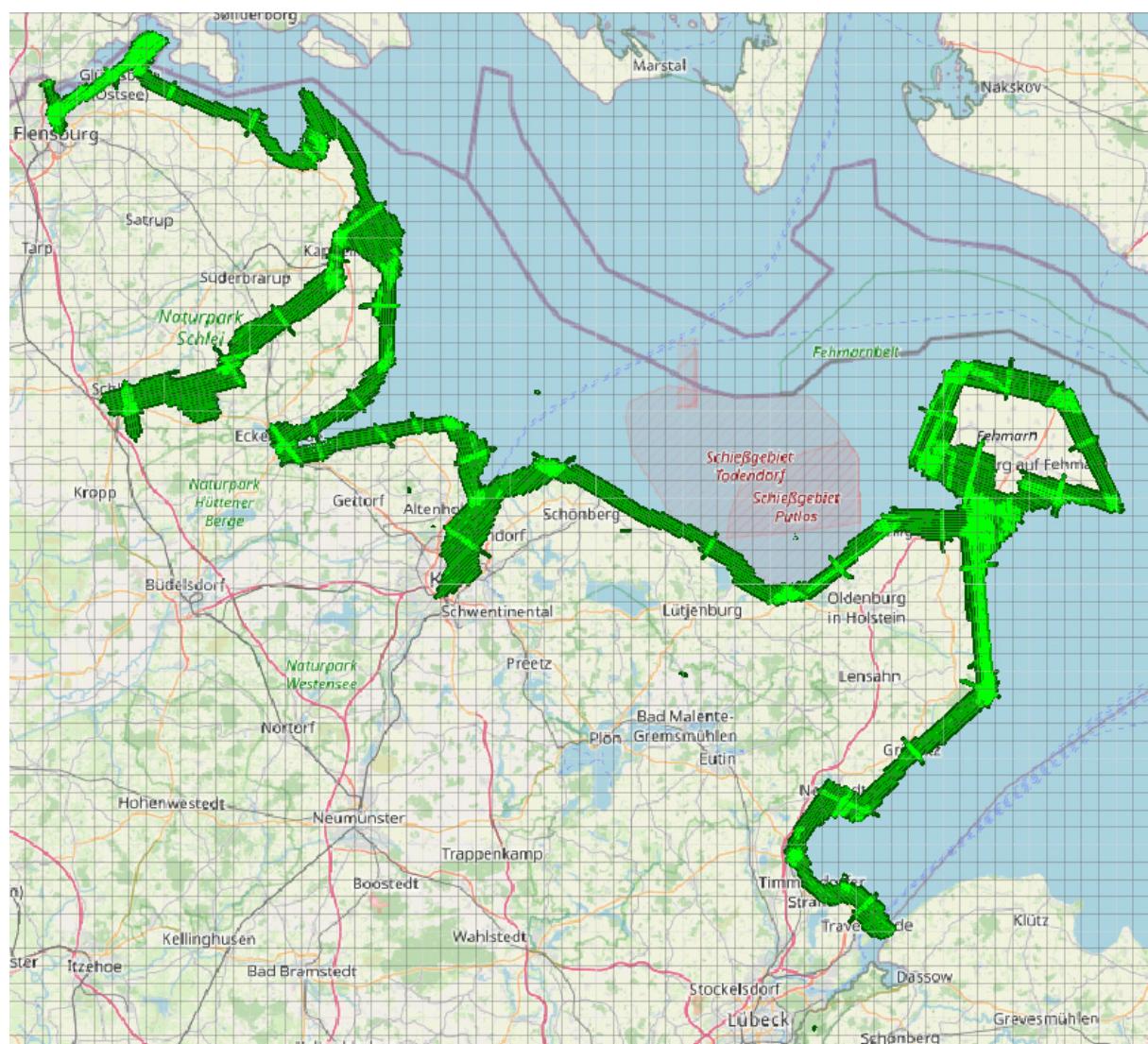


Abbildung 10: Flugstreifen Laserscanbefliegung 2024.

Um die morphologischen Veränderungen nach der Sturmflut von Oktober 2023 ermitteln zu können, wurde im Januar 2024 eine Gesamtbeifliegung beauftragt, die aufgrund der Wetter- und Trübungsbedingungen an der Ostsee erst im August 2024 durchgeführt werden konnte.

Aufgrund der Dauer für die Auswertung und Qualitätssicherung der Daten mit einer Gesamtfläche von rund 550 km² sind die Ergebnisse der morphologischen Veränderungen in diesem Beitrag nicht enthalten.

Sie werden voraussichtlich in 2025 im Fachplan Küstenschutz Ostsee (LKN 2024) veröffentlicht.

6 Küstenschutzstrategien

6.1 Gesamtstrategie Ostseeküste

Bereits nach der Sturmflut 2019 hat die Landesregierung beschlossen, die Herausforderungen, die sich aus häufigeren und höheren Sturmfluten ergeben, systematisch in einem Projekt anzugehen, das sowohl die Grundlagen erforscht als auch Handlungsempfehlungen entwickelt. Die Handlungsfelder Küstenschutz, Naturschutz und Tourismus sollten dabei gemeinsam betrachtet werden, um ganzheitliche und nachhaltige Lösungen zu entwickeln. Diese sollen sich in die Gesamtstrategie „Entwicklung Ostseeküste 2100“ einfügen. Bis Ende 2023 wurden in mehreren Forschungskooperationen mit Fachinstitutionen die wissenschaftlichen Grundlagen dafür geschaffen.

Durch die Einrichtung eines Projektbeirats, in dem die Ostseekommunen, die relevanten Verbände und die Wissenschaft vertreten waren, wurde ein regelmäßiger Informationsaustausch sichergestellt. Weiterhin konnten über den Beirat lokale Kenntnisse und Anforderungen eingebracht und entsprechend berücksichtigt werden. Ebenfalls zu diesem Zweck wurden drei Regionalkonferenzen in Süderbrarup, Eckernförde und auf Fehmarn mit dem Schwerpunkt Küstenschutz, eine Halbzeitkonferenz zum Gesamtprojekt und eine schriftliche Beteiligung der betroffenen Verbände und Kommunen zu einem Erstentwurf der Strategie durchgeführt.

Die Gesamtstrategie Ostseeküste soll im ersten Quartal 2025 veröffentlicht werden. Sie soll sich in die übergeordnete Klimaanpassungsstrategie des Landes einfügen und dabei die Anpassung an den prognostizierten Meeresspiegelanstieg an der Ostseeküste fokussieren. Weiterhin baut die Strategie auf die Landesstrategien: „Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein – Fortschreibung 2022“, „Kurs Natur 2030 - Strategie zum Erhalt der biologischen Vielfalt in Schleswig-Holstein“ (MELUND 2021) und „Tourismusstrategie Schleswig-Holstein 2030“ (MWVATT 2022) auf.

6.2 Projekt Morphologische Projektionen

Die AG Küstengeologie und Sedimentologie am Institut für Geowissenschaften der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) führte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasserbau an der TU Hamburg Harburg (TUHH) eine wissenschaftliche Studie zur morphologischen Entwicklung der Ostseeküste von Schleswig-Holstein durch. Dabei wurden sorgfältig verifizierte und validierte numerische Modelle und angepasste Naturmessungen

kombiniert, um belastbare Aussagen zum Systemverständnis der Steilküsten und zur zukünftigen morphologischen Küstenentwicklung zu treffen (Winter et al. 2023).

Der Fokus des Instituts für Wasserbau lag auf der Ermittlung der durch den Klimawandel verursachten Änderungen der Hydrodynamik. Die AG Küstengeologie und Sedimentologie fokussierte sich auf die Erfassung des IST-Zustands der Morphodynamik und die Auswirkungen der geänderten hydrodynamischen Randbedingung auf diese.

Zur Ermittlung der Auswirkungen möglicher zukünftiger Veränderungen des regionalen Meeresspiegelanstiegs sowie der lokalen Windverhältnisse wurden auf Basis der definierten Zukunftsszenarien numerische Simulationen durchgeführt (Fröhle et al. 2023).

In Küstennähe kommt es aufgrund der veränderten Wassertiefen als Folge des Meeresspiegelanstiegs zu veränderten Transportkapazitäten. Im tieferen Wasser werden die Transportkapazitäten zum Teil deutlich geringer – es wird also hier zukünftig potentiell weniger Sediment transportiert. Im flacheren Wasser und im Übergang zum Strand werden die Transportkapazitäten zukünftig deutlich höher auftreten – es wird also hier zukünftig potentiell mehr Sediment transportiert (Fröhle et al. 2023).

Die kleinräumige Betrachtung am Beispiel der Fokusgebiete zeigt, dass sich die Sedimenttransportkapazitäten in küstennahen Bereichen für alle Ereignisse deutlich ändern. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die Umlagerung im Strandbereich intensiver ausfallen und die Strände zukünftig zurückweichen und bei begrenztem Hinterland möglicherweise komplett verschwinden werden (Fröhle et al. 2023).

Um die im Projekt Morphologische Projektionen zusammengetragenen umfangreichen Bestandsdaten sowie die maßgeblichen Modellergebnisse möglichst anschaulich darzustellen, wurden diese in Form eines Seegangs- und Transportatlases visualisiert. (Fröhle et al. 2023).

Als weitere Informations- und Planungsquelle wurde durch die TUHH eine Fachexpertise: „Küstenschutz der Zukunft an der Ostseeküste Schleswig-Holsteins - Wirkungen und Auswirkungen von technischen Maßnahmen und Bauwerken“ erstellt.

Als Grundlage für die numerische Modellierung wurden umfangreiche Felduntersuchungen durchgeführt. Hierbei wurde das Ziel verfolgt, anhand angepasster Messkampagnen in den ausgewählten Fokusgebieten Stohl und Heiligenhafen eine Datengrundlage für ein verbessertes Systemverständnis der Steilküsten und den Aufbau und die Evaluation von Modellsystemen zu schaffen (Winter et al. 2023). Hierzu gehörten Drohnenbefliegungen zur Aufnahme topografischer Daten, schiffsgestützte Messkampagnen, Erfassung von Videoprofilen mit Unterwasserkameras, Beprobung der Oberflächensedimente mit Van-Veen Greifer sowie die Erfassung der Wellenparameter mit Wellenmessbojen an der 10 m-Tiefenlinie im Küstenvorfeld vor Heiligenhafen (Boje 1) und Stohl (Boje 2).

6.3 Küstenerosionsatlas

Auf Grundlage der Ergebnisse aus der Forschungskooperation MorphoPro entwickelt der LKN.SH einen webbasierten Atlas der künftigen möglichen Küstenentwicklung. Ziel ist eine öffentlich zugängliche, transparente und wissensbasierte Darstellung der möglichen künftigen Gefährdung durch Küstenrückgang infolge des stärkeren Meeresspiegelanstieges.

Trotz des erfolgten Kenntniszuwachses im Rahmen des Projektes MorphoPro verbleiben große Unsicherheiten hinsichtlich der tatsächlichen künftigen Küstenentwicklung. Aus diesem Grund soll für zwei Zeithorizonte (2050 und 2100) die Bandbreite der möglichen Verlagerungen der Ufer- bzw. Steiluferoberkante an der Ostseeküste dargestellt werden.

Dabei wird für die Mitte des Jahrhunderts ein Meeresspiegelanstieg von 0,25 m, für das Ende des Jahrhunderts von 0,75 m angesetzt. Zur Einschätzung der künftigen Gefährdung werden die möglichen künftigen Ufer- bzw. Steiluferlinien mit den aktuellen Nutzungen im Küstenbereich verschnitten.

Ein erster Prototyp soll 2025 in regionalen Veranstaltungen mit dem Ziel der Einbindung und Berücksichtigung von lokaler Fachexpertise vorgestellt werden.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ostseesturmflut 2023 war in weiten Teilen der schleswig-holsteinischen Ostseeküste das stärkste Sturmflutereignis seit mehr als 100 Jahren.

Hochwassergefahrenkarten, Referenzwasserstände und Ergebnisse einer Sicherheitsüberprüfung der Regionaldeiche habe sich als wertvolle fachliche Grundlagen bewährt, um die Sturmflut und die durch sie verursachten Schäden einzuschätzen und zu bewerten.

Die Sturmflut hat aber auch offen gelegt, dass sich Verfahren zur Bewertung der Belastungen von Küstenschutzbauwerken weiterentwickeln müssen. Die Überschreitungsdauer hoher Wasserstände bleibt bislang bei der Bemessung von Küstenschutzanlagen unberücksichtigt, obwohl sie – wie sich bestätigt hat – ein sehr relevanter Belastungsfaktor ist.

Das im Rahmen der Sicherheitsüberprüfung der Regionaldeiche ermittelte Sicherheitsniveau konnte vor dem Hintergrund der Sturmflut in weiten Teilen als plausibel bestätigt werden. Es zeigte sich aber auch, dass verfahrensimmanente Ansätze wie die Vernachlässigung schützender Elemente wie Strandwälle vor dem Deich im Ergebnis das real existierende Gefahrenpotenzial nicht immer zeigen.

Die Bedeutung der Seegangsbelastung für die Küstenschutzbauwerke wurde offenbar. Daher kommt gerade an der Ostsee auch der Seegangsvorhersage eine besondere Bedeutung zu.

Noch ausstehend ist die Analyse der durch die Sturmflut hervorgerufenen morphologischen Veränderungen. Mit dem aktuell erhobenen Datensatz wird es möglich sein, die durch ein Einzereignis verursachte Erosion für die gesamte schleswig-holsteinische Ostseeküste zu ermitteln und mit dem langjährigen mittleren Rückgang zu vergleichen. Diese Arbeit steht noch aus und wird nach Abschluss voraussichtlich in 2025 im Fachplan Küstenschutz Ostsee veröffentlicht werden.

8 Literaturverzeichnis

Aufderbeck, J.: Ostseesturmflut – Ergebnis der Inaugenscheinnahme der Regionaldeiche. Bericht des Landesbetriebes für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz, 2024.

Fröhle, P. et al.: Ostseeküste 2100: Untersuchungen zur aktuellen und zukünftigen Entwicklung der Hydrodynamik und der Morphodynamik der Ostseeküste Schleswig-Holsteins, Teilprojekt WB-TUHH. Abschlussbericht, unveröffentlicht, 2023.

Hagen, R.; Plüß, A.; Ihde, R.; Freund, J.; Dreier, N.; Nehlsen, E.; Schrage, N.; Fröhle, P.; Kösters, F.: An integrated marine data collection for the German Bight – Part 2: Tides, salinity and waves (1996–2015). In: Earth syst. scie. data 13, 2573–2594, 2021.

Hofstede, J.; Aufderbeck, J.: Die Ostseesturmflut in Oktober 2023: Schäden an Küstenschutzanlagen und Konsequenzen für den Küstenschutz in Schleswig-Holstein. In: Die Küste, 94, 2024.

IAWG: Regionalisierung der statistischen Sturmflutwasserstände an der West- und Ostküste Schleswig-Holsteins - Nachführung 2018/2019/2020; unveröffentlichter Bericht, 2020.

LKN: Fachplan Küstenschutz Ostsee; schleswig-holstein.de/DE/landesregierung/themen/kueste-wasser-meer/kuestenschutz-fachplaene/kuestenschutz-fachplaene_node.html, 2024.

MELUND: Kurs Natur 2030. <https://www.schleswig-holstein.de/DE/landesregierung/themen/umwelt-naturschutz/biodiversitaetsstrategie>, 2021.

MELUND: Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein – Fortschreibung 2022. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein, Kiel, 2022.

MWVATT: Tourismusstrategie 2030. https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/T/tourismus/sp_tourismus_tourismusstrategie, 2022.

Saathoff, F.: Ergänzende Untersuchungen zur Berechnung von kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten der Bemessungsgrößen Wasserstand und Wellenhöhe für die Regionaldeiche und sechs Hochwasserrisikogebiete an der Ostküste von Schleswig-Holstein. Unveröffentlichter Bericht, Universität Rostock, 2021.

Winter, C. et al.: Kooperationsvorhaben Ostseeküste 2100: Untersuchungen zur aktuellen und zukünftigen Entwicklung der Hydrodynamik und Morphodynamik der Ostseeküste Schleswig-Holsteins. Abschlussbericht, unveröffentlicht, 2023.

Die Ostseesturmflut im Oktober 2023: Schäden an Küstenschutzanlagen und Konsequenzen für den Küstenschutz in Schleswig-Holstein

Jacobus Hofstede¹ und Jan Aufderbeck²

¹ Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur des Landes Schleswig-Holstein; jacobus.hofstede@mekun.landsh.de

² Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz

Zusammenfassung

Vom 19.10. bis zum 21.10.2023 wurde die Ostseeküste von Schleswig-Holstein von einer schweren bis sehr schweren Sturmflut heimgesucht. Die sehr hohen Wasserstände haben in Kombination mit zwei Tagen andauerndem Sturmseegang gravierende Schäden an öffentlichen und privaten Infrastrukturen verursacht. Die Küstenschutzanlagen unterlagen extremen hydraulischen Belastungen. Während die Landesschutzdeiche die Sturmflut gekehrt haben, versagten acht von insgesamt 35 Regionaldeiche infolge von Deichbrüchen, Überlauf und Umströmung. An 10 Regionaldeichen traten mittlere bis starke Schäden auf und an 20 Regionaldeichen wurden Wiederherstellungsmaßnahmen erforderlich.

Aufgrund einer Analyse der Folgen der Oktoberflut 2023 lassen sich die nachfolgenden für den künftigen Küstenschutz an der Ostseeküste von Schleswig-Holstein relevanten Schlussfolgerungen ableiten. Die Sturmflut hat zu starken Schäden an und Versagen von Regionaldeichen an der Festlandsküste geführt. Sie sind – bis auf wenige Ausnahmen – nicht auf eine solche Sturmflut ausgelegt. Für die bisher für die Regionaldeiche an der Festlandsküste zuständigen kleinräumig strukturierten Wasser- und Bodenverbände stellt die langfristige Gewährleistung eines adäquaten Küstenhochwasserschutzes, insbesondere der dichter besiedelten Küstenniederungen, eine enorme finanzielle und personelle Herausforderung dar. Schließlich hat die Sturmflut in mehreren bisher ungeschützten Küstenorten zu größeren Überflutungen und signifikanten Schäden geführt. Ohne Schutzmaßnahmen werden die Schadenserwartungen in diesen Küstenorten infolge des stärkeren Meeresspiegelanstieges im Vergleich zum ruralen Bereich überproportional steigen. Als wesentliche Konsequenz der Oktoberflut 2023 hat das Land angeboten, auf Antrag die Zuständigkeit für den Küstenhochwasserschutz in dichter besiedelten Küstenniederungen, die aktuell durch Regionaldeiche geschützt werden, zu übernehmen. Der Landesfokus liegt dabei auf dem Schutz von Siedlungen im übergeordneten öffentlichen Interesse.

Schlagwörter

Sturmflut, Schleswig-Holstein, Ostseeküste, Küstenschutz

Summary

From October 19 to October 21, 2023, a severe to very severe storm surge hit the Baltic Sea coast of Schleswig-Holstein. The extreme water levels, combined with two days of stormy seas, caused serious damage to public and private infrastructure. The coastal flood defense structures were subject to extreme hydraulic loads. While the State dikes were able to withstand the storm surge, eight of 35 regional dikes failed as a result of dike breaches, overflow and bypassing. Ten regional dikes suffered moderate to severe damage and restoration measures were required on 20 regional dikes.

Based on an analysis of the consequences of the October 2023 storm surge, the following conclusions relevant to future coastal protection on the Baltic Sea coast of Schleswig-Holstein can be drawn. The storm surge caused severe damages to and failure of regional dikes on the mainland coast. With a few exceptions, they are not designed to withstand such a storm surge. For the small Water and Soil Associations that are responsible for the regional dikes on the mainland coast, ensuring long-term, adequate coastal flood protection, particularly in the more densely populated coastal lowlands, represents an enormous financial and personnel challenge. Finally, the October 2023 storm surge led to flooding and significant damages in several unprotected coastal towns. Without proper flood defense measures, the damage expectations in these coastal towns due to stronger sea-level rise will increase disproportionately compared to rural areas. As a main consequence of the October 2023 flood, the state has offered to take over responsibility for coastal flood protection in densely populated coastal lowlands that are currently protected by regional dikes. The state's focus is on protecting settlements.

Keywords

Storm surge, Schleswig-Holstein, Baltic Sea coast, coastal flood defense and protection

1 Einleitung

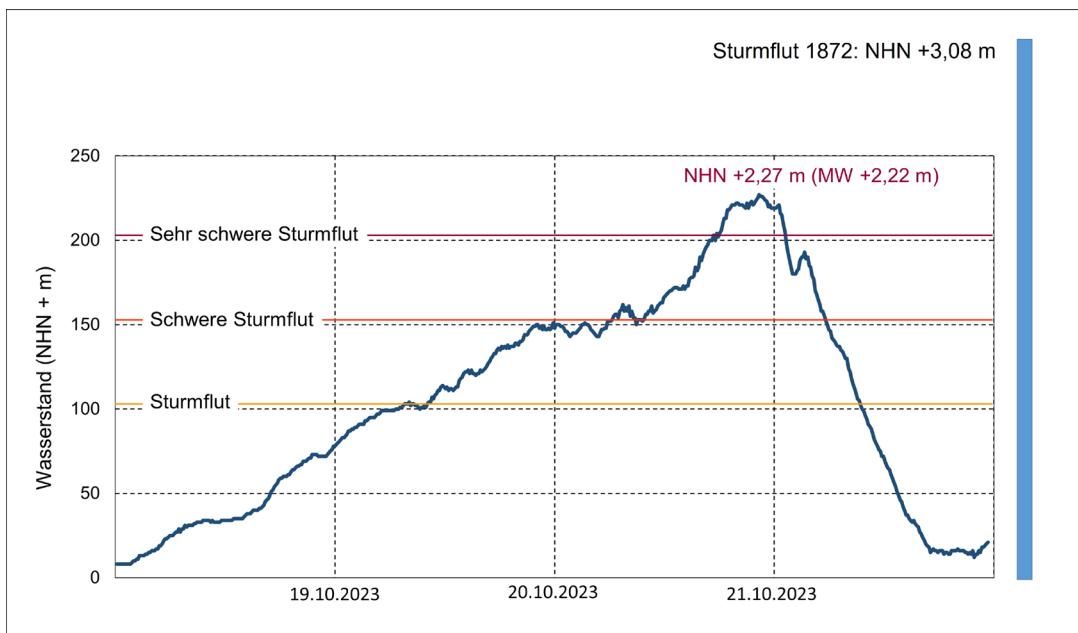


Abbildung 1: Sturmflutkurve Pegel Flensburg vom 18.10.2023 bis zum 22.10.2023. Zum Vergleich ist der Höchstwasserstand der Sturmflut von 1872 dargestellt.

Vom 19.10 bis 21.10.2023 wurde die schleswig-holsteinische Ostseeküste nach der Klassifikation des für Wasserstandsvorhersagen an den Küsten zuständigen Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrologie von einer schweren ($> 1,5$ m über mittlerem Wasserstand MW) bis sehr schweren ($> 2,0$ m über MW) Sturmflut heimgesucht. Besonders im Nordwesten und in der Schlei traten extreme Wasserstände auf. In Schleswig, Flensburg (Abbildung 1) und Eckernförde wurden die höchsten Wasserstände seit der Katastrophenflut von November 1872 (Abbildung 1, KFKI 2022) beobachtet. Neben der Höhe war mit bis zu 54 Stunden auch die Dauer der Sturmflut (Wasserstand $> 1,0$ m über MW) extrem (Holfort, dieses Heft). Entsprechend lang unterlagen vor allem die nach Osten exponierten Küsten einem sehr starken Sturmseegang (Hirschhäuser et al. 2024). An etwa zwei Tagen herrschten Sturmwinde um 20 m/s (Beaufort 9) aus östlichen Richtungen vor.

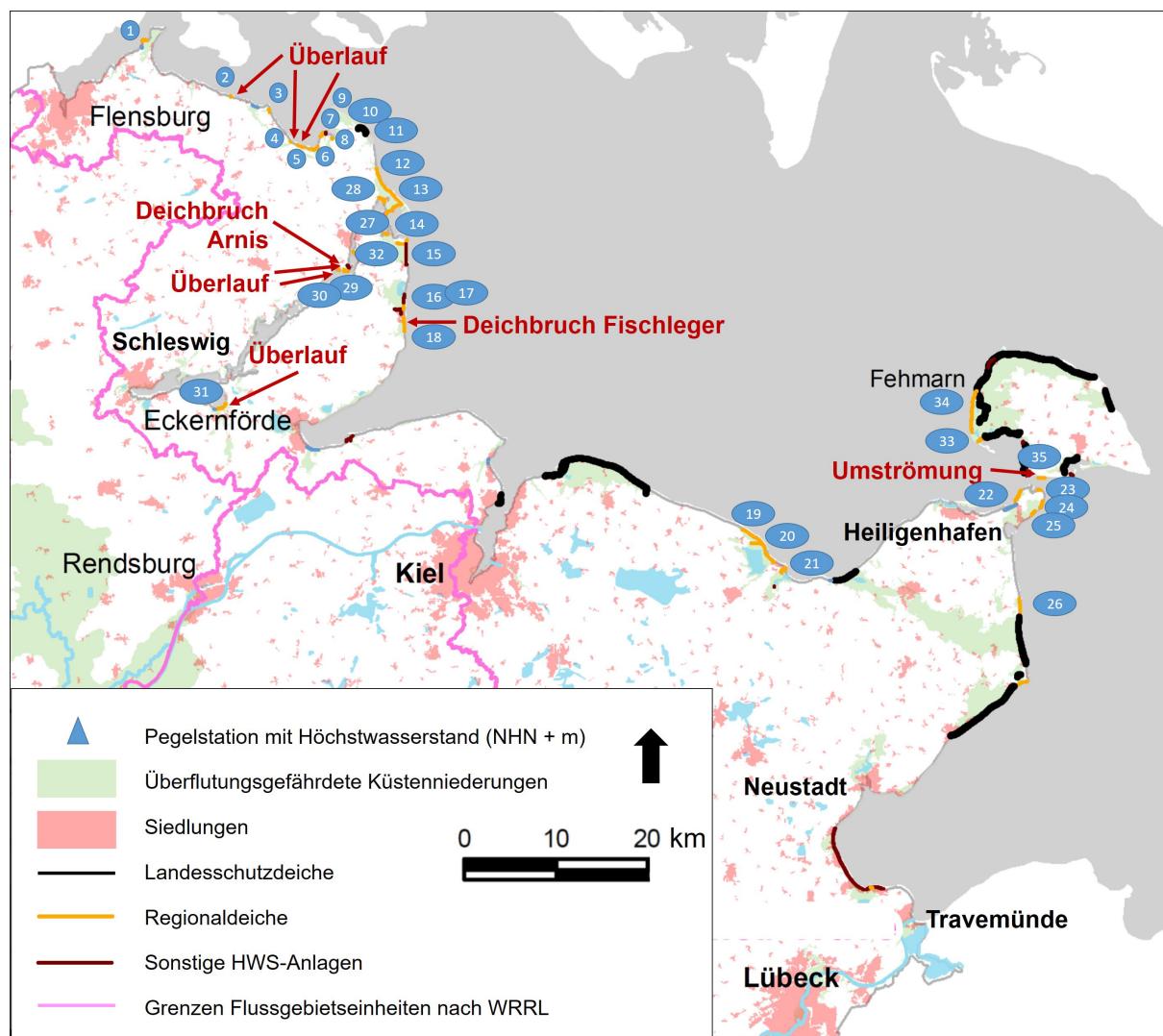


Abbildung 2: Übersicht über die Ostseeküste Schleswig-Holsteins mit Küstenniederungen (in grün) und Küstenhochwasserschutzanlagen. Die Pfeile in der Karte zeigen auf Regionaldeiche, die versagt haben. Die Nummerierung in der Karte verweist auf die Regionaldeiche in Tabelle 1.

Die Sturmflut hat entsprechend sehr hohe Schäden an öffentlichen und privaten Anlagen verursacht. Die Schätzungen unmittelbar nach der Sturmflut lagen bei etwa 200 Mio. €, davon etwa 45 Mio. € an Küstenschutzanlagen. In mehreren Küstenorten wie Flensburg,

Arnis und Eckernförde kam es zu Überflutungen. Insbesondere Regionaldeiche der Wasser- und Bodenverbände und der Kommunen wurden vielerorts in Mitleidenschaft gezogen, mehrere versagten (Abbildung 2). Nach einer Ermittlung des LKN.SH (Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz des Landes Schleswig-Holstein) wurden insgesamt etwa 5.740 ha Land überflutet. Drei Förderrichtlinien hat das Land Schleswig-Holstein zur Schadensbehebung erlassen, eine davon zur Notsicherung und Wiederherstellung von beschädigten Küstenschutzanlagen der Wasser- und Bodenverbände und der Kommunen. Insgesamt wurden 49 Anträge auf Förderung nach dieser Richtlinie mit einem Gesamtvolumen von fast 36 Mio. € gestellt.

In diesem Beitrag werden die in Schleswig-Holstein eingetretenen Schäden an Küstenhochwasserschutzanlagen sowie deren Notsicherung und Wiederherstellung beschrieben. Ziel ist die Veröffentlichung und damit Sicherung von Daten und Informationen von diesem extrem seltenen Ereignis, unter anderem für künftige Forschung. Anschließend werden Lehren und Konsequenzen aus der Sturmflut für den Küstenschutz des Landes vor gestellt und diskutiert. Der Beitrag schließt mit Schlussfolgerungen aus der Sturmflutkatastrophe für den Küstenschutz und einem Ausblick ab.

2 Die Schäden an Küstenhochwasserschutzanlagen

An der Ostseeküste Schleswig-Holsteins schützen 71,0 km Landesschutzdeiche, 46,7 km Regionaldeiche, 7,1 km Dämme und 23,4 km sonstige Küstenhochwasserschutzanlagen vor Meerwasserüberflutungen (Hofstede 2022). Darüber hinaus bieten an mehreren Küstenabschnitten Strandwälle, die teilweise durch Deckwerke und Promenaden befestigt sind, einen gegenüber technischen Anlagen eingeschränkten Hochwasserschutz. Für die Landesschutzdeiche und die Regionaldeiche auf Fehmarn (6,6 km) ist das Land zuständig; für die anderen Küstenhochwasserschutzanlagen die örtlichen Wasser- und Bodenverbände sowie Kommunen. In den Monaten nach der Sturmflut hat der LKN.SH eine umfassende Be standsaufnahme der Schäden an den Landesschutz- und Regionaldeichen durchgeführt, dessen Ergebnisse nachfolgend dargestellt werden.

Die Landesschutzdeiche, die Dämme und die sonstigen Küstenhochwasserschutzanlagen haben die Sturmflut ohne größere Schäden gekehrt. An den Landesschutzdeichen gab es nur an zwei Stellen auf Fehmarn, bei Presen und bei Burgstaaken stärkere Schäden an der Außenböschung (Abbildung 3).



Abbildung 3: Schäden am Asphaltdeckwerk des Landesschutzdeiches Presen (linkes Foto) und an der Außenböschung des Landesschutzdeiches Burg (rechtes Foto) auf Fehmarn (Foto: LKN.SH).

In Tabelle 1 sind die 35 Regionaldeiche an der Ostseeküste Schleswig-Holsteins, getrennt für die Regionen Festlandküste, Schlei und Fehmarn, mit der jeweils festgestellten Schadenskategorie aufgelistet.

- Leichte Schäden: kleinere Schadstellen, die jedoch die Wehrhaftigkeit des Deiches nicht beeinflussen und im Rahmen der Deichunterhaltung beseitigt werden können.
- Mittlere Schäden: größere Schadstellen wie Ausspülungen oder auch Auskolkungen, deren Beseitigung über den Umfang der Deichunterhaltung hinausgehen und die ggf. notgesichert werden müssen.
- Starke Schäden: gravierende Schadstellen, welche aufgrund ihres größeren Ausmaßes (Fläche, Tiefe) die Wehrhaftigkeit des Deiches einschränken und Sofortsicherungsmaßnahmen erfordern.

An zwei Regionaldeichen bei Arnis und Damp (Regionaldeich Fischleger) traten jeweils etwa 40 m lange Deichbrüche auf (Abbildung 4). Sieben weitere Regionaldeiche mit einer Gesamtlänge von 12,5 km wiesen starke sturmflutbedingte Schäden auf, weitere drei Regionaldeiche mit einer Gesamtlänge von 3,5 km zeigten mittlere Schäden. Die starken und mittleren Schäden traten dabei zumeist nicht über die gesamte Deichstrecke, sondern in Abschnitten (von wenigen bis mehrere 100 Meter Länge) auf. An weiteren 11 Regionaldeichen (9,9 km) gab es nur leichte Schäden und 14 Regionaldeiche (20,9 km) zeigten keine Schäden (Tabelle 1). Starke und mittlere Schäden traten vor allem an scharliegenden, nach Osten exponierten Deichabschnitten auf. Beispiele sind die Regionaldeiche vor Oehe und um Damp (Abbildung 4). Diese Abschnitte waren dem starken Sturmseegang etwa zwei Tage lang direkt ausgesetzt. An Deichabschnitten ohne starken Seegang und/oder durch vorgelagerte Strandwälle geschützten Deichabschnitten wie bei Behrensdorf und in der Schlei traten dagegen kaum bzw. nur geringe Schäden auf. In Behrensdorf wurde der Seegang bereits weitgehend am vorgelagerten Strandwall dissipiert, wobei dieser stark erodiert wurde. Als Teil des örtlichen Küstenschutzsystems (gemeinsam mit dem Regionaldeich) wurde der Strandwall mit Landesförderung wiederhergestellt.

Tabelle 1: Regionaldeiche (RD) an der Ostseeküste von Schleswig-Holstein mit Schadenskategorie (Erläuterung im Text).

	Regionaldeich	Länge	Mittl. Höhe	Einwohner	Schäden	Bemerkungen
		km	NHN + m			
Festland						
1	Holnis	0,6	2,5	78	leichte	
2	Neukirchen/Mühlendamm	0,2	2,5	0	mittlere	Überströmung
3	Habernis	0,4	2,5	2	leichte	
4	Ohrfeldhaff	0,2	1,9	0	keine	Überströmung
5	Koppelheck	1,0	2,9	12	leichte	
6	Ohrfeld	1,2	2,0	20	leichte	Überströmung
7	Gelting	0,6	2,9	0	leichte	
8	Grahlenstein	0,2	3,9	174	keine	
9	Nieby	0,4	2,7	0	keine	
10	Basrot	0,1	3,2	0	keine	
11	Gammeldamm	1,3	3,7	0	leichte	
12	Kronsgaard	1,2	3,0	9	leichte	
13	Oehe Ostsee	4,6	3,6	674	starke	
14	Olpenitz (einschl. Port)	1,5	3,6	0	leichte	
15	Weidefeld	2,3	3,2	331	starke	
16	Schwansener See	2,5	2,7	9	mittlere	starker Wellenüberlauf
17	Schuby	0,8	3,3	9	leichte	
18	Fischleger	1,7	2,5	0	starke	Deichbruch
19	Behrensdorf	2,9	2,8	67	keine	Strandwall vor RD erodiert
20	Lippe (einschl. Flügeldeich)	3,4	3,6	25	keine	
21	Hohwacht	0,9	3,0	72	mittlere	
22	Großenbrode NW	1,6	2,6	4	keine	
23	Rethsollskamp	0,7	2,8	5	starke	
24	Großenbroder Moor	0,9	3,5	1231	starke	
25	Rethwiese	0,6	3,0	1231	leichte	
26	Süssau	1,7	3,3	3	starke	
Schlei						
27	Oehe/Maasholm	2,82	2,7	674	keine	
28	Wormshöft	2,26	2,4	674	keine	
29	Arnis (einschl. Flügeldeich)	0,65	1,9	330	starke	Deichbruch, Überströmung
30	Watestelle	0,15	1,4	0	keine	Überströmung
31	Fleckby	0,68	2,1	17	keine	Überströmung
32	Rückeberg	0,25	2,9	13	keine	
Fehmarn						
33	Flügge	1,05	2,4	15	keine	
34	Wallnau	4,83	3,0	15	keine	
35	Fehmarnsund	0,76	3,1	41	leichte	Umströmung



Abbildung 4: Deichbruch im Regionaldeich Fischleger südlich von Damp (Foto: J. Hofstede/MEKUN). Der stark erodierte (grüne) Deich ist fast vollständig durch Geröll überdeckt, was auf eine sehr starke Einwirkung durch brechende Wellen hinweist.

Fünf Regionaldeiche wurden wegen zu geringer Kronenhöhe lokal überströmt (Tabelle 1) und die dahinterliegende Küstenniederung überflutet. Obwohl diese Deiche zumeist keine oder nur leichte Schäden aufwiesen, haben sie somit trotzdem in ihrer Funktion versagt. Auch der Regionaldeich bei Arnis, in dem ein Deichbruch auftrat, wurde wegen zu geringer Höhe lokal überströmt. In Arnis lief das Wasser darüber hinaus über den Straßendamm, über den Regionaldeich Watestelle und über eine niedrige Stelle in der Ortslage in die Küstenniederung (Abbildung 5). In der durch die Regionaldeiche geschützten Küstenniederung wohnen 36 Menschen; weitere 105 Menschen wohnen ohne Schutzanlagen in der zentralen Ortslage im Höhenbereich zwischen NHN +2,0 und NHN +2,5 m.

Der Regionaldeich Fehmarnsund auf Fehmarn wurde während der Sturmflut umströmt, wodurch die Küstenniederung dahinter überflutete und weshalb auch dieser Deich entsprechend versagte. Schließlich wurde auch die Küstenniederung hinter dem Regionaldeich Gelting überflutet, allerdings nicht wegen eines Deichversagens. Diese Küstenniederung wird zusätzlich zum Regionaldeich durch einen nicht als Hochwasserschutzanlage gewidmeten Wall, die sogenannte Verwallung Nordschau, geschützt. Mit teilweise geringeren Höhen als NHN +2,0 m wurde dieser Wall überströmt.

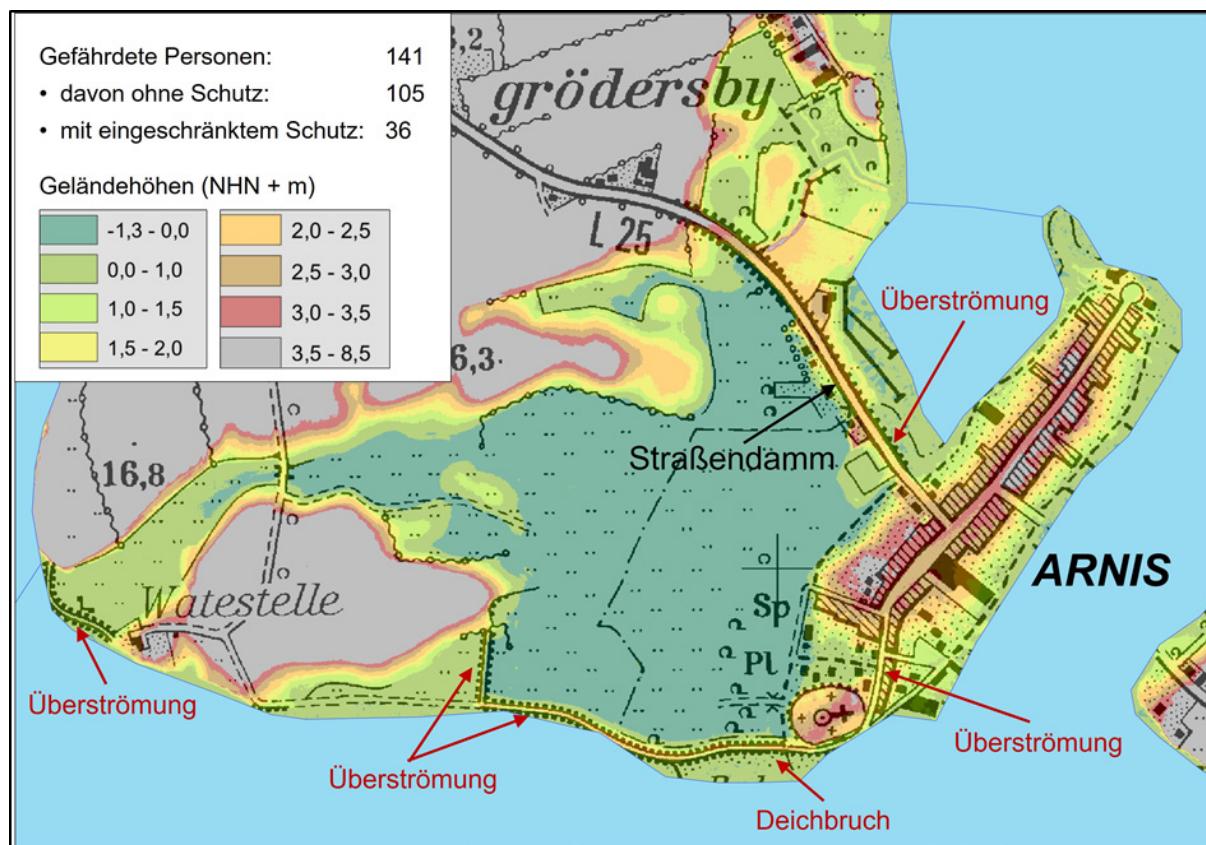


Abbildung 5: Geländehöhen in der Küstenniederung der Stadt Arnis mit Angabe der Deichbruchstelle sowie der Überströmungen am Straßendamm, in der Ortslage und an den Regionaldeichen in der Oktoberflut 2023.

Schließlich trat am Regionaldeich Schwansener See nördlich von Damp ein sehr starker Wellenüberlauf auf, wodurch die dahinterliegende Küstenniederung teilweise überflutet wurde. Hier kann entsprechend von einem Teilversagen gesprochen werden. Nicht in der Tabelle aufgenommen sind zwei ehemalige Regionaldeiche, die in 2009 (Geltinger Birk) und 2022 (Dahmer Moor) entwidmet wurden, weil sie ihre Bedeutung zum Schutz von Menschenleben und hohen Sachwerten verloren hatten. Damit werden sie zwar formal nicht mehr als Hochwasserschutzanlage geführt, können ihre Wirkung aber durchaus noch über kurze oder längere Zeit behalten. Der ehemalige 8,0 km lange Regionaldeich um die Geltinger Birk wurde in der Sturmflut an mehreren Stellen zerstört und die Küstenniederung großflächig überflutet. Am ehemaligen 1,2 km langen Regionaldeich Dahmer Moor waren starke Beschädigungen zu verzeichnen.

3 Notsicherung und Wiederherstellung der Küstenschutzanlagen

Bereits während der Sturmflut bzw. des Katastropheneinsatzes wurden durch die vielen professionellen und ehrenamtlichen Einsatzkräfte tausende Sandsäcke an den gefährdeten Deichstrecken ausgelegt. Diese Maßnahmen gingen am 21. Oktober nach Beendigung des Katastrophenfalles fließend in die Notsicherungen über. Der LKN.SH stellte im Rahmen des Katastropheneinsatzes und der unten beschriebenen Notsicherungen über 200.000 Sandsäcke, 1.350 Big Bags, 600 Sandcontainer und 2.500 Tonnen Eisensilikatsteine zur Verfügung. Wie wichtig diese Notsicherungen waren, zeigte sich während einer nachfolgenden Sturmflut am 09. Februar 2024. Trotz Wasserständen von bis zu NHN +1,28 m

(Pegel Flensburg) und starkem Sturmseegang aus dem Osten (Abbildung 6) gab es keine Überflutungen. Auf die Notsicherungen folgten wiederum die Wiederherstellungsmaßnahmen.



Abbildung 6: Notgesicherter Regionaldeich Fischleger südlich von Damp während der Sturmflut am 09.02.2024 (Foto: J. Hofstede/MEKUN).

Für insgesamt 20 Regionaldeiche wurden Anträge auf Förderung der Notsicherung und Wiederherstellung gestellt. An einigen Regionaldeichen wie in Fleckeby (Schlei) oder Glücksburg (Holnis) waren nur kleinere Schadstellen auszubessern. Andere Regionaldeiche wie bei Damp (Fischleger) und Oehe (Ostseedeich) waren bzw. sind fast über die gesamte Länge wiederherzustellen. Dies schlägt sich auch in den Kosten der einzelnen Maßnahmen nieder, die zwischen knapp 20.000 € und fast 10 Mio. € schwanken. Bis Ende 2024 hat der LKN.SH für die Notsicherung und Wiederherstellung von Regionaldeichen insgesamt 30,5 Mio. € bewilligt, davon über 20 Mio. € für die vier am stärksten betroffenen Regionaldeiche Oehe (Ostsee), Weidefeld, Fischleger und Arnis.

3.1 Notsicherungsmaßnahmen

An vier Regionaldeichen (Arnis, Weidefeld, Oehe Maasholm und Süssau) in der Zuständigkeit von Wasser- und Bodenverbänden wurden Notsicherungsmaßnahmen unter Anleitung von Personal des LKN.SH umgesetzt. An zwei Landesschutzdeichen auf Fehmarn (Burg-Burgstaaken, Presen) in der Zuständigkeit des Landes wurden zudem Notsicherungsmaßnahmen in Eigenregie des LKN.SH bzw. durch ein beauftragtes Bauunternehmen durchgeführt. Hier betraf es zumeist kleinräumige Schäden wie Erosionsstellen an der Deichaußenböschung, Schäden am Deckwerk oder Sickerstellen am inneren Deichfuß. Nachfolgend werden die Notsicherungsmaßnahmen an den vier oben genannten Regionaldeichen und an den Landesschutzdeichen beschrieben.

Regionaldeich Arnis

Der Regionaldeich Arnis erfuhr im Zuge des Sturmflutereignisses erhebliche Beschädigungen bzw. brach an einer Stelle. Die Wiederherstellung einer geschlossenen Deichlinie war das Ziel der Notsicherungsmaßnahme (Abbildung 7).



Abbildung 7: Notsicherung der Deichbruchstelle bei Arnis (Foto: J. Hofstede/MEKUN).

Aufgrund der Durchströmung und Überströmung des Regionaldeiches stand zudem die Entwässerung der überfluteten Flächen mit Pumpen im Vordergrund des Einsatzes vor Ort. Um eine geschlossene Deichlinie übergangsweise herzustellen wurden Sandcontainer und Big Bags verwendet, welche in einem Geotextil eingeschlagen wurden. Insbesondere die Verwendung der Sandcontainer bewies sich aufgrund der Größe und der Möglichkeit, die Sandcontainer miteinander zu verbinden, als eine stabile Konstruktion. Die Übergangsbereiche im Bereich der Bresche wurden zudem mit Sandsäcken abgedeckt, sodass ein geschlossener Anschluss an den Bestand sichergestellt werden konnte.

Regionaldeich Oehe (Ostsee)

Auf der gesamten Länge des Ostseediecks Oehe kam es im Zuge der Sturmflut zu starken Ausspülungen im Deichkörper. Des Weiteren wurden die Deckwerksflächen beschädigt bis zerstört, wobei es zu Materialumlagerungen und Unterspülungen mit einer Tiefe von bis zu fünf Metern kam. Die Ausspülungen im Deichkörper wurden mittels Vlies als Unterlage und Sandsäcken sowie Big Bags ausgebessert. In einem weiteren Schritt wurden die Sandsäcke/Big Bags mit Lehmboden abgedeckt. Im Bereich der Deckwerke wurden 2.500 Tonnen Eisensilikatsteine zur Verstärkung der beschädigten Bereiche als Vorschüttung installiert.

Regionaldeich Weidefeld

Der Regionaldeich Weidefeld wurde durch die Sturmflut stark beschädigt. In einem etwa 600 m langen besonders betroffenen Teil wurde der Deichkörper in Rahmen der Notsicherung wiederaufgebaut. Dabei wurde in einem ersten Schritt ein Geotextil als Untergrund eingebaut. Mittels Sandcontainer als Basis und Lehmboden wurde dann die Außenböschung aufgebaut. Basierend auf vorhandenen Deckwerksteinen wurden zur Fußsicherung zudem Deckwerkssteine im Deichfußbereich verbaut.

Regionaldeich Süssau

Der Regionaldeich Süssau wies starke Schäden auf. Auf ca. 600 m wurden der Deichfuß, das Deckwerk und die Außenböschung des Deiches zu großen Teilen abgetragen. Als Notsicherungsmaßnahme wurde die Außenböschung des Deiches durch in Vlies eingeschlagene Big Bags gesichert. Diese wurden zweilagig (1. Lage: 2 Big Bags, 2. Lage: 1 Big Bag) eingebaut. Die aufgewühlten Deckwerksteine wurden zu einer Fußsicherung zusammengeschoben, sodass die eingeschlagenen Big Bags geschützt werden.

Landesschutzdeich Presen

Im Bereich des Landesschutzdeiches Presen kam es im Zuge der Sturmflut lokal zu starken Beschädigung des Asphaltdeckwerks (Abbildung 3). Zu Beginn der Notsicherung wurde zunächst das eingebrochene und abgesackte Asphaltdeckwerk aufgenommen, zerkleinert und abgefahren. Es wurde ein Planum hergestellt und die vorhandenen Natursteine hierbei zunächst seitlich gelagert. Auf das Planum wurden wiederum Sandcontainer in einem wasserbaugeeigneten Filtervlies überlappend eingebaut.

Insgesamt wurden gut 1.200 Sandcontainer verbaut. Um die Befahrbarkeit und eine mögliche Deichverteidigung im Bereich zu gewährleisten, wurde im Übergangsbereich von den Sandcontainern zur Außenböschung auf Höhe der befahrbaren Wellenüberschlagssicherung eine provisorische Baustraße (Tragschichtmaterial) errichtet. Diese diente zudem als Auflast und Anschluss der Sandcontainer an den Deichkörper. Abschließend wurden die seitlich gelagerten Natursteine als Fußsicherung vor die Sandcontainer eingebaut.

Landesschutzdeich Burg (Burgstaaken)

Im Bereich des Landesschutzdeiches Burg kam es im Zuge der Sturmflut lokal zu starken Erosionen an der Außenböschung (Abbildung 3), die notgesichert werden mussten. Zunächst wurde der ausgespülte Deichkörper mit Lehmboden wieder aufgefüllt. Zum Schutz des Lehmbodens wurde ein Vlies als Grasnarbenersatz aufgebracht und abschließend wurde das Vlies mit Sandsäcken abgedeckt.

3.2 Wiederherstellungsmaßnahmen

Die meisten Wiederherstellungsmaßnahmen konnten rechtzeitig vor der folgenden Sturmflutsaison, d. h., zu Anfang Oktober 2024 fertiggestellt werden. Der sehr eng gesteckte Zeitrahmen stellte dabei eine besondere Herausforderung dar. In nur wenigen Monaten mussten die Schadens- und Kostenermittlung sowie die Ausschreibung, Vergabe, Planung und Umsetzung unter Beachtung der Vergaberichtlinien für öffentliche Aufträge erfolgen. Auch die nur begrenzte Verfügbarkeit von qualifizierten Ingenieurbüros und Baufirmen stellte einige Verbände vor Probleme. Als zeitaufwendig kam noch hinzu, dass die Anträge

auf Förderung zumeist unvollständig waren, weshalb der LKN.SH erst nach einer Nachforderung der fehlenden Unterlagen eine baufachliche Prüfung durchführen konnte. Aus diesen Gründen reichen einige Maßnahmen in die Sturmflutsaison hinein und vier große Maßnahmen (Ostseedeich Oehe, Regionaldeiche Weidefeld, Großenbrode und Süssau) werden erst in 2025 komplett fertiggestellt werden können. Die noch nicht fertiggestellten Bereiche sollen – als Auflage für die erforderliche Genehmigung einer Verlängerung – innerhalb von 48 Stunden mittels Notsicherung in einen sicheren, wehrhaften Zustand gebracht werden können, zum Beispiel durch vorgehaltene Sandcontainer. Im Rahmen der Gefahrenabwehr im LKN.SH werden diese Bereiche darüber hinaus besonders berücksichtigt.

Als Beispiel für die Wiederherstellung eines Regionaldeiches wird nachfolgend der Ostseedeich vor Oehe beschrieben (Abbildung 8).



Abbildung 8: Wiederherstellung des Deckwerkes am Regionaldeich Oehe – Ostsee (Foto: H. Skuppin/MEKUN).

Dieser 4,6 km lange nach Nordosten exponierte Deich mit einer mittleren Kronenhöhe von NHN +3,6 m schützt eine 511 ha große Niederung mit 383 Einwohnern. Er wurde von 2002 bis 2004 verstärkt. Der seinerzeit vom zuständigen Verband angesetzte Bemessungswasserstand betrug NHN +2,00 m. Während der Oktobersturmflut 2023 wurde am nahegelegenen Pegel Schleimünde ein Höchstwasserstand von NHN +2,07 m gemessen. Nach Hirschhäuser et al. (2024) entspricht dies einem Wasserstand mit einer jährlichen Wahrscheinlichkeit zwischen 0,05 und 0,02 (20- bis 50-jähriges Ereignis). Insbesondere der sehr starke Seegang aus Osten während der über zwei Tage andauernden Sturmflut führte den Deich an seine Belastungsgrenzen. Die eingetretenen Schäden sind in Kap. 3.1 beschrieben. An einer Stelle stand der Deich infolge von starkem Wellenüberlauf kurz vor dem Bruch. Bei den erforderlichen Notsicherungsmaßnahmen wurde der Deichverteidigungsweg zum Teil stark beschädigt und ist nach dem heutigen Stand der Technik und mit Kosten in Höhe von etwa 0,5 Mio. € wiederherzustellen. Bei der Schadensaufnahme wurde

weiterhin festgestellt, dass die vorhandenen Deckwerke größtenteils so stark beschädigt sind, dass sie neu herzurichten sind. Gemäß Förderantrag werden dazu etwa 33.500 m² Filtervlies sowie 31.000 Tonnen Wasserbausteine benötigt, wovon ca. 9.000 Tonnen aus dem vorhandenen Deckwerk und der Notsicherung (Kap. 3.1) stammen. Etwa 27.000 m² Deckwerk sind zu verklammern. Die oberhalb des Deckwerkes anschließende Deichaußenböschung wurde ebenfalls stark in Mitleidenschaft gezogen bzw. erodiert. Hier sind 5.000 m³ Kleiabdeckboden und 4.000 m³ Füllboden einzubauen. Die sehr umfangreiche Maßnahme wird erst in 2025 fertiggestellt werden können, wobei nach aktuellem Stand mit Gesamtkosten in Höhe von fast 10 Mio. € zu rechnen ist. Da der zuständige Verband nicht in der Lage ist, einen Eigenanteil in Höhe von 10 % der Gesamtkosten aufzubringen, hat er eine 100 %-Förderung beantragt.

4 Erkenntnisse aus der Sturmflut und Konsequenzen für den Küstenschutz

Unmittelbar nach der Sturmflut wurde der Ruf nach staatlicher Unterstützung bei der Notsicherung und Wiederherstellung der geschädigten Küstenschutzanlagen laut. Das Land hat hierauf unter anderem mit der Einrichtung eines Kompetenzzentrums beim LKN.SH und der Veröffentlichung einer Förderrichtlinie reagiert (Kap. 1). Die Richtlinie wurde Mitte Februar 2024 im Amtsblatt (Amtsblatt für Schleswig-Holstein, Ausgabe Nr. 7, 234-238, 12.02.2024) verkündet. In der Richtlinie wurde vorgegeben, dass die Wiederherstellungsmaßnahmen zwar nach dem heutigen Stand der Technik erfolgen, aber im bestehenden bzw. ursprünglichen Bestick bleiben sollen. Diese Auflage stieß auf Kritik, da somit eine Verbesserung des Küstenhochwasserschutzes, auch vor dem Hintergrund des stärker ansteigenden Meeresspiegels, nicht möglich sei. Begründet wurde diese Auflage damit, dass bei Überbauung von zusätzlichen Flächen ein zeitaufwendiges Genehmigungsverfahren erforderlich wird. Dies würde die mit der Richtlinie angestrebte Fertigstellung in 2024 faktisch ausschließen. Darüber hinaus führt die Anwendung des heutigen Standes der Technik inklusive der Nutzung von modernen Materialien bereits zu einer Verbesserung des Schutzstandards. So werden Steindeckwerke heute standardmäßig mit einem Vlies und einer Fußsicherung angelegt, was zu einer deutlichen Erhöhung der Standsicherheit führt. Schließlich impliziert die Wiederherstellung des ursprünglichen Besticks auch die Möglichkeit eingetretene Setzungen der Deichkrone auszugleichen. Auch als Konsequenz der Sturmflut hat die Landesregierung eine Anpassung des Landeswassergesetzes auf den Weg gebracht, um dort wo es möglich ist, eine Verfahrensbeschleunigung zu erreichen.

4.1 Konsequenzen aus dem stärkeren Meeresspiegelanstieg

Die Sturmflut von Oktober 2023 hat aufgezeigt, dass viele Regionaldeiche an der Ostseeküste von Schleswig-Holstein auf ein derartiges Ereignis nicht ausgelegt sind. Traditionell wurden diese Deiche, die überwiegend aus dem vorletzten und der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts stammen, so gebaut, wie es die relativ geringen personellen und finanziellen Ressourcen erlaubten. Dies und der Umstand, dass vergleichbare (und noch höhere) Sturmfluten künftig infolge des beschleunigten Meeresspiegelanstieges häufiger eintreten werden, stellt den öffentlichen Küstenschutz vor große Herausforderungen. Erschwerend kommt hinzu, dass die 150 km langen Küstenhochwasserschutzanlagen an der Ostseeküste nur etwa zwei Drittel der insgesamt 315 km² großen potenziell signifikanten überflutungsgefährdeten

Hochwasserrisikogebiete an den Küsten schützen (nachfolgend im Text verkürzt als „Küstenniederung“ dargestellt). Potenziell signifikante überflutungsgefährdete Küstengebiete in Schleswig-Holstein sind die Gebiete, die – ohne Küstenhochwasserschutzanlagen – bei einer Sturmflut mit einem Wiederkehrintervall von 200 Jahren (jährliche Wahrscheinlichkeit = 0,005) überflutet werden (MELUND 2022). Wenn keine Anpassungsmaßnahmen erfolgen, werden die zu erwartenden Schäden und damit das Hochwasserrisiko an der Ostseeküste stark zunehmen. Aktuell leben etwa 30.500 Menschen in den Küstenniederungen. Sachwerte in Höhe von 6,9 Mrd. € sind hier vorhanden (Hofstede 2022). Wenn der Meeresspiegel infolge des menschgemachten Klimawandels um 0,75 m ansteigt, werden die Vulnerabilitätszahlen sich nach Berechnungen des LKN.SH jeweils um ein Drittel auf 41.000 Personen und 9,2 Mrd. € Sachwerte erhöhen. Die Fläche der Küstenniederungen wird um 46 km² (15 %) auf 361 km² zunehmen. Ein Anstieg um 0,75 m bis 2100 entspricht dem IPCC-Szenario SSP5-8.5 (IPCC 2021), auf deren Anwendung sich Bund und Küstenländer bei der vorsorglichen Küstenschutzplanung geeinigt haben (MELUND 2022). Neben der Zunahme der betroffenen Flächen wäre auch damit zu rechnen, dass sich im Falle einer Überflutung die Wassertiefen und damit die Schadenserwartungen vergrößern (De Moel and Aerts 2011). Schließlich wird sich der Küstenrückgang entsprechend des stärkeren Meeresspiegelanstieges intensivieren und räumlich ausdehnen, was ohne Anpassungsmaßnahmen ebenfalls zu höheren Schäden und Risiken führen wird (Ranasinghe et al. 2012). Diese Risiken durch technische Maßnahmen vollumfänglich und langfristig zu beseitigen, ist volkswirtschaftlich nicht darstellbar und wird einer nachhaltigen Entwicklung der Küste nicht gerecht. Auch als Lehre aus der Sturmflut werden sich deshalb öffentliche Küstenschutzmaßnahmen künftig auf den Schutz von signifikanten Vulnerabilitäten wie Siedlungen und außergewöhnlich hohe Sachwerte fokussieren, um den technischen und finanziellen Aufwand in einem gesellschaftlich und ökologisch vertretbaren Rahmen zu halten.

4.2 Konsequenzen in den durch Regionaldeiche geschützten Niederungen

Eine wichtige Konsequenz aus der Sturmflut mit seinen gravierenden Folgen ist die Bereitschaft des Landes, mehr Verantwortung für den Küstenhochwasserschutz in durch Regionaldeiche geschützten Küstenniederungen zu übernehmen. Insbesondere für die oft sehr kleinräumig strukturierten Wasser- und Bodenverbände stellt es eine enorme finanzielle und personelle Herausforderung dar, ihre Regionaldeiche vor dem Hintergrund eines verstärkt ansteigenden Meeresspiegels langfristig in wehrfähigem Zustand zu erhalten. Bereits die Notsicherungen und Wiederherstellungsmaßnahmen nach der Oktoberflut 2023 überforderten die meisten Verbände in finanzieller Hinsicht, weshalb zur Wiederherstellung der Wehrfähigkeit der Deiche ausnahmsweise und mit Auflagen versehen eine 100-prozentige Förderung durch das Land bewilligt wurde. So sollen die Verbände berichten, wie sie ihre Finanzsituation verbessern wollen, um langfristig den Schutzstandard zu gewährleisten. Entsprechend der o. g. Lehre aus der Sturmflut (Fokussierung auf signifikante Vulnerabilitäten) wurde als Richtwert für eine eventuelle Übernahme der Zuständigkeit einer durch Regionaldeiche der Wasser- und Bodenverbände bzw. der Kommunen geschützte Niederung durch das Land eine Einwohnerzahl von mindestens 50 festgelegt. Die gewählte Zahl 50 ist zwar abstrakt aber plausibel, weil es sich hierbei um einen besiedelten Bereich von

einigem Gewicht handelt. Sie begründet entsprechend ein übergeordnetes öffentliches Interesse. Eine eventuelle Übernahme durch das Land erfolgt nur auf Antrag der bisher zuständigen Institution. Wenn das Kriterium Einwohnerzahl ≥ 50 erfüllt ist, wird als erster Schritt eine Vereinbarung über die Durchführung einer Konzeptstudie über mögliche Küstenschutzlösungen für die Küstenniederung durch die bzw. im Auftrag der bisher zuständigen Instanz geschlossen. In vielen Fällen kann sich nämlich eine rückwärtige Lösung durch Ring- oder Flügeldeiche unmittelbar um die besiedelten Bereiche herum finanziell günstiger und auch nachhaltiger als eine Verstärkung des Regionaldeiches an Ort und Stelle, d. h. in exponierter Lage direkt an der Ostsee, herausstellen. In der Abbildung 9 ist ein Beispiel einer rückwärtigen Lösung an der Ostseeküste von Schleswig-Holstein dargestellt. Der bestehende Regionaldeich um die Geltinger Birk wurde 2009 nach Errichtung eines Flügeldeiches unmittelbar vor der Siedlung Falshöft entwidmet.

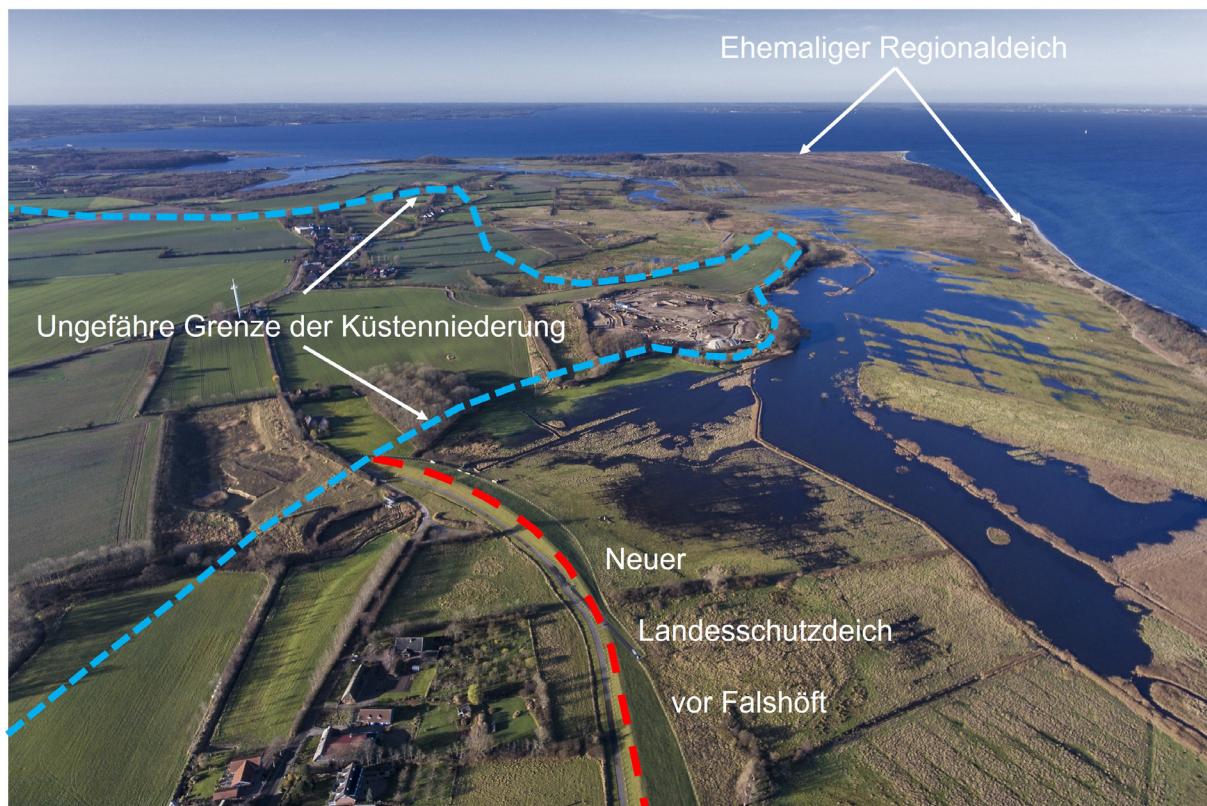


Abbildung 9: Luftbild der Geltinger Birk mit Angabe des Landesschutzdeiches von 2009 (rote gestrichelte Linie) und der ungefähren landseitigen Begrenzung der Küstenniederung (blaue gestrichelte Linie) (Foto: N. Kobarg/LfU).

Das Land fördert die zu erstellende Küstenhochwasserschutz-Konzeptstudie mit 95 %. Nachdem das Land und die bisher zuständige Institution (Wasser- und Bodenverband oder Kommune) auf Basis der Studie eine gemeinsame Grundsatzlösung entwickelt haben, übernimmt das Land bzw. der LKN.SH die planerische, bauliche und finanzielle Umsetzung dieser Lösung. Dabei wird der künftige Landesschutzdeich als Klimadeich, d. h. mit einem Vorsorgemaß von 1,0 m zur Berücksichtigung des künftigen Meeresspiegelanstieges und mit Baureserven zum Ausgleich eines weiteren Meters Meeresspiegelanstieg ausgebaut (Hofstede 2022). Die Widmung zum Landesschutzdeich gemäß § 68 LWG (Landeswasser gesetz Schleswig-Holstein) und damit die Übernahme der Zuständigkeit durch das Land erfolgt mit der Abnahme der Baumaßnahme. Bisher (Stand Ende September 2024) haben

drei Verbände und zwei Kommunen für insgesamt 11 Regionaldeiche Anträge gestellt. Diese 11 Regionaldeiche schützen insgesamt sieben Küstenniederungen. Vier dieser Küstenniederungen haben mehr als 50 Einwohner. Insgesamt haben acht durch Regionaldeiche geschützte Küstenniederungen an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste eine Einwohnerzahl höher als 50. Für die übrigen vier durch Regionaldeiche geschützten Küstenniederungen mit einer Einwohnerzahl größer als 50 wurden keine Anträge auf Übernahme gestellt.

4.3 Konsequenzen in den größeren bisher ungeschützten Küstenorten

In den größeren Küstenorten fehlen bisher weitgehend Küstenhochwasserschutzanlagen, weshalb hier viele niedrig liegende Bereiche in der Oktoberflut 2023 überfluteten (Abbildung 10). Dabei wohnen aktuell allein in den kreisfreien Städten Lübeck, Kiel und Flensburg etwa 9.500 Menschen in Küstenniederungen. Bei einem Meeresspiegelanstieg von 0,75 m (siehe oben) würde sich diese Zahl infolge der vergrößerten Kulisse nach den Berechnungen des LKN.SH um 45 % auf ca. 13.700 erhöhen.



Abbildung 10: Überfluteter Hafenbereich in Eckernförde am frühen Morgen des 20. Oktobers 2023 bei einem Wasserstand von ca. NHN +1,6 m. Im Ausschnitt ist in etwa der gleiche Bereich in umgekehrter Richtung am frühen Abend des 20. Oktobers bei einem Wasserstand von ca. NHN +1,9 m zu sehen. Der Höchstwasserstand wurde hier um 21:10 Uhr mit NHN +2,15 m erreicht. (Fotos: F. Hell/MEKUN).

Mehrere der gefährdeten Küstenorte stellen Überlegungen über eine Verbesserung ihres Küstenhochwasserschutzes an. Das Land hat hier keine eigene Zuständigkeit, sondern fungiert als Fachberater sowie als Genehmigungs- und Bewilligungsbehörde. Bedingt durch dichte Bebauung sowie vorhandene Tourismus- und Hafeninfrastrukturen direkt am Ufer ist die Errichtung von Deichen in den meisten Küstenorten nicht realisierbar. Hier sind alternative Lösungen gesucht. Als Beispiel hierfür können die Küstenbadeorte Scharbeutz,

Timmendorfer Strand und Heiligenhafen dienen. Diese Gemeinden haben bereits vor über 10 Jahren mit Landesförderung kommunale Küstenhochwasserschutzanlagen errichtet (Abbildung 11), die zusammen etwa 4.700 Menschen vor Überflutung schützen. Die Anlagen in den drei Gemeinden haben die Oktoberflut 2023 erfolgreich gekehrt, wobei die Höchstwasserstände hier mit etwa NHN +1,7 bis NHN +1,8 m deutlich niedriger als weiter im Westen ausgefallen sind.

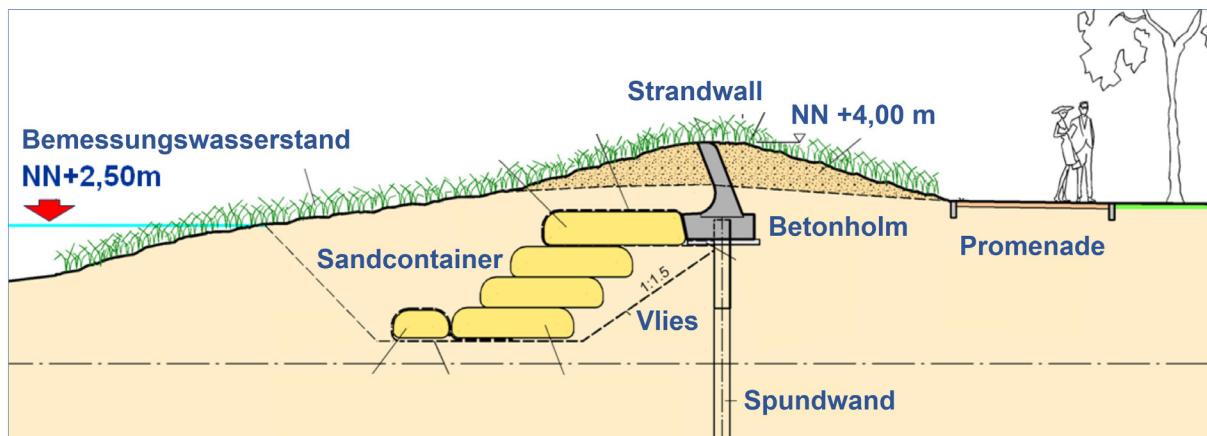


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Küstenhochwasserschutzlösung in Scharbeutz: in einem vorhandenen Strandwall integrierter Spundwand mit aufgesetztem wellenabweisendem Betonholm und vorgelagerten Sandcontainern (Quelle: WTM Engineers GmbH).

4.4 Konsequenzen in der Schlei-Region

Ein Sonderfall hinsichtlich eines nachhaltigen Küstenhochwasserschutzes stellt die Schlei-Region dar. Insgesamt leben etwa 1.450 Menschen in der Schlei-Region (einschl. Mündungsbereich) in Küstenniederungen. Davon werden etwa 530 Personen durch Regionaldeiche oder sonstige Küstenhochwasserschutzanlagen geschützt. Nach der Oktoberflut 2023 wurden aus der Region erneut Forderungen nach einer Gesamtlösung für die Schlei artikuliert. Das Land hat sich offen für eine Lösung für die ganze Region gezeigt aber darauf hingewiesen, dass die Initiative hierzu wegen fehlender Landeszuständigkeit aus der Region kommen muss. Die betroffenen Landkreise, Kommunen und Verbände in der Region haben sich daraufhin in einer „AG Schlei“ zusammengefunden und planen die Beauftragung einer Konzeptstudie über mögliche Küstenhochwasserschutzlösungen für die Schlei-Region. Das Land hat zugesagt, die Studie mit 95 % der Kosten zu fördern. Neben einer sogenannten Maximallösung mit Sperrwerk und anschließenden Seedeichen an der Schlei-Mündung werden auch alternative Lösungsvarianten hinsichtlich ihrer langfristigen Wirkung, Kosten (Bau, Unter- und Erhaltung) und ökologischer Auswirkungen untersucht.

4.5 Konsequenzen an den sandigen Küsten

Insbesondere die nach Osten exponierten sandigen Küsten in Schwansen, Angeln und in der Lübecker Bucht waren während der über zwei Tage andauernden Oktoberflut 2023 einem sehr starken Sturmseegang ausgesetzt. Dies hat verbreitet zu starken Erosionen und Abbrüchen an Steilufern geführt (Abbildung 12). Zunächst ist festzuhalten, dass infolge der Abbrüche keine größeren Schäden an privaten und öffentlichen Anlagen aufgetreten

sind. An vielen Stellen sind jedoch Ferien- und Wohnhäuser wie auch Straßen und Wege zum Teil deutlich näher an die Abbruchkante gerückt. Aus Sorge um ihren Privatbesitz haben mehrere Eigentümer auch ohne Genehmigung und adäquate Planung unmittelbar nach der Oktoberflut 2023 Sicherungsmaßnahmen teilweise nur vor einzelnen Häusern durchgeführt. Aus ihrer Sicht mag dies nachvollziehbar sein. Es verstößt jedoch gegen den gemeinsamen Grundsatz von Natur- und Küstenschutz, Steilufer von Sicherungsbauwerken freizuhalten bzw. nur zu sichern, wenn Siedlungen, wichtige Infrastrukturanlagen oder hohe Sachwerte durch irreversiblen Küstenrückgang und strukturelle Erosion gefährdet sind (MELUND 2022). Begründet wird dieser Grundsatz aus küstenschutzfachlicher Sicht damit, dass Steilufer an der Ostseeküste gemeinsam mit den ihnen vorgelagerten Abrasionsflächen die einzigen bedeutsamen Sedimentquellen für die Stabilisierung der sandigen Küsten, insbesondere bei einem verstärkt ansteigenden Meeresspiegel, darstellen (Averes et al. 2021). Sicherungen würden entsprechend zu einem zunehmenden Sedimentdefizit und insgesamt verstärkter Erosion an den Küsten führen (Nordstrom 2014). Punktuelle Sicherungen vor einzelnen oder wenigen Häusern könnten darüber hinaus wie eine Keimzelle wirken. Wegen der zu erwartenden (verstärkt fortschreitenden) Erosionen an den Seiten müssten die Bauwerke stetig verlängert werden.



Abbildung 12: Dronenaufnahme des stark erodierten Steilufers vor Rosenfelde in der Lübecker Bucht vom 21.10.2023 (Foto: U. Bormann).

Als Beispiel hierfür können die im Jahre 1972 errichteten Wellenbrecher in Kiel-Schilksee dienen. Unmittelbar südlich der Anlage und vor einer Siedlung ist seit der Wellenbrecher-Errichtung ein verstärkter Steiluferrückgang zu verzeichnen, zuletzt wieder nach der Oktoberflut 2023. Obwohl das Steilufer mit mindestens 55 m noch relativ weit von der Bebauung entfernt ist und die Stadt Kiel für diese Stelle mit einem durchschnittlichen Rückgang von 0,82 m/J seit 1991 rechnet (Kiel aktuell 2020), fordern einige Betroffenen bereits

heute nach jeder Sturmflut eine Verlängerung der Sicherungsbauwerke nach Süden. Aufgrund obiger Überlegungen erscheint das Freihalten von Steilufern von Sicherungsbauwerken eine naturbasierte Küstenschutzmaßnahme (Hofstede 2024), wovon auch der Naturschutz und letztendlich der Tourismus profitieren. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass Sandaufspülungen an der Ostseeküste von Schleswig-Holstein wie z. B. auf Sylt praktiziert, aufgrund fehlender Verfügbarkeit von geeigneten Sedimenten in der südwestlichen Ostsee insbesondere vor dem Hintergrund eines verstärkt ansteigenden Meeresspiegels keine nachhaltige Maßnahme zur Stabilisierung von Steilufern darstellen.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Aufgrund der oben angestellten Überlegungen zu den Folgen der Oktoberflut 2023 lassen sich die nachfolgenden für den künftigen Küstenschutz an der Ostseeküste von Schleswig-Holstein relevanten Schlussfolgerungen ableiten.

1. Die Sturmflut hat zu starken Schäden an und Versagen von Regionaldeichen an der Festlandküste geführt. Diese sind – bis auf wenige Ausnahmen – nicht für eine solche Sturmflut ausgelegt.
2. Für die bisher für die Regionaldeiche an der Festlandküste zuständigen kleinräumig strukturierten Wasser- und Bodenverbände stellt die langfristige Gewährleistung eines adäquaten Küstenhochwasserschutzes, insbesondere in den dichter besiedelten Küstenniederungen, eine enorme finanzielle und personelle Herausforderung dar.
3. Die Sturmflut hat in mehreren bisher ungeschützten Küstenorten zu größeren Überflutungen und signifikanten Schäden geführt. Ohne Schutzmaßnahmen werden die Schadenserwartungen in den Küstenorten infolge des stärkeren Meeresspiegelanstieges im Vergleich zum ruralen Bereich überproportional steigen.

In Anerkennung der zweiten Schlussfolgerung hat das Land angeboten auf Antrag die Zuständigkeit für den Küstenhochwasserschutz in dichter besiedelten Küstenniederungen (Richtwert > 50 Personen), die aktuell durch Regionaldeiche geschützt werden, zu übernehmen. Der Landesfokus liegt dabei auf dem Schutz von Siedlungen im übergeordneten öffentlichen Interesse. In einem ersten Schritt sollen für diese Küstenniederungen im Auftrag der bisher Zuständigen (mit 95 % Landesförderung) Hochwasserschutzkonzeptstudien durchgeführt werden, in denen auch alternative Lösungen zur traditionellen Verstärkung an Ort und Stelle untersucht werden. Wenn sich die Küstenschutzverwaltung des Landes und die bisher Zuständigen auf Grundlage einer solchen Studie auf eine grundsätzliche Lösung verständigt haben, übernimmt der LKN.SH die Entwurfsplanung und Umsetzung einschließlich der Finanzierung der Küstenschutzmaßnahme. Mit der Abnahme der Baumaßnahme geht schließlich die Zuständigkeit für den neuen Klimadeich auf das Land über. Eventuell weiterhin vorhandene Regionaldeichabschnitte können entwidmet werden oder verbleiben in der bisherigen Zuständigkeit.

In den von der Oktoberflut 2023 besonders betroffenen Küstenorten sind Überlegungen zum Küstenhochwasserschutz unterschiedlich weit vorangeschritten. So plant die Stadt Eckernförde bereits seit 2017 eine Verbesserung ihres Küstenhochwasserschutzes. Für den Herbst 2024 ist eine Bürgerbeteiligung zu verschiedenen Lösungsvarianten geplant. Die Stadt Flensburg hatte bereits vor der Oktoberflut 2023 ein Planungsbüro beauftragt und

erste Kontakte zur Küstenschutzverwaltung hergestellt. In Lübeck, Schleswig und Kiel werden seit der Oktoberflut 2023 verstärkt entsprechende Überlegungen angestellt. Wegen der hohen Nutzungsintensität und den vielfältigen lokalen Interessen ist es sinnvoll, dass die Zuständigkeit für den Küstenhochwasserschutz bei den Kommunen verbleibt. Damit wird auch gewährleistet, dass die Kommunen im Sinne der Selbstverwaltung Handlungsspielraum und Flexibilität behalten. Das Land wird erforderliche Maßnahmen im Regelfall mit bis zu 90 % fördern.

Ein adäquater Küstenhochwasserschutz, der auch langfristig bei einem verstärkten Meeresspiegelanstieg funktioniert, stellt eine enorme finanzielle und personelle Herausforderung für Schleswig-Holstein dar. Auch an der Nordseeküste und entlang der Tideelbe ist die Aufrechterhaltung des Küstenschutzes unabdingbar, weshalb ein Umschichten der verfügbaren Finanz- und Personalressourcen zur Umsetzung der oben beschriebenen zusätzlichen Maßnahmen keine Option ist. Aus diesem Grund hat die Landesregierung 2024 trotz finanzieller Engpässe 15 neue Stellen in der Küstenschutzverwaltung geschaffen; weitere sollen mittelfristig folgen.

Die in Kapitel 2 dargestellten Auswirkungen der sehr schweren Sturmflut von Oktober 2024 an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste zeigen erneut auf, dass die Küste eine hochdynamische Landschaft darstellt, die sich nicht ohne Folgen in ein Korsett zwingen lässt. Ein nachhaltiger und naturbasiert Küstenschutz muss sich – auch in Anbetracht des stärkeren Meeresspiegelanstieges – auf Änderungen der Küstenkonfiguration einstellen. Dies erfordert auch ein Umdenken in der Gesellschaft; der heutige Zustand kann nicht „zementiert“ werden (Jordan et al. 2023). Als wesentliche Konsequenz aus der Oktoberflut wird sich der staatliche Küstenschutz in Schleswig-Holstein daher verstärkt auf den Schutz von hohen Vulnerabilitäten wie Siedlungen fokussieren, um den technischen und finanziellen Aufwand in einem gesellschaftlich und ökologisch vertretbaren Rahmen zu halten.

6 Literaturverzeichnis

- Averes, T.; Hofstede J. L. A.; Hinrichsen, A.; Reimers, H.-C.; Winter, C.: Cliff Retreat Contribution to the Littoral Sediment Budget along the Baltic Sea Coastline of Schleswig-Holstein, Germany. In: *J. Mar. Sci. Eng.* 9, 870, <https://doi.org/10.3390/jmse9080870>, 2021.
- Bruun, P.: The Bruun Rule of Erosion by Sea-Level Rise: A Discussion on Large-Scale Two- and Three-Dimensional Usage. In: *Journal of Coastal Research*, 4/4, 627–648, 1988.
- De Moel, W. P. J.; Aerts, J. C. J. H.: How are flood risk estimates affected by the choice of return-periods? In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 3181–3195, <https://doi.org/10.5194/nhess-11-3181-2011>, 2011.
- Hirschhäuser, T.; Blümel, M.; Dey, T.; Thiesen, H.; Peters, J.; Christiansen, L.; Franz, B.: Die Ostseesturmflut Oktober 2023 in Schleswig-Holstein. In: *Die Küste*, 94, 2024.
- Hofstede, J. L. A.: Update of the Schleswig-Holstein State master plan for coastal flood defense and coastal protection with a focus on climate change adaptation. In: *Die Küste*, 91, 1–22, 2022.
- Hofstede, J. L. A.: Status and prospects of nature-based solutions for coastal flood and erosion risk management in the Federal State of Schleswig-Holstein, Germany. In: *Journal of Coastal Conservation*, <https://doi.org/10.1007/s11852-024-01042-5>, 2024.

IAWG: Regionalisierung der statistischen Sturmflutwasserstände an der West- und Ostküste Schleswig-Holsteins - Nachführung 2018/2019/2020. Unveröffentlichtes Gutachten des IAWG (Ingenieurhydrologie, Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik) im Auftrag des LKN.SH, 2020.

IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/, zuletzt geprüft am: Juni 2022.

Jordan, P.; Döring, M.; Fröhle, P.; Ratter, B. M. W.: Exploring past and present dynamics of coastal protection as possible signposts for the future? A case study on the Islands of Amrum and Föhr in the North Frisian Wadden Sea (GER). In: Journal of Coastal Conservation, 27:2. <https://doi.org/10.1007/s11852-022-00921-z>, 2023.

KFKI (Kuratorium für Forschung im Küstingenieurwesen, Hrsg.): 1872 – An exceptional storm surge in the Baltic. In: Die Küste, 92, <https://doi.org/10.18171/1.092100>, 2022.

Kiel aktuell: Absperrung an der Steilküste in Schilksee. <https://kielaktuell.com/2020/04/08/absperrungen-in-schilksee-sued/>, zuletzt geprüft am: 16.12.2024.

MELUND: Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein – Fortschreibung 2022. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein, Kiel, 2022.

Nordstrom, K. F.: Living with shore protection structures: A review. In: Estuarine, Coastal and Shelf Science, 150 (A), 11–23, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.11.003>, 2014.

Nöthel, H.; Neemann, V.; Hausmann, L.; Bauerhorst, H.; Schwuchow, N.: Ablauf der Ostseesturmflut im Oktober 2023. In: Die Küste, 94, 2024.

Ranasinghe, R.; Callaghan, D.; Stive, M. J. F.: Estimating coastal recession due to sea level rise: beyond the Bruun rule. In: Climatic Change, 110, 561–574, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0107-8>, 2012.

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

Jürgen Holfort¹

¹ Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, juergen.holfort@bsh.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 Wasserstands situationen (z. B. Sturmfluten oder die Schiffahrt 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 Pegelnulpunkt +500 cm. In der praktischen Anwendung entspricht dies an der Ostseeküste dem Seekartennull (SKN), obwohl nicht alle individuellen Pegelnulpunkte 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 Miehlke 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).

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

Insbesondere bei Extremlagen werden zusätzlich aktuelle Windmessungen und neuere und/oder weitere meteorologische Vorhersagen hinzugezogen, die über das Ninja-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 Stundenvierte des gemessenen Wasserstands nur in maximal 5 % aller Tage mehr als $+/-10$ 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 $+/-20$ 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 (zehnminütige 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 einer Offsetkorrektur nicht zu korrigieren war.

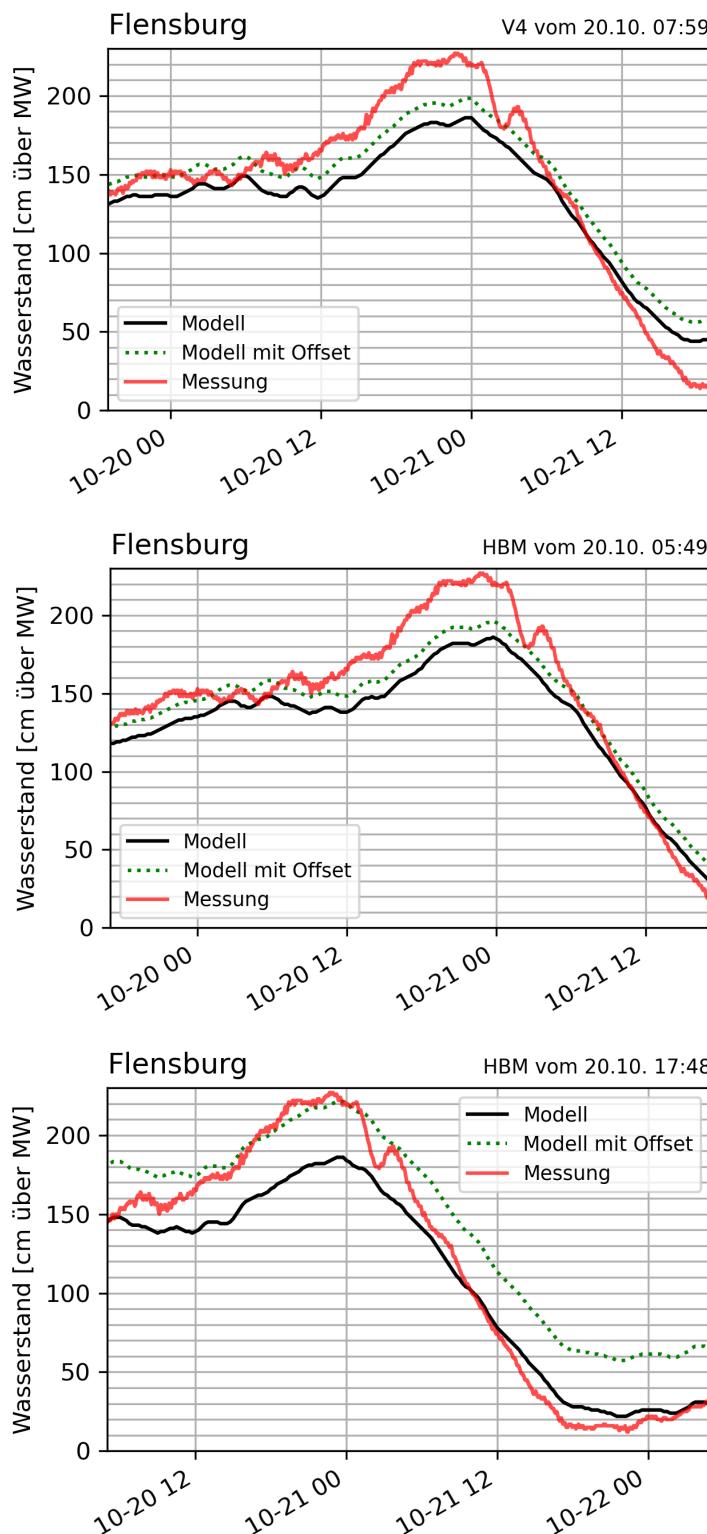


Abbildung 2: Gemessene Wasserstände bei Flensburg (rot) zusammen mit Modelldaten (schwarz) und um einen Offset (der nur aus der Differenz der letzten 6 Stunden berechnet wurde) korrigierten Verlauf der Modelldaten (grün gepunktet). Dies sind Nachberechnungen, während der Sturmflut wurden im Allgemeinen 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 Schlei

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).

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 dritt längste 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 Bodden Gewässern 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.

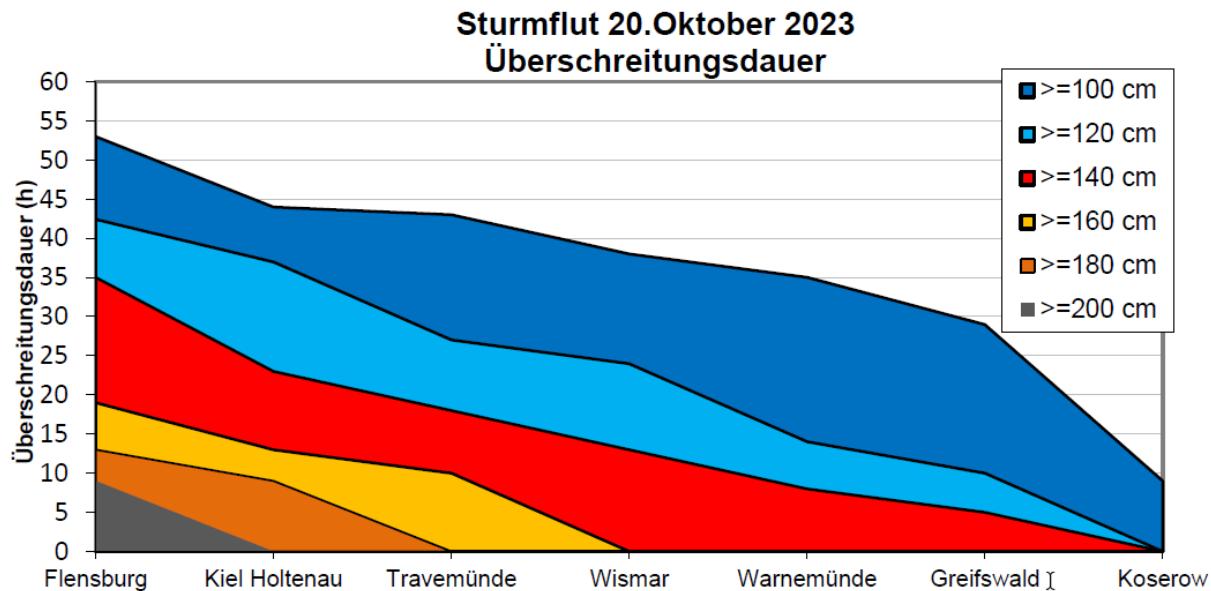


Abbildung 3: Überschreitungsdauer von verschiedenen Wasserständen entlang der deutschen Ostseeküste während der Sturmflut vom 19./20.10.2023.

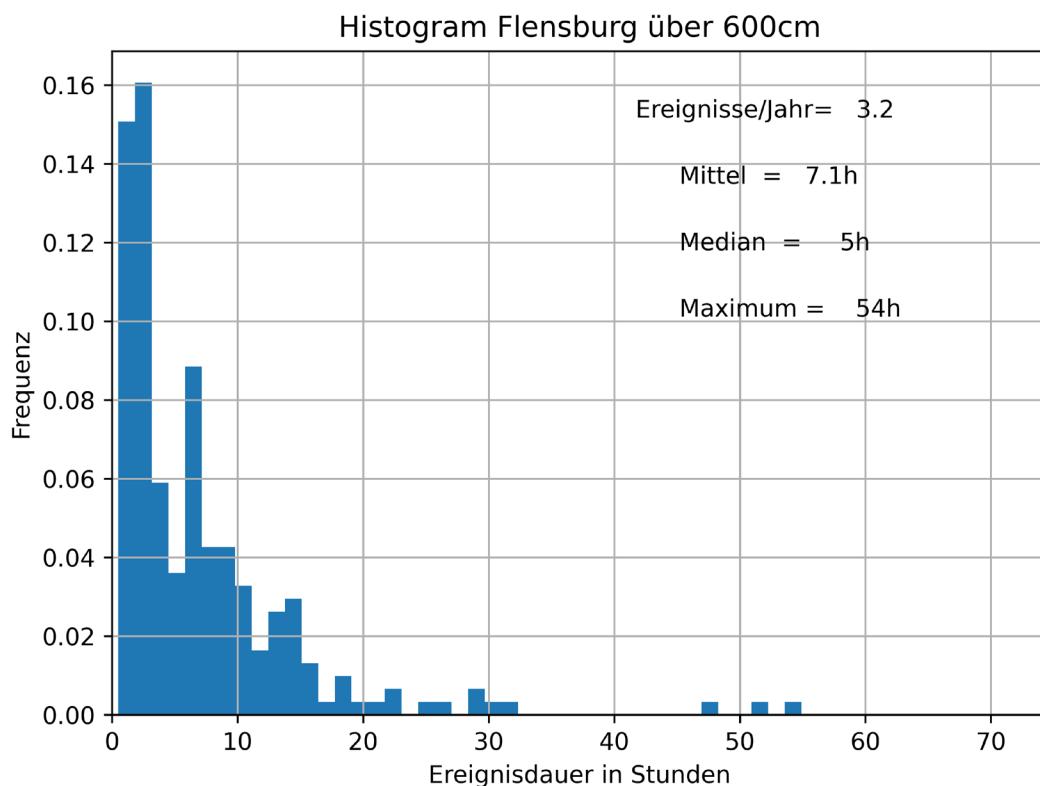


Abbildung 4: Histogramm der zeitlichen Dauer von Sturmfluten in Flensburg (Dauer über einem Wasserstand von +100 cm aus stündlichen Daten) ab 1955.

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 (~625 km², aus LandSH 2004) solche Niederschläge fielen und alles direkt in die Schlei (mit einer Fläche von ~54 km²) abfließt und dort verblieben wäre, kämen noch zusätzlich ~67 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 +/−20 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 einen 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 $+/-10\%$, 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://opendata.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, 2004.

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

The Baltic storm surges of 1872 and 2023 – what do they have in common?

Elke M.I. Meyer¹, Lidia Gaslikova², Nikolaus Groll² and Ralf Weisse²

¹ Institute of Coastal Systems - Analysis and Modeling, Helmholtz-Zentrum Hereon, 21502 Geesthacht, Germany, elke.meyer@hereon.de

² Institute of Coastal Systems - Analysis and Modeling, Helmholtz-Zentrum Hereon, 21502 Geesthacht, Germany

Summary

The Baltic Sea storm surge of 20 October 2023 was one of the highest observed on the east coast of Schleswig-Holstein. The storm of 13 November 1872 is still the highest recorded one in the western Baltic Sea in the last two centuries. In Flensburg, a water level of 3.31 m during the November 1872 event and 2.27 m in October 2023 were observed. Both storm events occurred in autumn and are characterised by a similar atmospheric weather situation with a stationary high pressure area over Scandinavia and a low pressure area over Central Europe. This led to a strong pressure gradient over the western Baltic Sea and resulted in strong easterly winds with up to 30 m/s at Lighthouse Kiel and particularly high wind surges, which in both cases challenged the coastal protection at the east coast of Schleswig-Holstein.

Keywords

severe storm surge Baltic Sea, similar weather situation, strong pressure gradient over the western Baltic Sea, DWD reconstruction 1872

Zusammenfassung

Die Ostseesturmflut vom 20. Oktober 2023 war eine der höchsten, die an der Ostküste Schleswig-Holsteins beobachtet wurde. Der Sturm vom 13. November 1872 ist nach wie vor die höchste beobachtete Sturmflut in der westlichen Ostsee in den letzten zwei Jahrhunderten. In Flensburg wurde im November 1872 ein Wasserstand von 3.31 m gemessen und im Oktober 2023 wurden 2.27 m maximaler Wasserstand gemessen. Beide Sturmereignisse ereigneten sich im Herbst und sind durch eine ähnliche atmosphärische Wetterlage mit einem stationären Hochdruckgebiet über Skandinavien und einem Tiefdruckgebiet über Mitteleuropa gekennzeichnet. Diese Situationen erzeugten einen starken Luftdruckgradienten, welcher zu starkem Ostwind mit bis zu 30 m/s am Leuchtturm Kiel sowie über der westlichen Ostsee mit hohem Windstau führten, die den Küstenschutz im Osten Schleswig-Holsteins herausforderten.

Schlagwörter

Schwere Sturmflut Ostsee, Ähnliche Wetterlagen, Starker Luftdruckgradient über der westlichen Ostsee, DWD-Rekonstruktion 1872

1 Introduction

In this paper, we analyse and compare the most recent prominent storm surge event in the western Baltic Sea, which occurred on 20 October 2023, with one of the most extreme storm surge events since the beginning of the records in the region, the storm of 13 November 1872. Both events were considered as at least severe storm surges (BSH 2023) with disastrous damage at the east coast of Schleswig-Holstein and in Denmark as well as in Sweden (Kiesel et al. 2024). The main focus is on the comparison of atmospheric conditions as the key driver for these events in search for commonalities and differences in the underlying processes but also the resulting water levels are discussed.

The storm of 1872 remains in the collective memory in the region as a disastrous event, and even 150 years later, the knowledge of flooded regions and the resulted damage, e.g. labelled by flood marks in Denmark and Germany (Hallin et al. 2021) is present. The severe storm surge 1872 has already been intensively investigated (Rosenhagen and Bork 2009, KFKI 2022). In particular, the works of Baensch (1875) and Colding (1881) were seminal, because they collected, sorted and categorised the data on a holistic way for the first time and shortly after the event. In contrast to the recent event of 2023, where numerous observational data of water levels as well as atmospheric parameters like wind vectors or sea-level pressure are available, the data for the event 1872 were scarce. Very few records of observed water levels from the gauges were accessible and additionally their consistency suffered from the changing gauge reference system over the time (Baerens et al. 2003). Thus, several estimates of maxima water levels for the 1872 event exist in the literature as summarized by Mudersbach and Jensen (2009), showing the peak water level, for example in Flensburg (Table 1 and Figure 1), reaching between 3.08 m and 3.31 m. Despite some uncertainties it can be stated that the peak water levels reached during the 1872 event remain unrivalled for the entire south-western Baltic coast and represent an important benchmark for the coastal safety management (MELUR 2022).

During the storm surge on 20 October 2023, the second highest water level in the observation since 1872 was registered with 2.27 m above mean water level (MW) in Flensburg and 2.15 m in Eckernförde (Table 1 and Figure 1). In the southern parts of the German Baltic Sea the water levels in October 2023 were not as high compared to water levels from previous storm surge events, placing the 2023 surge events within the highest 11 observed events for Travemünde and Warnemünde. Before October 2023, the storm surge event of 31 December 1904 was the second highest in the records, especially in the western Baltic Sea, with peak water levels of 2.23 m in Flensburg and 2.12 m in Eckernförde above mean water level (DGJ 2005, DGJ 2022, WSV 2023). This event is often not included in the long-term analysis of water level extremes in the Baltic Sea and in the return value estimates (e.g. Kiesel et al. 2023, Groll et al. 2024) because the year 1904 is beyond the established atmospheric and consequently hydrodynamic reanalysis period and currently available atmospheric data are too scarce to enable the realistic reconstruction of the event. Therefore, we consider it is important to include this event in the discussion of storm surge extremes. It also had more prominent impact in the south-western Baltic Sea, with peak water levels reaching 2.63 m in Travemünde and 1.90 m above mean water level (MW) in Warnemünde (Table 1).

Table 1: Observed peak water levels for the storm surge events 13 November 1872, 20 October 2023 and selected highest surge events at the German Baltic Sea coast. Modelled peak water levels for the 2023 event. The data are presented in their original and were not corrected to the change of the gauge reference level from MW to the base height level (Normalhöhennull (NHN), Deutsche Haupthöhennetz (DHNN2016) or Normal Amsterdams Peil (NAP), for more details on the reference differences see Mudersbach and Jensen (2009) and Bork et al. (2022).

Event	13.11.1872	13.11.1872	13.11.1872	31.12.1904	20.10.2023	20.10.2023
Data source	Baensch 1875	Baerens 1998	Mudersbach and Jensen 2009	DGJ, 2005 & Stigge (1994)	WSV, 2023	Model
	[m MW]	[m MW]	[m NN 2006]		[m DHNN2016]	[m NAP]
Flensburg	3.31	3.08	3.27	2.23	2.27	2.1
Schleimünde	3.44	3.21	-	2.11	2.07	1.9
Eckernförde	-	3.15	3.40	2.12	2.15	1.9
Kiel-Holtenau	3.17	2.97	3.30	2.25	1.95	1.83
Travemünde	3.32	3.30	3.15	2.63	1.79	1.62
Wismar	-	2.84	2.97	2.28	1.57	1.61
Warnemünde	-	2.45	2.70	1.90	1.50	1.53
Greifswald	2.64	2.66	2.79	2.39	1.51	1.38

Event	04.01.1954	15.02.1979	13.01.1987	03.11.1995	01.11.2006	04.01.2017	02.01.2019
DHNN2016 = m NAP							
Flensburg	1.81	1.81	-	1.81	1.72	1.79	1.68
Schleimünde	1.6	1.81	-	1.82	1.65	1.64	1.6
Eckernförde	1.75	1.84	-	1.98	1.67	1.7	1.64
Kiel-Holtenau	1.8	1.93	1.72	1.97	1.75	1.69	1.67
Travemünde	1.99	1.78	1.75	1.81	1.7	1.71	1.73
Wismar	2.07	1.62	1.72	2.01	1.81	1.82	1.90
Warnemünde	1.74	1.31	1.44	1.62	1.64	1.62	1.69
Greifswald	1.87	-	1.46	1.82	1.45	1.68	1.70

The storm surge event of 20 October 2023 has been described and investigated in recent reports and publications (BSH 2023, Kiesel et al. 2024 and Groll et al. 2024). Kiesel et al. (2024) offered a description of the storm surge event and a comprehensive discussion on the storm impact at the coast, looking at different aspects of the related flood risks based on the observational data. In particular, the variability and the shape of hydrographs was mentioned as an important factor influencing the duration of the flood wave and the extent of the flooding. They emphasized the localized effect of this particular storm, with strong easterly winds leading to much higher water levels in the western part of the Baltic Sea and moderate increases in the south-western part. The authors debated the simultaneous

exposure and questioned the necessity to consider spatial dependency for large-scale risk assessments.

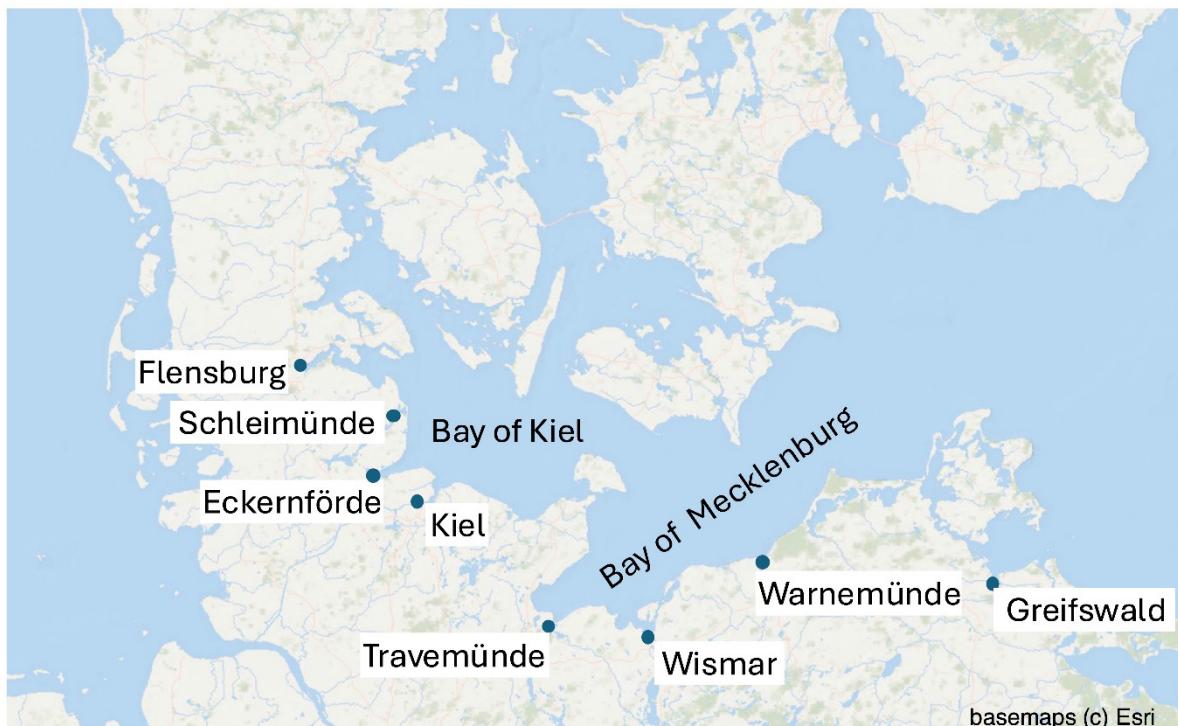


Figure 1: Map of the investigated locations in the Baltic Sea.

Groll et al. (2024) put the event of 20 October 2023 in the context of other recent storm surge extreme events in the region, namely the storms from 04–05 January 2017 and 02 January 2019, as well as more generally in a climate perspective of the past 65 years. They used reanalysis data and calculated water levels for the period from 1958 until 2023 looking at the different components contributing to the total extreme water level. In particular, they estimated the impact of prefilling on the water levels during the events. Prefilling is an increased amount of water in the Baltic Sea happening on the timescales of days to weeks due to an additional inflow from the North Sea associated with the persistent westerly winds (Lehmann and Post 2015). A strong prefilling could alter the total water level by several decimetres, if it occurred before the storm surge event. For the 2023 event both studies concluded that the prefilling prior to the storm was present, and this condition contributed about 25 cm (20–50 cm) to the peak water levels. Contrarily, for the storm 1872 Bork et al. (2022) concluded that there was no impact of prefilling of the Baltic Sea on the water level at the German Baltic Sea coast.

In the following, we compare and discuss the atmospheric situations during the 1872 and 2023 events in chapter 2. In chapter 3, we compare water level observations for the selected storm events for the south-western Baltic Sea and discuss differences in spatial pattern of the surge distribution based on the water level simulations. We conclude with a discussion of atmospheric patterns associated with the storm surge extremes and how the considered two events fit into the multi-decadal statistics.

2 Atmospheric situations in 1872 and 2023

The atmospheric situation for the 1872 storm event was already reconstructed and described in detail by several authors e.g. Baensch (1875), Colding (1881), Rosenhagen and Bork (2009), Bork et al. (2022). Rosenhagen and Bork (2009) used the pressure and temperature data from 230 weather stations to reconstruct the weather situation within two weeks prior to the storm surge event. Thus, their weather charts are based on a higher density of weather station data than older ones or any current reanalysis products. For the sake of completeness, we summarize the development of the storm here. During 12 and 13 November 1872, a stationary/blocking high pressure system (with maximum sea level pressure of 1047 hPa) was located over middle Scandinavia and a low pressure system over the Lusatia (with minimum sea level pressure of 990 hPa). A strong pressure gradient over the western Baltic Sea caused extreme wind speed over the Baltic Sea (Rosenhagen and Bork 2009, Figure 2a). The relative position of the high- and low pressure (high-over-low) systems resulted in strong winds from easterly and north-easterly directions, with wind speeds near Lübeck (close to Travemünde) estimated between 21 m/s and 28 m/s for at least 24 hours on the 12 and 13 November 1872 (originally Baensch 1875). The peak wind speeds reached 30–35 m/s on 13 November (Rosenhagen and Bork 2009). In the reconstruction by Colding (1881) the low pressure system was located more to the south-east over Vienna, Austria, this resulted in a somewhat smaller pressure gradient than estimated by Rosenhagen and Bork (2009). Still, Colding (1881) suggested in agreement with the paper by Baensch (1875), that the strong pressure gradient and the resulting high wind speed generated high wind surge in the Baltic Sea, leading to extremely high water level in the western Baltic Sea. This is supported by the recent study of Bork et al (2022), where the strong winds were named as the main reason for the observed water levels, while other effects like the Baltic Sea prefilling, seiches, etc. were minimal.

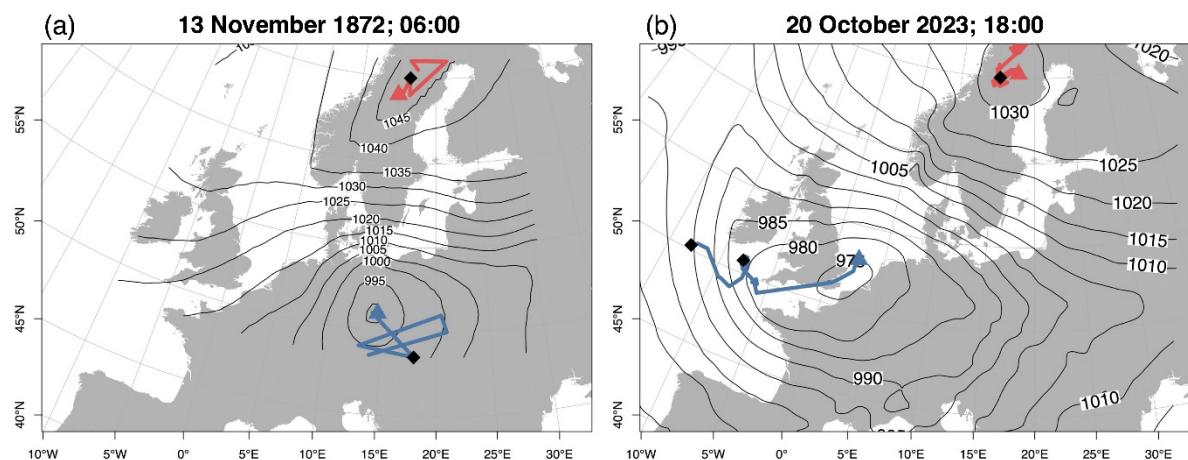


Figure 2: (a) Pressure chart for 13 November 1872 06:00 and tracks of high (red) and low (blue) for 12 November, 06:00 till 13 November 1872, 08:00 period based on the data from Rosenhagen and Bork, 2009. Black diamonds mark midnight. (b) for 19 – 20 October 2023 based on coastDat3 reanalysis.

During the event of October 2023, a high pressure area moved from Svalbard to Scandinavia, became stationary and intensified (~1030 hPa). A low pressure area (~975 hPa) moved from south-western Ireland to southern England and became stationary as well (Figure 2b). Thus, it developed a high-over-low weather pattern, similar to the 1872 event.

A strong pressure gradient built up over northern Germany and resulted in high wind speed (> 20 m/s), reaching the speed of 28 m/s (BSH 2023 and Kiesel et al. 2024) with an easterly wind direction (DWD 2023, Figure 3) at least two days before the water level peak at the east coast of Schleswig-Holstein. Although the wind speed was high during the storm, it was not unprecedented during the past seven decades of historical data (Groll et al. 2024) and it is rather a combination of high wind speed and prolonged easterly direction that was extraordinary.

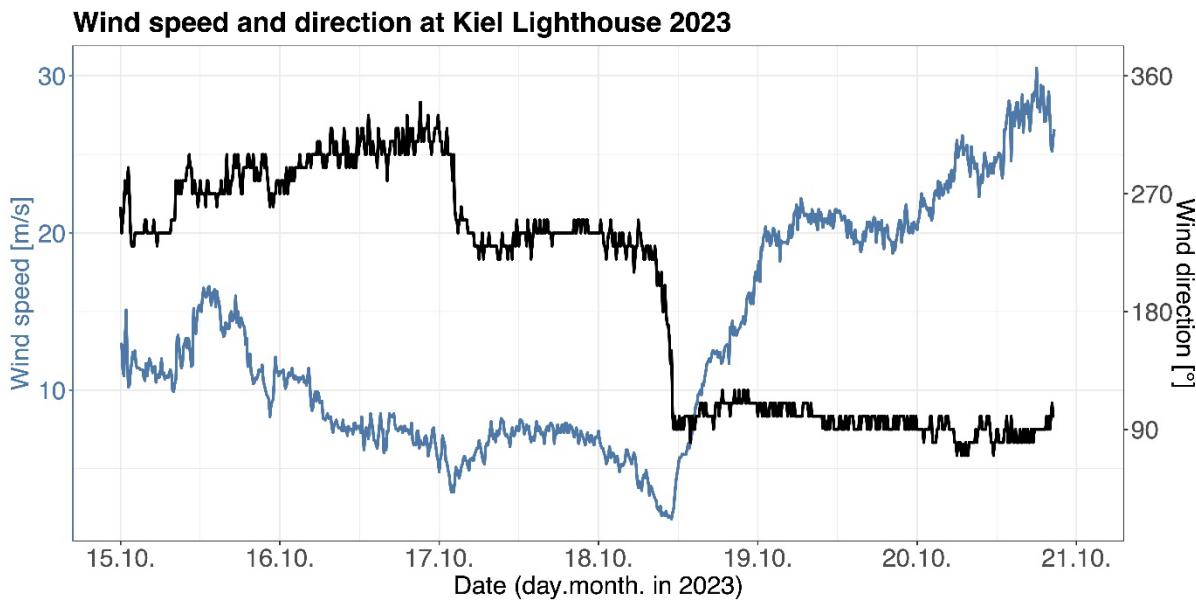


Figure 3: Observed wind speed and direction (10 min) from Kiel Lighthouse for 15-20 October 2023. In the evening of 20 October 2023, the anemometer was broken.

Summarizing, in both situations, 1872 and 2023, very strong pressure gradients developed over the western Baltic Sea. In comparison, the maximum wind speeds were higher during the storm in 1872 storm (up to 35 m/s in 1872 vs. 29 m/s in 2023), although the categorical nature of observations in 1872 as a source of uncertainty must be kept in mind. The duration of strong winds is comparable, with wind speeds rising from over 10 m/s to the maximum within 2 days. The wind directions remain stable in both cases, with easterly-north-easterly winds in 1872 and easterly winds in 2023.

3 Water level records and simulations

Different studies provided slightly varying results for the observed water levels during the 1872 event. Figure 4 and Table 1 summarize the observations estimated by Baensch (1875), Baerens (1998), Mudersbach and Jensen (2009) for different locations along the German Baltic Sea coast. The dataset is complemented with the recent peak water level observations of the 2023 event (WSV 2023). The water levels observed during the storm event of December 1904 (DGJ 2005, Stigge 1994), as an event resulted in second highest recorded water levels after 1872 in parts of the region but usually omitted from the assessments due to the lack of consistent data, are included. To put the records of 1872 and 2023 events in a historical context, peak water level observations for several storm events, which are within the top five recorded events since 1950 for the considered locations, are also included.

Comparing to 1872, the 2023 storm resulted in lower peak surge by 1 m in Flensburg, by 1.36 m in Travemünde and by 1.28 m in Greifswald, using Mudersbach and Jensen (2009) estimations. Comparing to the 1904 event, the surge magnitudes were similar at the north-western part of the German coast (Flensburg and Eckernförde) during 2023, farther to the south the water levels decreased, building up the discrepancy up to 0.88 m (Greifswald). This underlines the localised nature of the 2023 event, whose impact focussed on the western German Baltic Sea coastline, because of the prevailing eastern wind direction during the storm (Figure 3) in contrast to the other two major events. When compared to other high surge events, for the western area (Flensburg, Eckernförde) the events 2023 and 1904 remain unprecedented since 1950, with the next surge events of 1995 and 1979 showing about 0.45 m lower peak water levels. For the south-western part (Bay of Mecklenburg) the event of 2023 was unremarkable, as was mentioned before, but the 1904 remained the second highest surge event since 1872. Some later rivalling storms (e.g. 1954, 1995, 2019) resulted in more than 0.6 m (Travemünde) and more than 0.2 m (Wismar) lower peak water levels. It has to be mentioned, that most of the shown highest events affected the entire south-western Baltic Sea coast except for the events on 13 January 1987 and 15 February 1979 as well as 2023 and 1872 events. The later had a considerable impact in the Bay of Mecklenburg though, still the drop in the surge heights from west to east of the region was about 0.5 m. When the atmospheric situation is considered, both 1979 and 1987 events showed a hint to the high-over-low sea level pressure pattern and north-easterly to easterly winds (not shown) somewhat similar to the 2023 and 1872, whereas during other events (e.g. 1995 or 2019) the prevailing northerly winds were observed (e.g. Groll et al 2024).

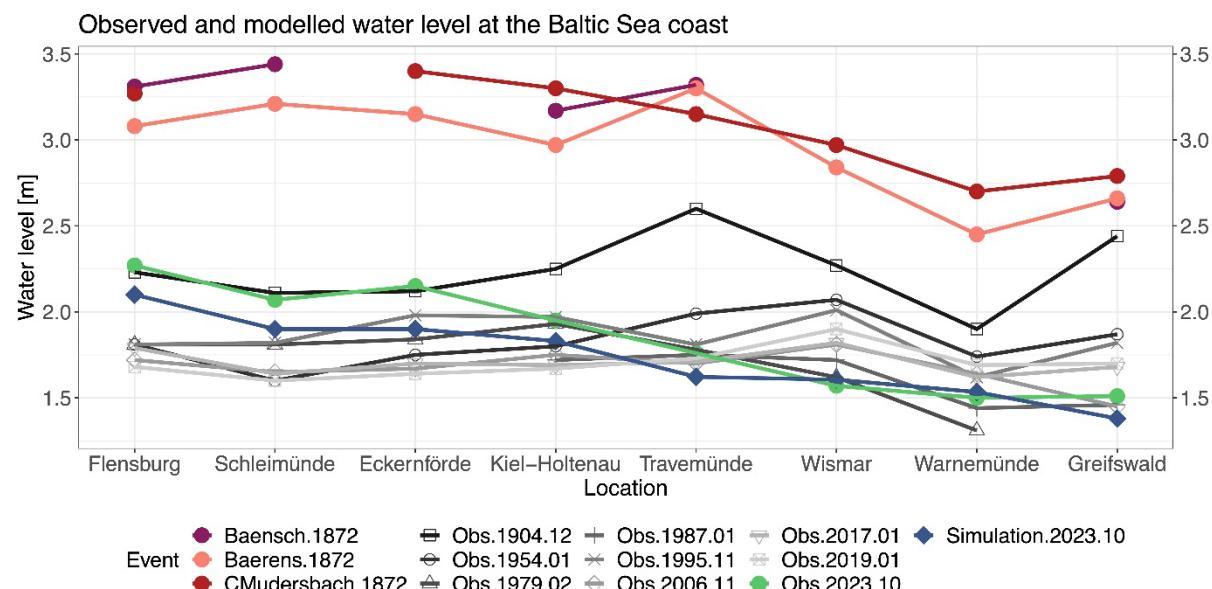


Figure 4: Peak water levels observed during selected major surge events and modelled for 2023 at the German Baltic Sea coast, from north to south and west to east. See also Figure 1 for the location.

To look more consistently at the spatial extent and distribution of the surge related to the 2023 storm, a hydrodynamic water level simulation with the model TRIM-NP (Casulli and Cattani 1994, Kapitza 2008) was used. The hydrodynamic model has already been used to investigate e.g. storm surge events and prefilling processes in the Baltic Sea (Groll et al.

2024, Weisse and Weidemann 2017). The simulation starts on 1 October 2023 to include possible pre-conditions before the storm and ends on 30 October 2023. The atmospheric forcing was used from the Cosmo-CLM simulation (Geyer 2014, Petrik et al. 2021). It is available in hourly temporal resolution and with a spatial resolution of 0.165° . Cosmo-CLM has been used for various atmospheric investigations and is well tested for hydrodynamic applications (e.g. Groll et al. 2024).

In Figure 5b the maximum simulated water level at each grid points during the event 2023 is shown. Consistent with the observations (Figure 4), highest water levels are simulated at the east coast of Schleswig-Holstein and southern Denmark with more than 1.75 m and locally over 2 m at the coast. The predominantly easterly winds provided perfect conditions for building up surge in the Bay of Kiel (Figure 1) with the water being pushed to the northern east coast of Schleswig-Holstein. In line with that, the Bay of Mecklenburg shows lower water levels than the Bay of Kiel with observed peak water levels of 1.79 m for Travemünde and 1.95 m for Kiel (Table 1). Additionally, to the local wind effect, a prefilling prior to the event contributed about 0.25 m (0.2 m–0.5 m) to the total water level (BSH 2023, Groll et al. 2024).

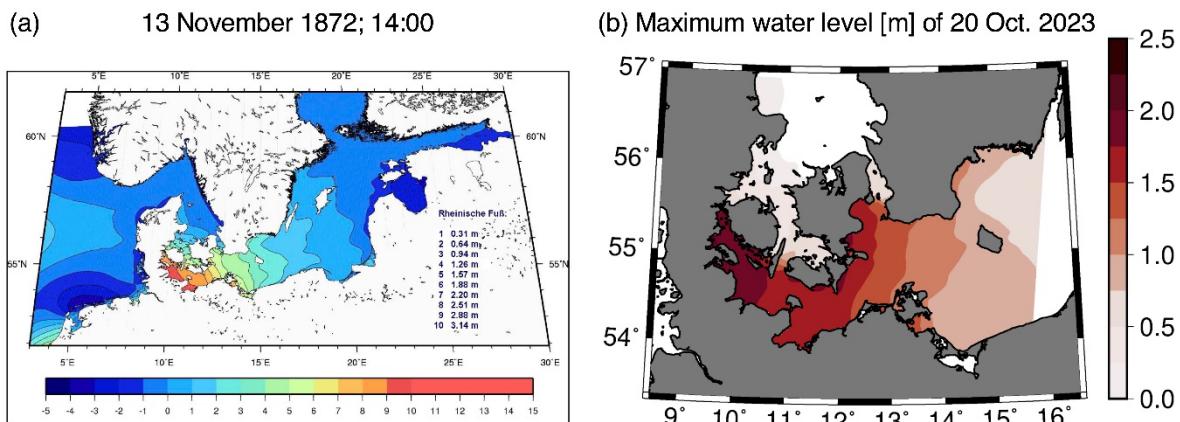


Figure 5: a) Simulation of water level for 13 November 1872, 2pm, converted to Rheinische feet from Bork et al. 2022, Figure (5a); (b) maximum water level during 20–21 October 2023 calculated by TRIM-NP and COSMO-CLM.

For the 1872 event, the results of the water level simulation by Bork et al. (2022) show similar spatial pattern (Figure 5a), although here the simultaneous water level distribution on 13.11.1872 14:00 instead of the peak water levels during the storm is presented. From the reconstruction by Bork et al. (2022) the maximum water levels were estimated by 3.45 m at Flensburg and 3.49 m at Travemünde. In this case, the highest water levels were simulated for the whole east coast of Schleswig-Holstein including the western part of Mecklenburg-Western Pomerania, which agrees with the available observations (Figure 4). Bork et al. (2022) argued that for this event no considerable prefilling was registered and the surge heights occurred mainly due to the regional wind conditions.

4 Conclusion

In this paper we examine and compare two exceptional storm surge events in the western Baltic Sea, one leading to water levels unprecedented and not exceeded in the last 150 years (13 November 1872), another very recent and resulting in the second highest observed

water levels in Flensburg (20 October 2023). Both severe storm surges occurred in autumn and were induced by similar atmospheric situations. Easterly to north-easterly winds persistent during 36 to 48 hours over the Baltic Sea and reaching 30–35 m/s (for 1872) and 29 m/s (for 2023) lead to very extreme increase of water levels in the western part of the Baltic Sea. Both events resulted in the highest surges in the Bay of Kiel with peak water levels about 3.27–3.4 m during 1872 and 1.95–2.27 m during the 2023 event. Both events showed gradually lower water levels further to the east along the German coast, although for the 1872 event the peak water levels in the Bay of Mecklenburg were still remarkably high with 2.7–3.15 m. Although such atmospheric conditions and spatial surge height distributions are not unique, they are still quite rare in the historical data sets and mostly occurred in winter (e.g. 15 February 1979 or 13 January 1987).

We argue that the storm events of 1872 and 2023 had similar large-scale atmospheric situation leading to high-impact surge events in the western Baltic Sea. Both surge events were caused by strong easterly winds. These were induced by a particular atmospheric situation over Europe, known as a high-over-low situation. This refers to a weather situation in which a relatively stable high pressure system is located over Scandinavia and a low pressure system is located to the south (central to western Europe). Variations in the exact location of the high and low pressure systems, as well as the overall pressure gradient, trigger the exact wind field (speed and direction). This causes different water levels at different locations along the Baltic Sea coast. The 1872 event still shows the almost perfect storm conditions for extreme water levels along the western Baltic Sea. The 2023 event, however, shows that even less perfect high-over-low situations can lead to dramatic water levels along the western Baltic Sea. This indicates that high-over-low situations are a potential threat for high water levels along the western Baltic Sea coast, especially for the stretch from Travemünde to Flensburg and the surrounding coasts, in Denmark and Sweden. This could be considered for the coastal warning system in this area. The results also show that for the coasts east of Travemünde, extreme water levels are less influenced by high-over-low situations. They are more likely to be influenced by winds with more northerly components.

The unprecedented nature of historical storm surges occurred prior to the established reanalysis period (i.e. before 1948) suggests the need in the modelling efforts going further back in time, for example in the extension of high-resolution atmospheric and hydrodynamic reanalysis for 100–150 years back. This would allow to obtain the consistent surge statistics which encounter the major historic events. Thus, it would make estimates of e.g. return values, one of the relevant parameters for the coastal protection planning, more realistic than those based on the presently widely used data from the past 60–70 years (e.g. Kiesel et al. 2023).

Further investigations are needed for blocking high pressure situations over Sweden with a simultaneous low pressure area nearby (high-over-low situation) and resulting strong pressure gradients over the western Baltic Sea. This investigation is necessary for future coastal protection assessments, e.g. for design of water level and the duration of stability of the protection.

5 Data

WSV 2023: Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, bereitgestellt durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Dies gilt für Erst-, Zweit- und jedwede Nachnutzung.

DWD 2023: Deutscher Wetterdienst: “Based on data from Deutscher Wetterdienst, gridded data reproduced graphically”

6 Acknowledgement

The authors would like to thank Gudrun Rosenhagen (Deutscher Wetterdienst) for providing the 1872 data and Wilfried Wiechmann (Bundesanstalt für Gewässerkunde) for providing the recorded water levels of the Baltic Sea gauges.

7 References

Baensch, O.: Die Sturmfluth an den Ostsee-Küsten des Preußischen Staates vom 12./13. November 1872. Nr. 25, 1875.

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

Baerens, C.; Baudler, H.; Beckmann, B.-R.; Birr, H.-D.; Dick, S.; Hofstede, J. et al.: Die Wasserstände an der Ostseeküste - Entwicklungen - Sturmfluten - Klimawandel 3. Hoch- und Niedrigwasser. In: Die Küste, 66 Sonderheft, 106–216, 2003.

Bork, I.; Rosenhagen, G.; Müller-Navarra, S.: Modelling the extreme storm surge in the western Baltic Sea on November 13, 1872, revisited. In: Die Küste, 92, 163–195. <https://doi.org/10.18171/1.092103>, 2022.

BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie): Schwere Sturmflut vom 20.Oktober 2023; https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/_Anlagen/Downloads/Ostsee_Sturmflut_20231020.pdf; last access: 15.12.2024, 2023.

Casulli, V.; Cattani, E.: Stability, accuracy and efficiency of a semi-implicit method for three-dimensional shallow water flow. In: Computers & Mathematics with Applications, 27, 4, 99–112. [https://doi.org/10.1016/0898-1221\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0898-1221(94)90059-0), 1994.

Colding, A.: Nogle Undersøgelser over Stormen over Nord- og Mellem Europa af 12te - 14de November 1872 og over den derved fremkaldte Vandflod i Østersøen. Avec un résumé en français. In: naturwiderskabelig og mathematisk Afdeling, 1, 4 (6. Raekke), 1881.

DGJ (Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch): Wasserstände und Durchflüsse 2005 für Pegel Mecklenburg-Vorpommerns, 2005.

DGJ (Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch): Wasserstände Schleswig-Holstein, 2022.

Geyer, B.: High-resolution atmospheric reconstruction for Europe 1948–2012: coastDat2. In: Earth System Science Data, 6, 1, 147–164. <https://doi.org/10.5194/essd-6-147-2014>, 2014.

- Groll, N.; Gaslikova, L.; Weisse, R.: Recent Baltic Sea Storm Surge Events From A Climate Perspective. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2664>, (2024, September 9).
- Hallin, C.; Hofstede, J. L. A.; Martinez, G.; Jensen, J.; Baron, N.; Heimann, T. et al.: A Comparative Study of the Effects of the 1872 Storm and Coastal Flood Risk Management in Denmark, Germany, and Sweden. In: *Water*, 13, 12, 1697. <https://doi.org/10.3390/w13121697>, 2021.
- Kapitza, H.: MOPS – A Morphodynamical Prediction System on Cluster Computers (Lecture Notes in Computer Science). In: J.M.L.M. Palma, P.R. Amestoy, M. Daydé, M. Mattoso & J.C. Lopes (Hg.): *High Performance Computing for Computational Science - VECPAR 2008*, Band 5336, 63–68. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92859-1_8, 2008.
- KFKI – Kuratorium für Forschung im Küstingenieurwesen (Hg.): *Die Küste, 92. 1872 – An exceptional storm surge in the Baltic*. <https://doi.org/10.18171/1.092100>, 2022.
- Kiesel, J.; Wolff, C.; Lorenz, M.: Brief Communication: From modeling to reality – Insights from a recent severe storm surge event along the German Baltic Sea coast. <https://doi.org/10.5194/nhess-2024-71>, 2024.
- Kiesel, J.; Lorenz, M.; König, M.; Gräwe, U.; Vafeidis, A. T.: Regional assessment of extreme sea levels and associated coastal flooding along the German Baltic Sea coast. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 2961–2985, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-2961-2023>, 2023.
- Lehmann, A.; Post, P.: Variability of atmospheric circulation patterns associated with large volume changes of the Baltic Sea. In: *Advances in Science and Research*, 12, 219–225, <https://doi.org/10.5194/asr-12-219-2015>, 2015.
- MELUR, Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein – Fortschreibung 2022. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Kiel, 2022.
- Mudersbach, C.; Jensen, J.: Extremwertstatistische Analyse von historischen, beobachteten und modellierten Wasserständen an der deutschen Ostseeküste. In: *Die Küste*, 75, 131–161, 2009.
- Petrik, R.; Geyer, B.; Rockel, B.: On the diurnal cycle and variability of winds in the lower planetary boundary layer: evaluation of regional reanalyses and hindcasts. In: *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 73, 1, 1804294. <https://doi.org/10.1080/16000870.2020.1804294>, 2021.
- Rosenhagen, G.; Bork, I.: Rekonstruktion der Sturmflutwetterlage vom 13. November 1872. In: *Die Küste*, 75, 51–70, 2009.
- Stigge, H.-J.: Die Wasserstände an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns. In: *Die Küste*, 56, 1–23, 1994.
- Weisse, R.; Weidemann, H.: Baltic Sea extreme sea levels 1948–2011: Contributions from atmospheric forcing. In: *Procedia IUTAM*, 25, 65–69. <https://doi.org/10.1016/j.piutam.2017.09.010>, 2017.

Ablauf der Ostseesturmflut vom Oktober 2023

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

¹ Ehemals Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Ostsee, Fachbereich Ersatzinvestitionen und Fachdienste, Fachdienst Gewässerkunde, herwig.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 Schiffahrtsamtes (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 Miehlke 1956).

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

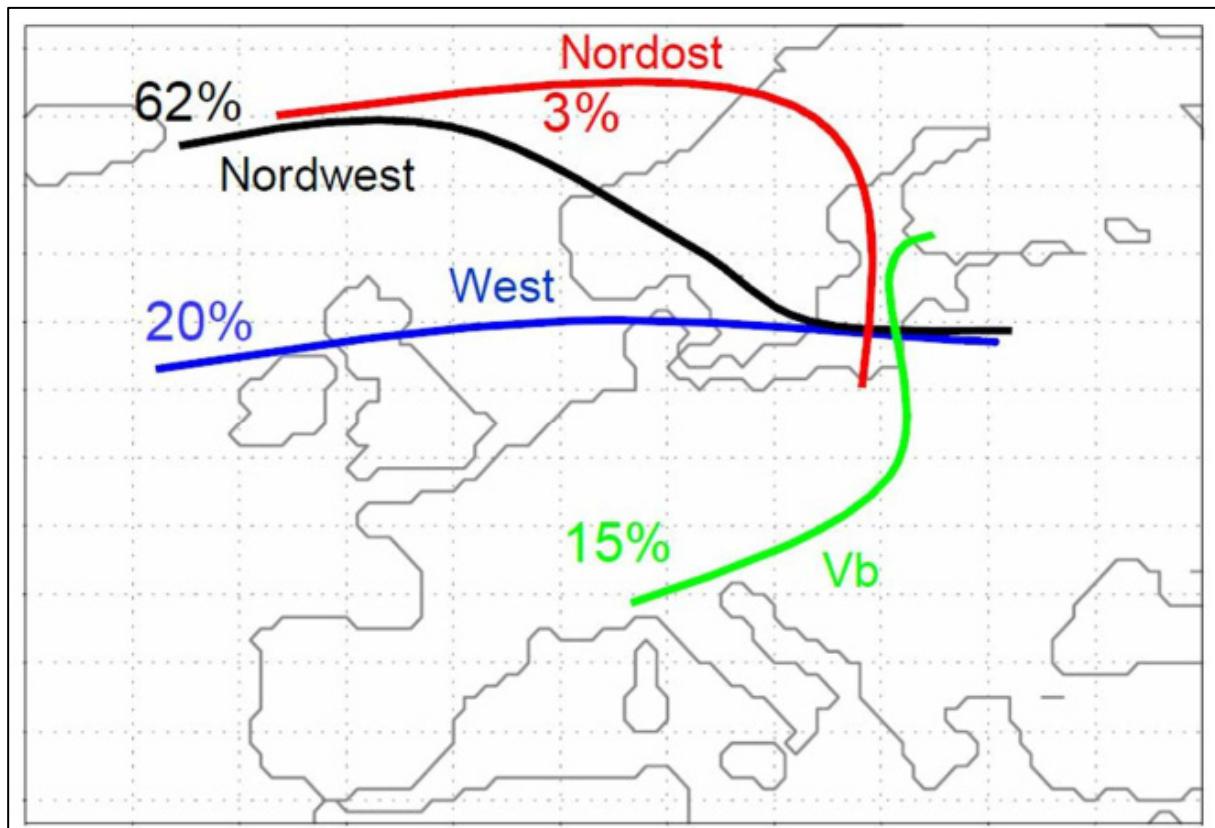


Abbildung 1: Vereinfachte Übersicht der Zugbahnen von Sturmflut auslösenden Zyklo-nen nach Kohlmetz (1964). Wahrscheinlichkeiten nach Meinke (in Hupfer et al. 2003) für die Zeitspanne 1953–1997 für den Pegel Warnemünde (Schmitz 2007) – Abbildung entnommen aus Möller (2011).

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 signifikanter 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.

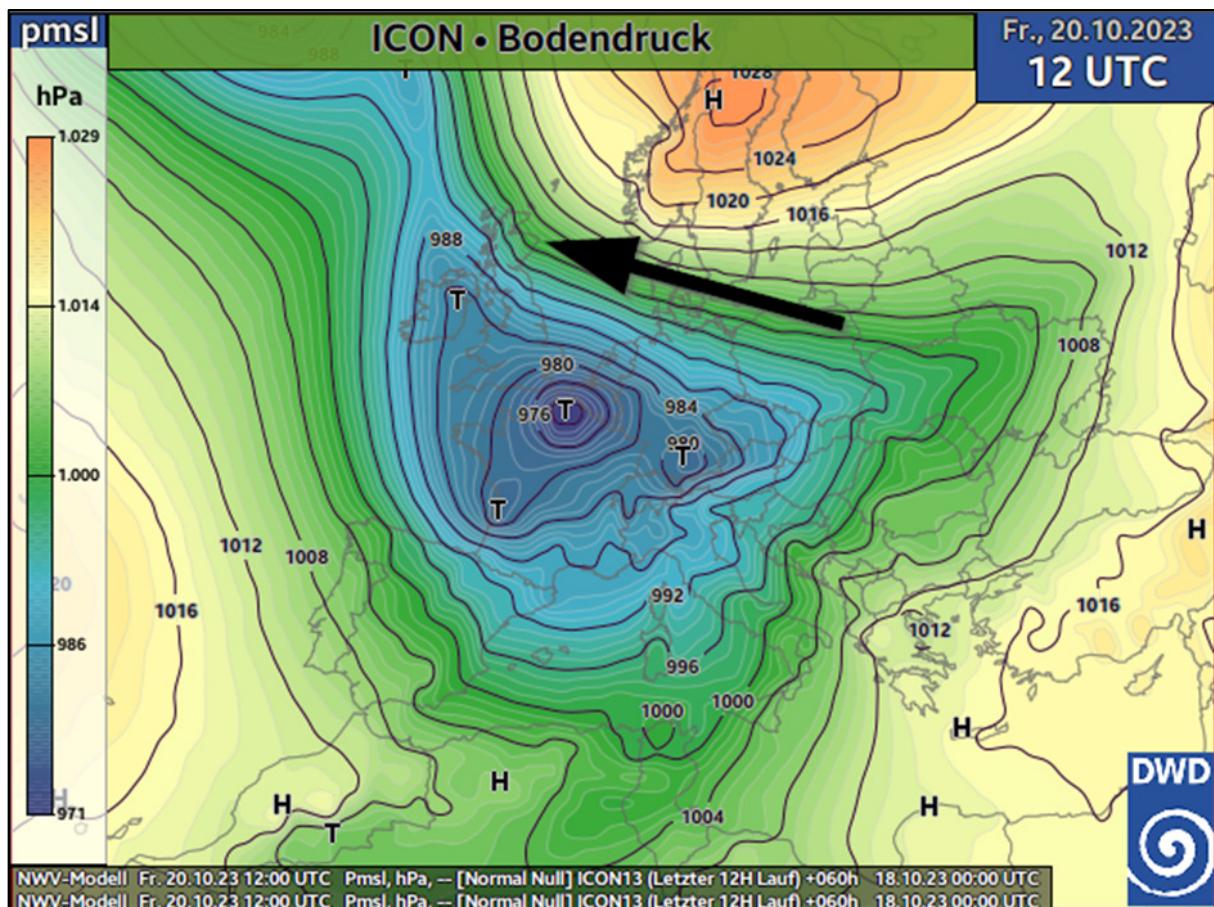


Abbildung 2: Vorhersage des DWD vom 18.10.2023 der Druckgebiete für den 20.10.2023, 13 Uhr MEZ mit einem ausgeprägten Tief im Ärmelkanal/Benelux und einem Hoch über Südskandinavien aus dem Modell des DWD. Der schwarze Pfeil kennzeichnet den auftretenden Wind im Bereich der hohen Luftdruckgegensätze (https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2023/10/18.html).

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).

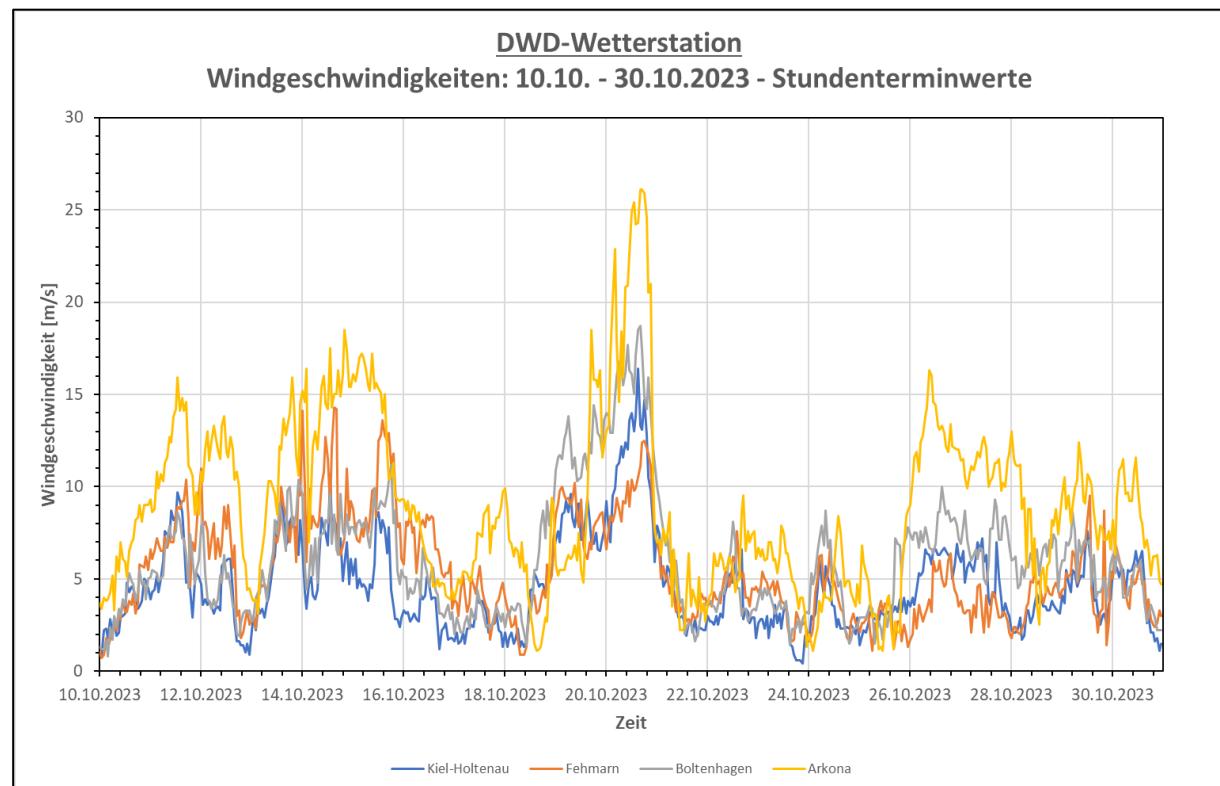


Abbildung 3: Windgeschwindigkeiten aus gemessenen Stundenterminwerten der DWD-Wetterstationen Kiel-Holtenau, Fehmarn, Boltenhagen und Arkona vom 10.10. bis 30.10.2023 (Daten: Deutscher Wetterdienst Hamburg).

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 ($\leq 3,4 - 10,7$ m/s), bei der Station Arkona teilweise bis Stärken von 6 bis 7 Bft ($\leq 10,8 - 17,1$ m/s) erreichten (vgl. Abbildung 3).

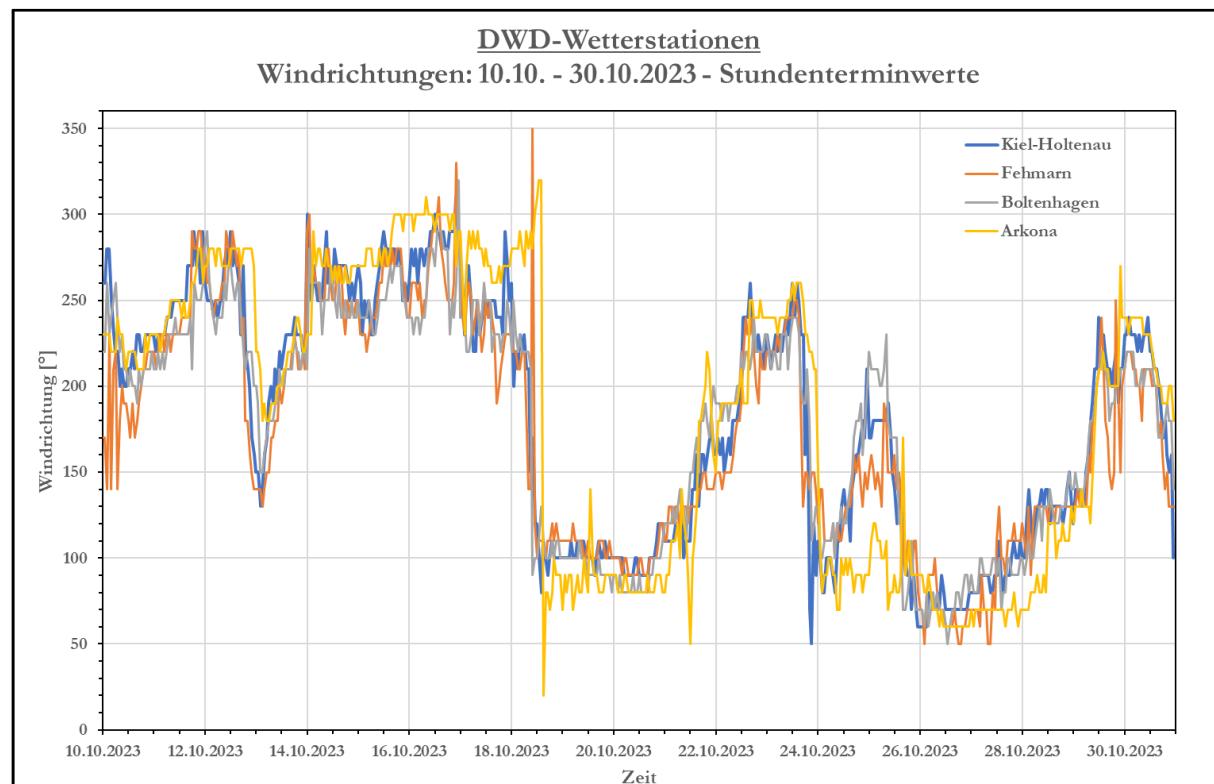


Abbildung 4: Windrichtungen aus gemessenen Stundenterminwerten der DWD-Wetterstationen Kiel-Holtenau, Fehmarn, Boltenhagen und Arkona vom 10. bis 30.10.2023 (Daten: Deutscher Wetterdienst Hamburg).

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 (\leq 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 (\leq 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).

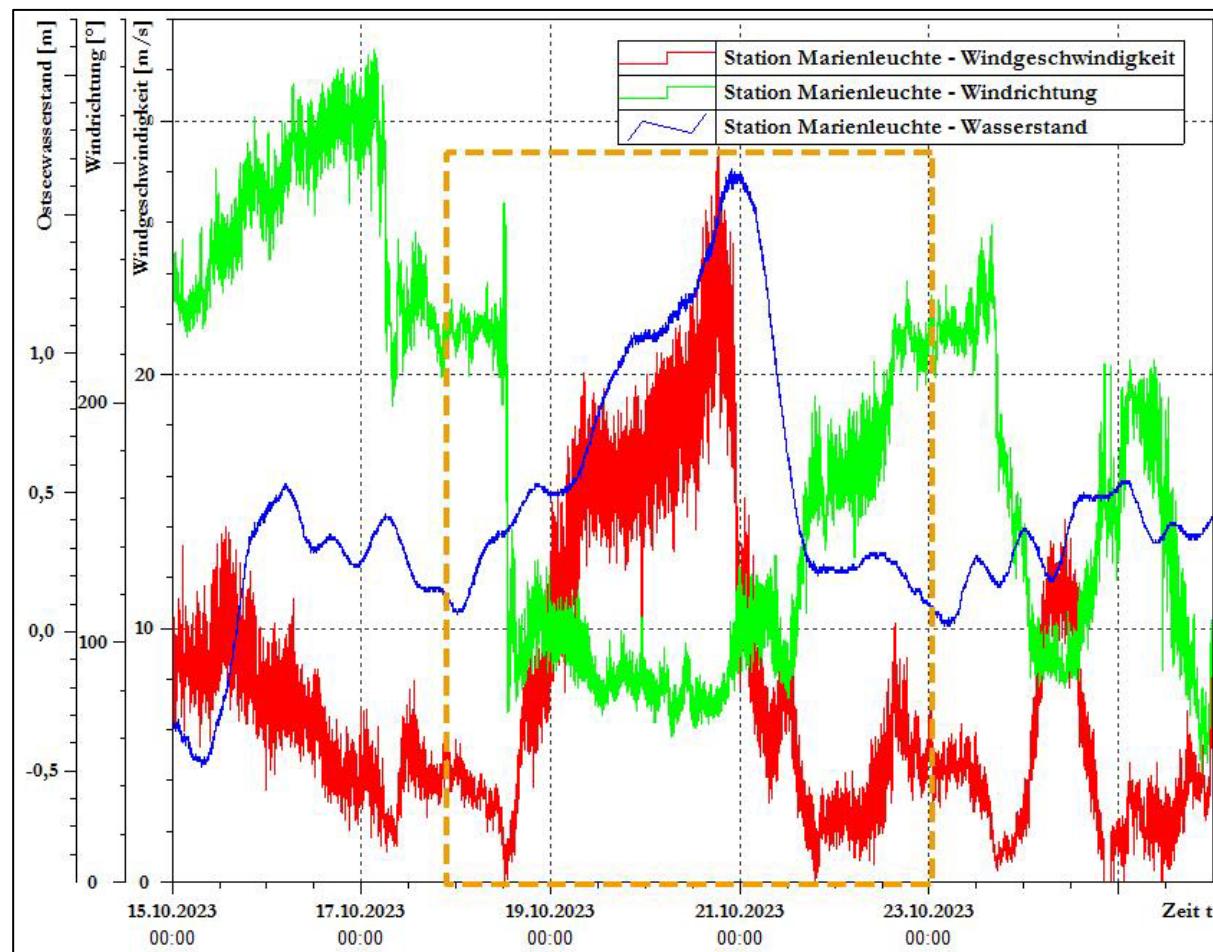


Abbildung 5: An der vom WSA Ostsee betriebenen Station Marienleuchte gemessene Windgeschwindigkeiten und -richtungen sowie Wasserstände (Ostseewasserstand in m über NHN (System DHHN2016)) vom 15. bis 25.10.2023. Die gestrichelte Umrandung umfasst den Zeitbereich mit den wesentlichen, während der Sturmflut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

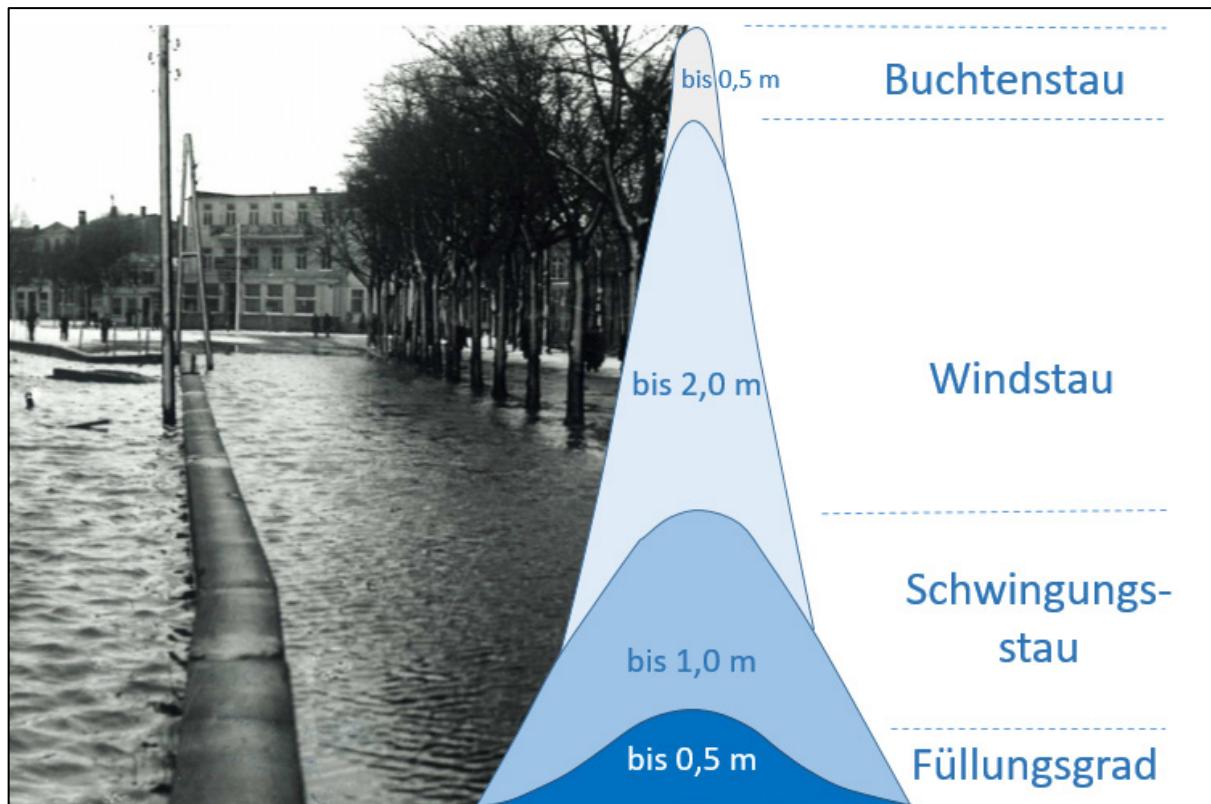


Abbildung 7: Entstehungsursachen von Sturmfluten in der Ostsee (Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern Übersichtsheft 2009).

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 Pegelnulnpunkte 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).

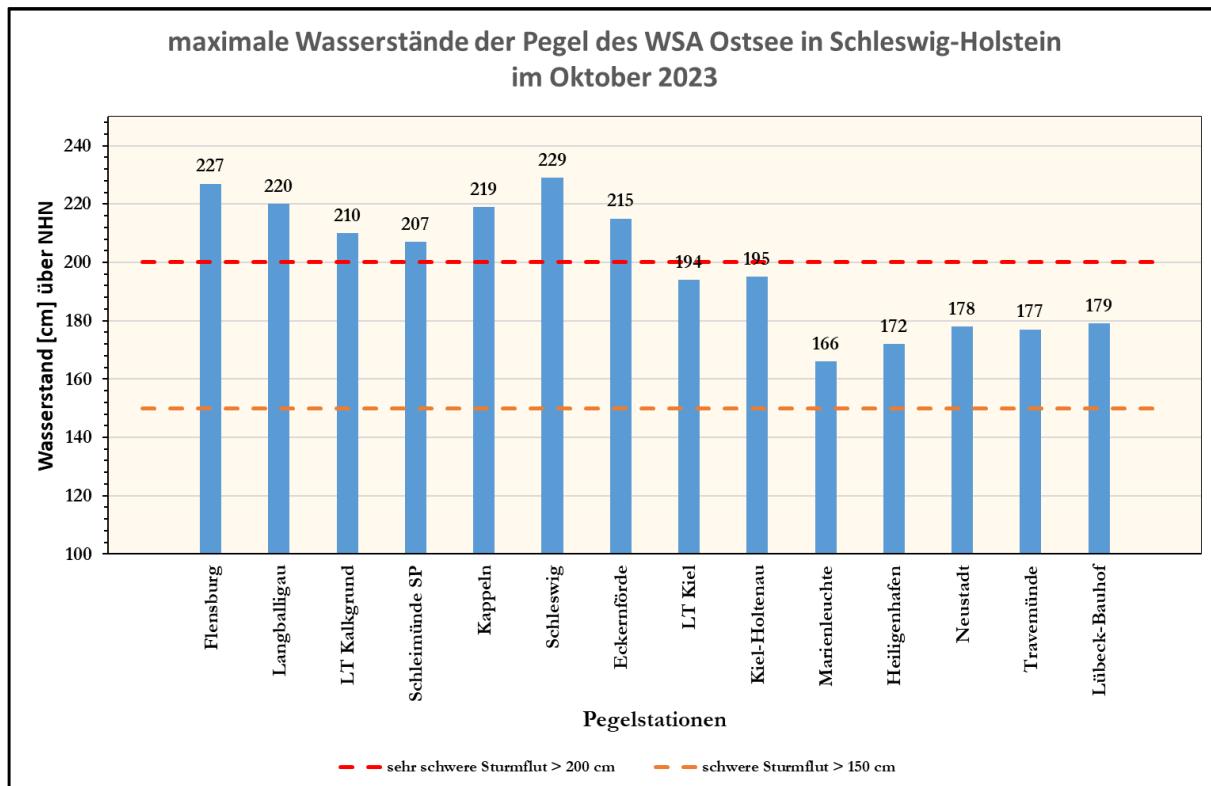


Abbildung 8: Maximale Wasserstände der in Schleswig-Holstein liegenden Pegel des WSA Ostsee im Oktober 2023, Sturmflutklassifikation gemäß BSH (bezogen auf den vom BSH festgelegten mittleren Wasserstand von 500 cm über dem Pegelnullpunkt).

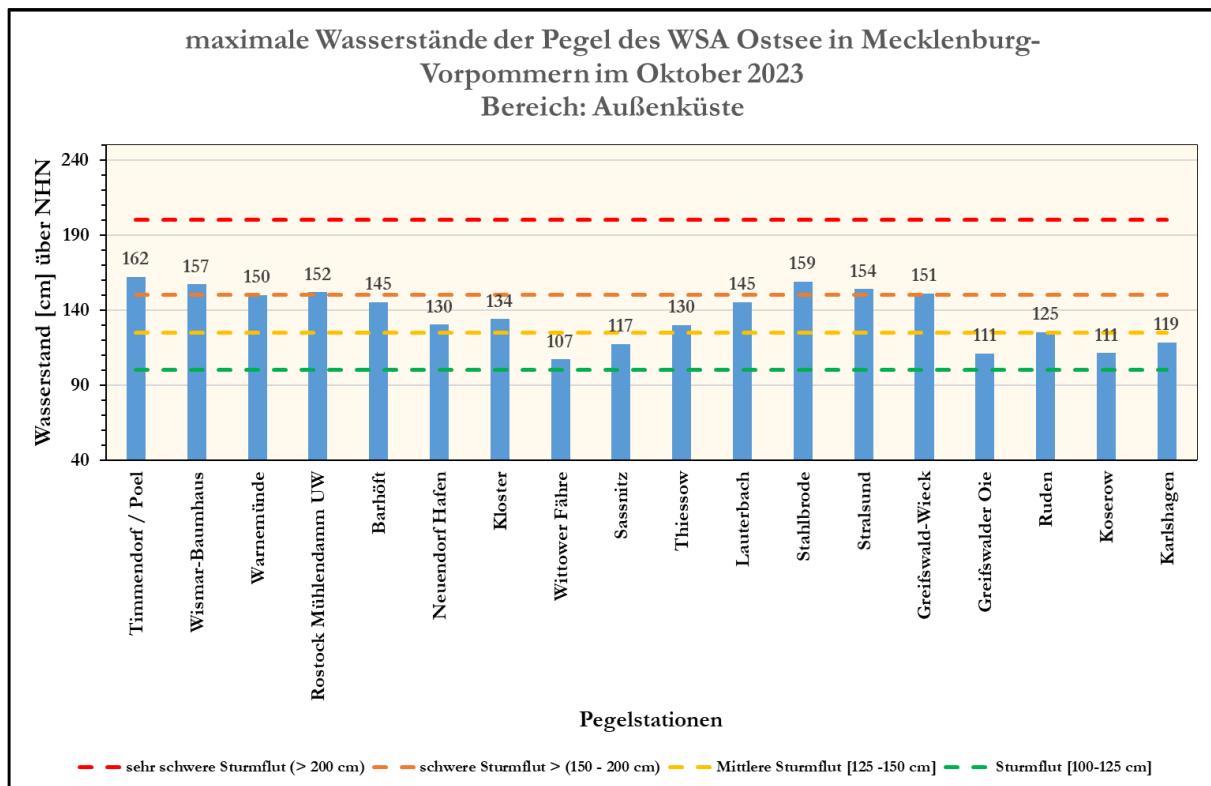


Abbildung 9: Maximale Wasserstände der an der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern liegenden Pegel des WSA Ostsee im Oktober 2023, Sturmflutklassifikation gemäß BSH (bezogen auf den vom BSH festgelegten mittleren Wasserstand von 500 cm über dem Pegelnullpunkt).

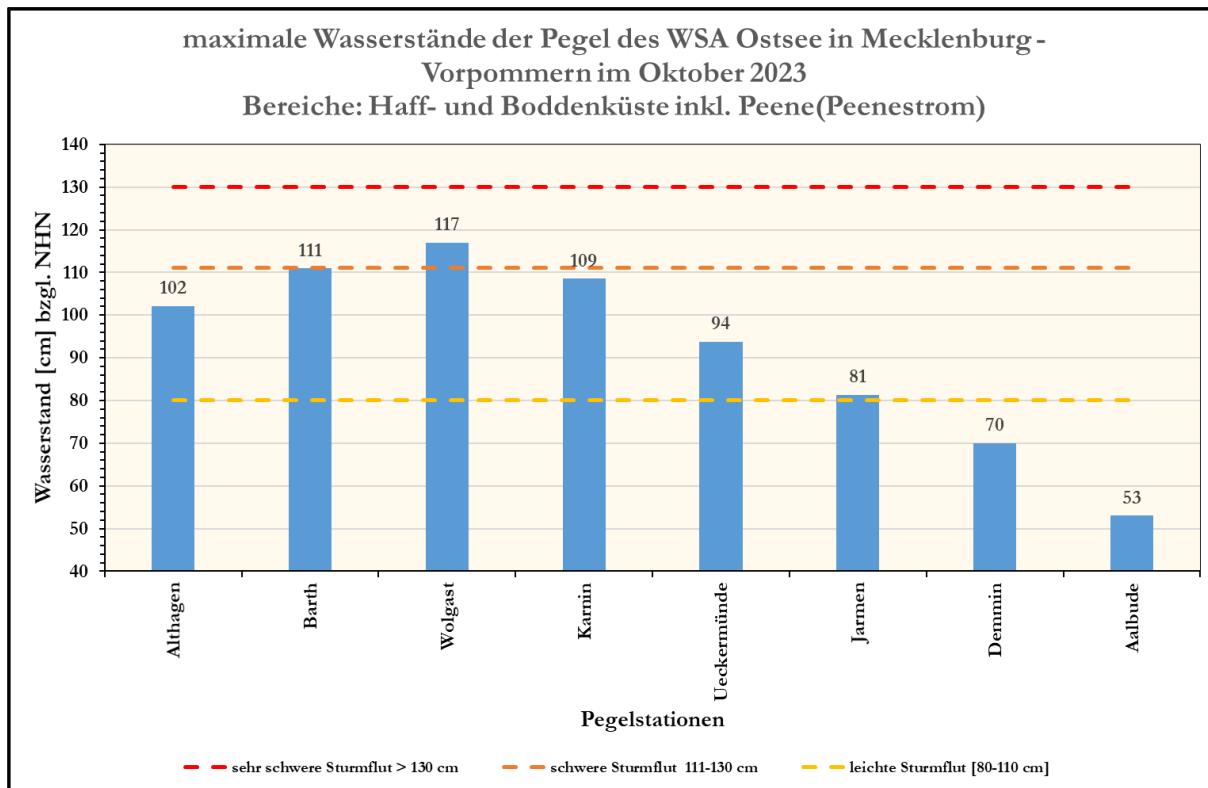


Abbildung 10: Maximale Wasserstände der an der Haff- und Boddenküste von Mecklenburg-Vorpommern inkl. Peene(strom) liegenden Pegel des WSA Ostsee im Oktober 2023, Sturmflutklassifikation gemäß Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern 1995 (bezogen auf einen mittleren Wasserstand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

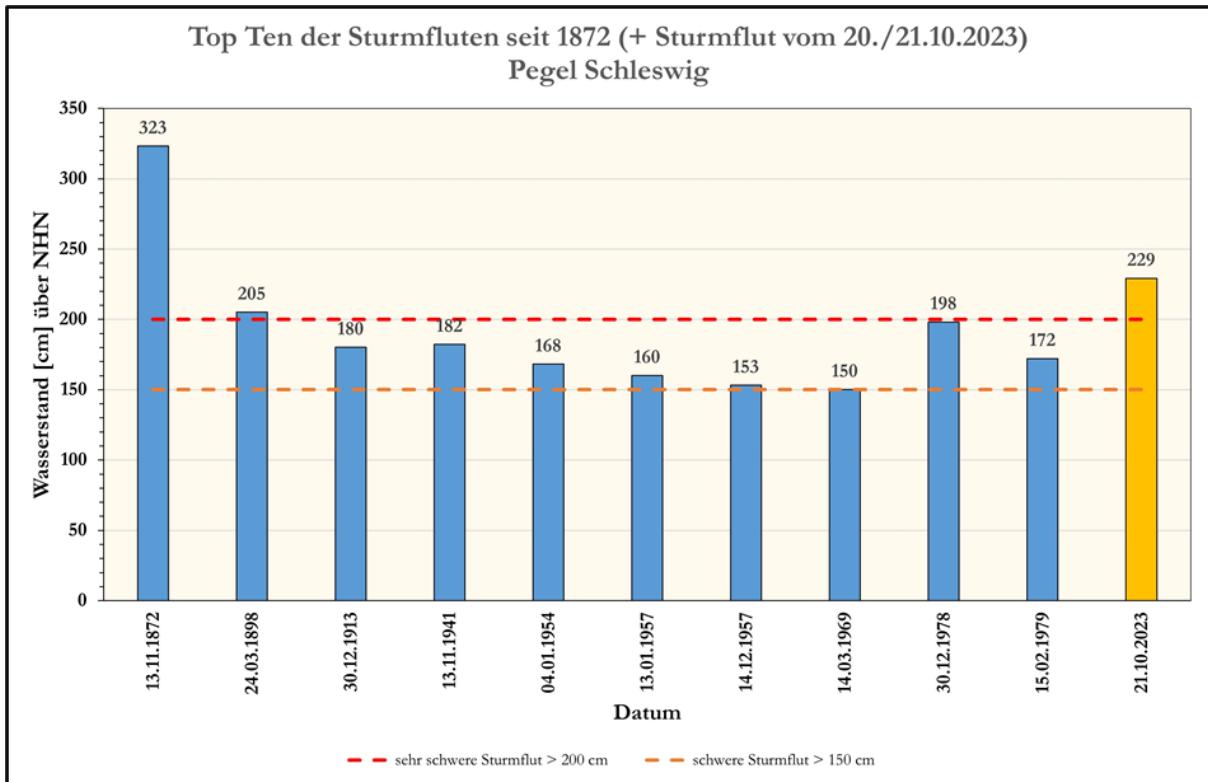


Abbildung 11: Höchste am Pegel Schleswig seit Aufzeichnungsbeginn am 01.03.1872 gemessene Wasserstände, Sturmflutklassifikation gemäß BSH.

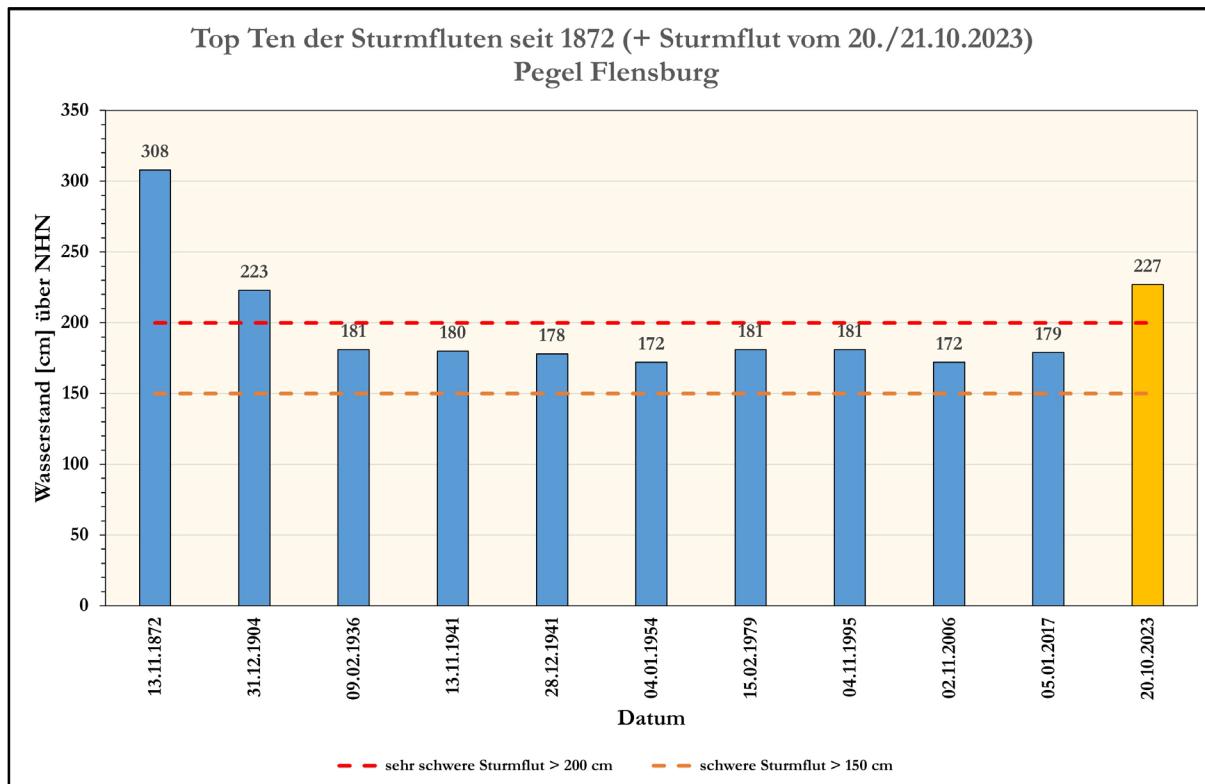


Abbildung 12: Höchste am Pegel Flensburg seit Aufzeichnungsbeginn am 01.03.1872 gemessene Wasserstände, Sturmflutklassifikation gemäß BSH.

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 Fördern von Schleswig-Holstein deutlich von den registrierten Scheitelwerten im Boddenystem 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 Wasserstands-marke 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, Neendorf 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 Meyen-krebsbrücke 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 Boddenwässer 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).

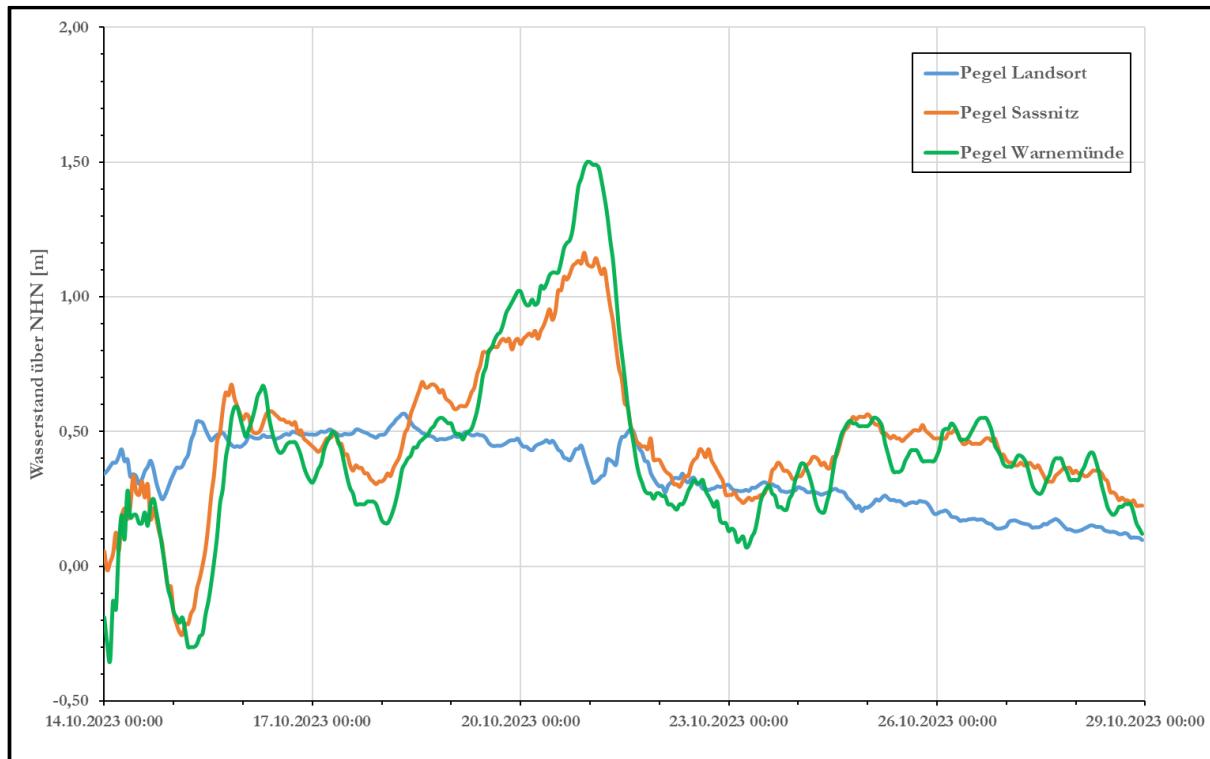


Abbildung 13: Füllungsgrad an den Pegeln Landsort, Sassnitz und Warnemünde vom 14. bis 28.10.2023.

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.

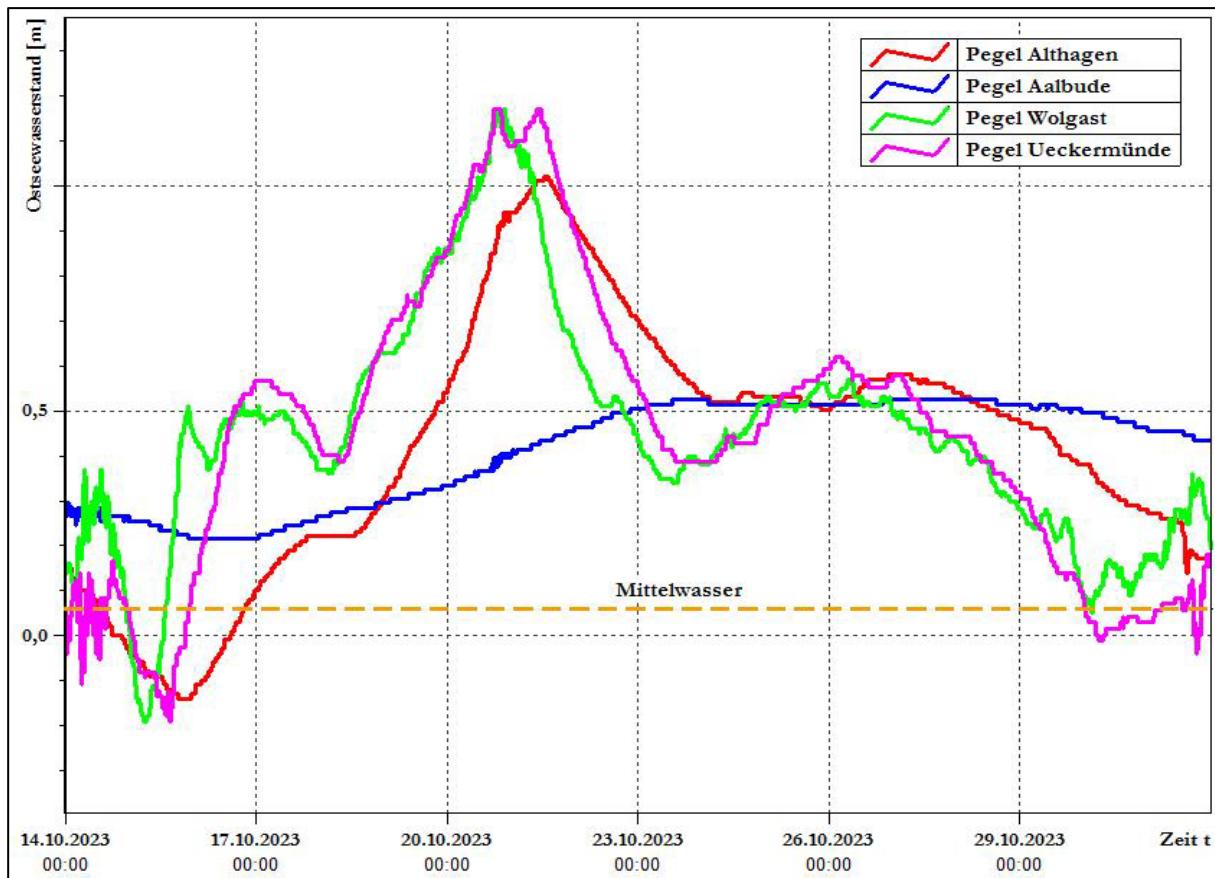


Abbildung 14: Füllungsgrad der Ostsee an im Bereich der Haff- und Boddenküste inkl. der Peene/ des Peenestroms liegender ausgewählter Pegel des WSA Ostsee vom 14. bis 31.10.2023 (Ostseewasserstand in m über NHN).

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.

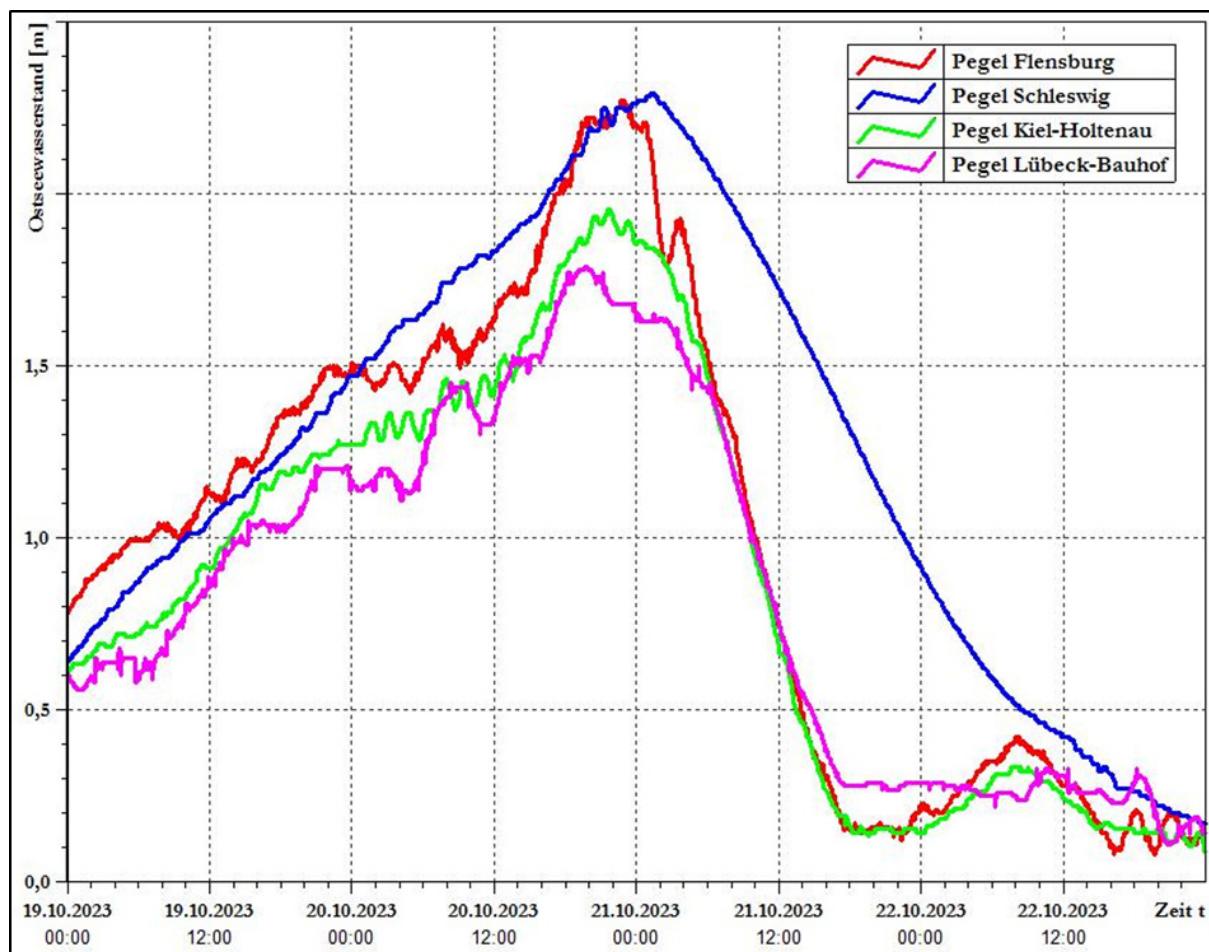


Abbildung 15: Wasserstandsverläufe im Bereich in Schleswig-Holstein liegender ausgewählter Pegel des WSA Ostsee vom 19. bis 22.10.2023 (Ostseewasserstand entspricht NHN in m).

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, Stahlsbrode, 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.

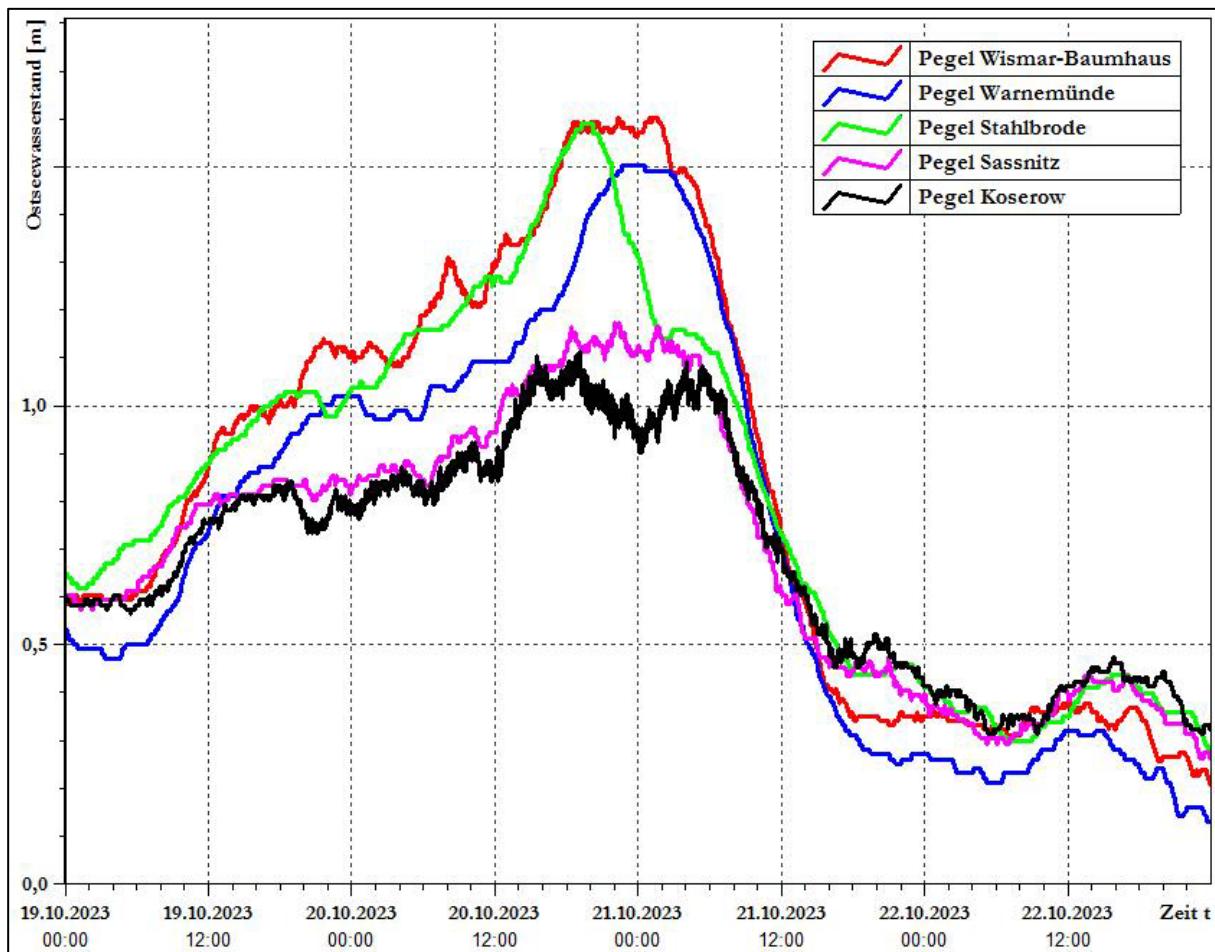


Abbildung 16: Wasserstandsverläufe im Bereich der Außenküste Mecklenburg-Vorpommern liegender ausgewählter Pegel des WSA Ostsee vom 19. bis 22.10.2023 (Ostseewasserstand entspricht NHN in m).

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).

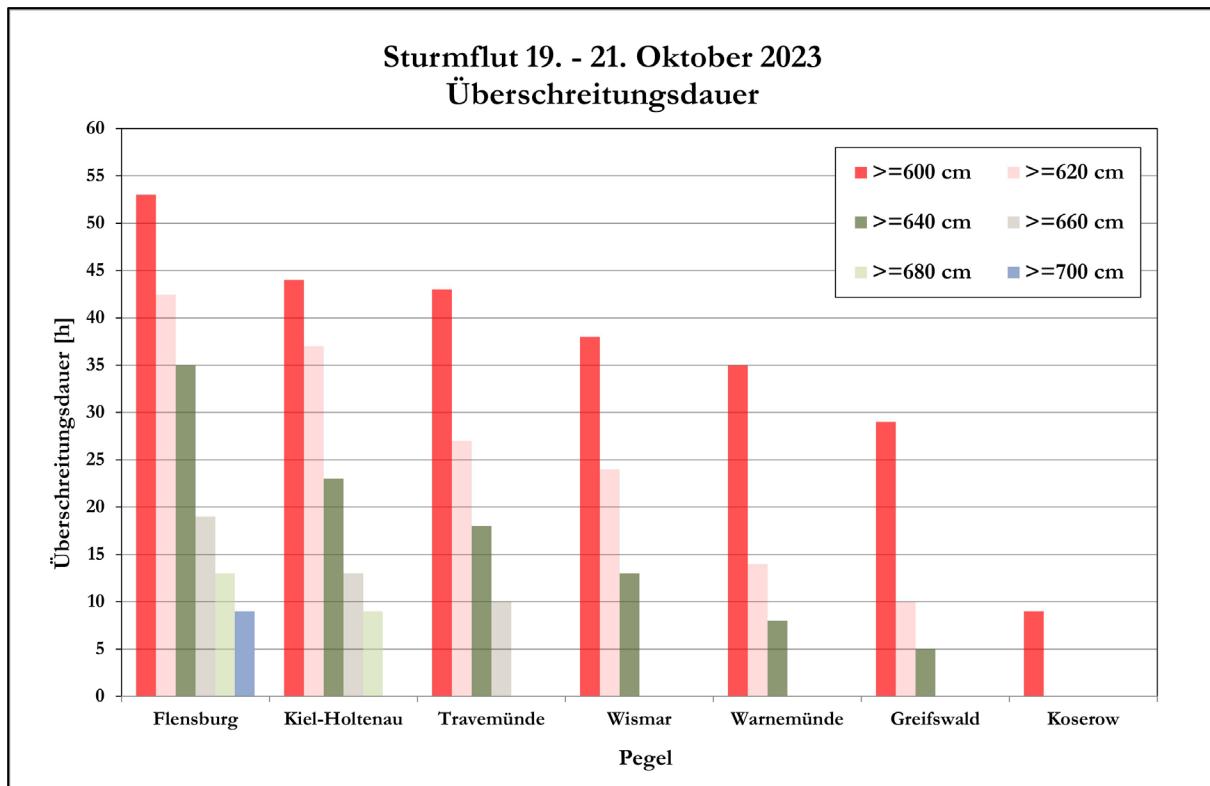


Abbildung 17: Überschreitungsdauer der Wasserstände an ausgewählten Pegelstationen des WSA Ostsee entlang der deutschen Ostseeküste während der Sturmflut vom 19. bis 21.10.2023.

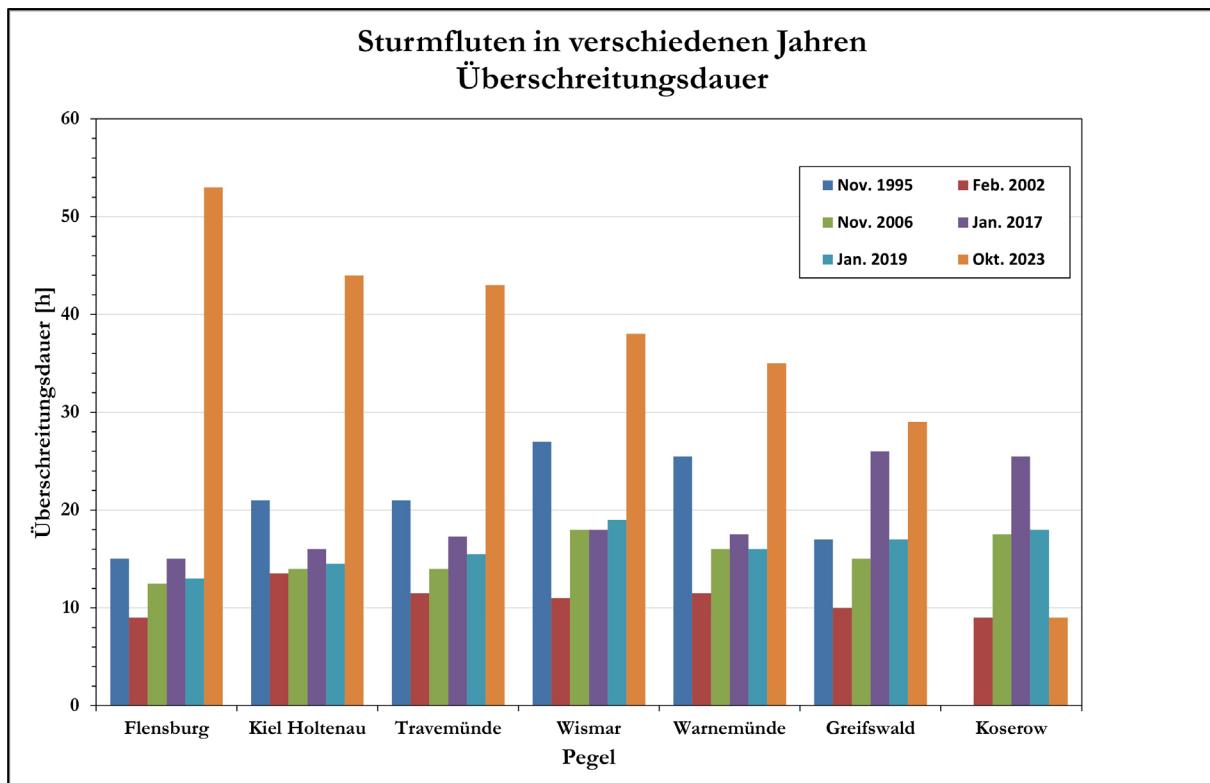


Abbildung 18: Überschreitungsdauer der Wasserstände $\geq 1,00 \text{ m}$ über NHN an ausgewählten Pegelstationen des WSA Ostsee entlang der deutschen Ostseeküste während verschiedener Sturmfluten.

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 Grundschwingung 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-Grundschwingungen (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 Eigenschwingungen ersichtlich. Erkennbar ist die stetige Abnahme der Höhe der Wasserstände und der Seiches von West nach Ost. In Flensburg beträgt die Höhe der Eigenschwingung 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 beeinflusst wurden. Am Pegel Landsort ist – wie aufgrund seiner Lage im Knotenbereich der einknotigen Eigenschwingung 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 Eigenschwingung. Aus dem Schwingungsverhalten 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 Absink des langperiodischen Wasserstandanteils, welcher nach etwa einem Tag das Minimum erreicht. Aufgrund starker Dämpfungseffekte ist danach das vorher vorhandene Schwingungsverhalten 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 Beckenschwingung (Seiches) mitenthalten ist. Die Eigenschwingungen 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.

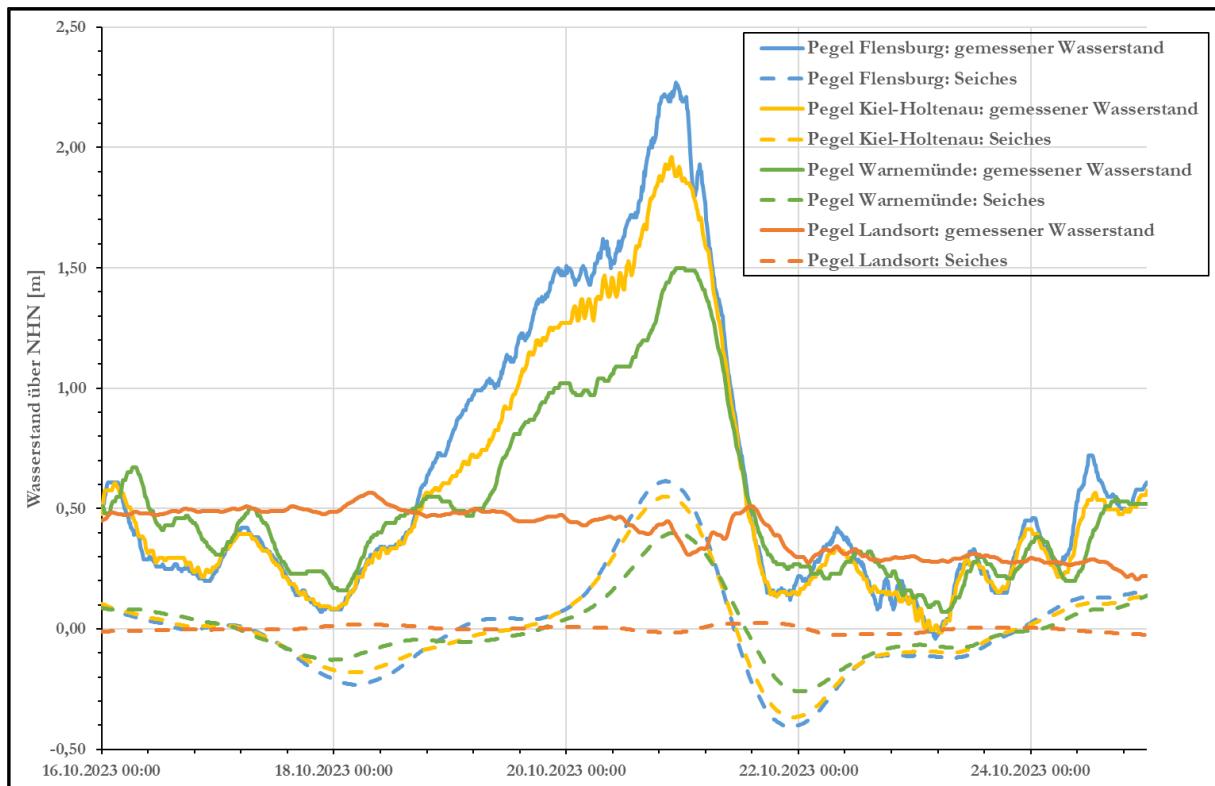


Abbildung 19: Wasserstandsverläufe an den Pegeln Flensburg, Kiel-Holtenau, Warnemünde und Landsort mit eliminierten Seiches-Anteilen vom 16. bis 24.10.2023.

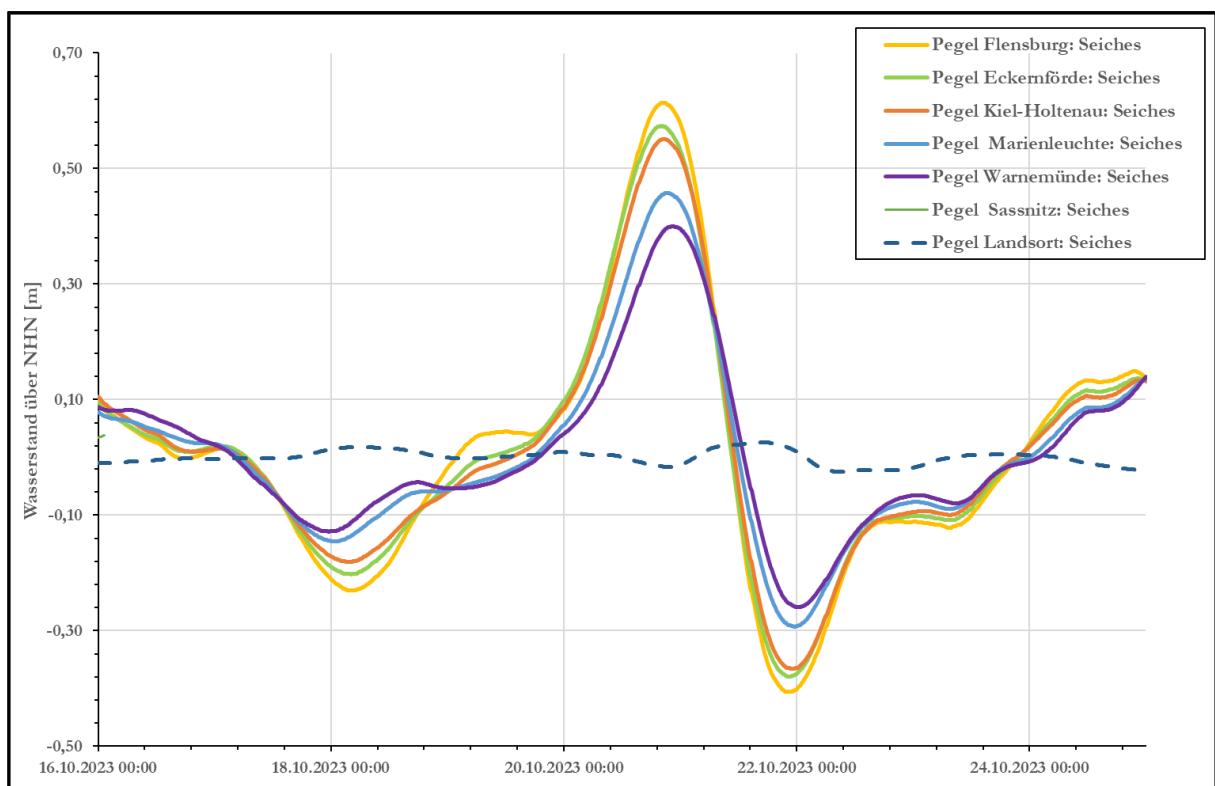


Abbildung 20: Verlauf der Seiches an den Pegeln Flensburg, Eckernförde, Kiel-Holtenau, Marienleuchte, Warnemünde, Sassnitz und Landsort vom 16. bis 24.10.2023.

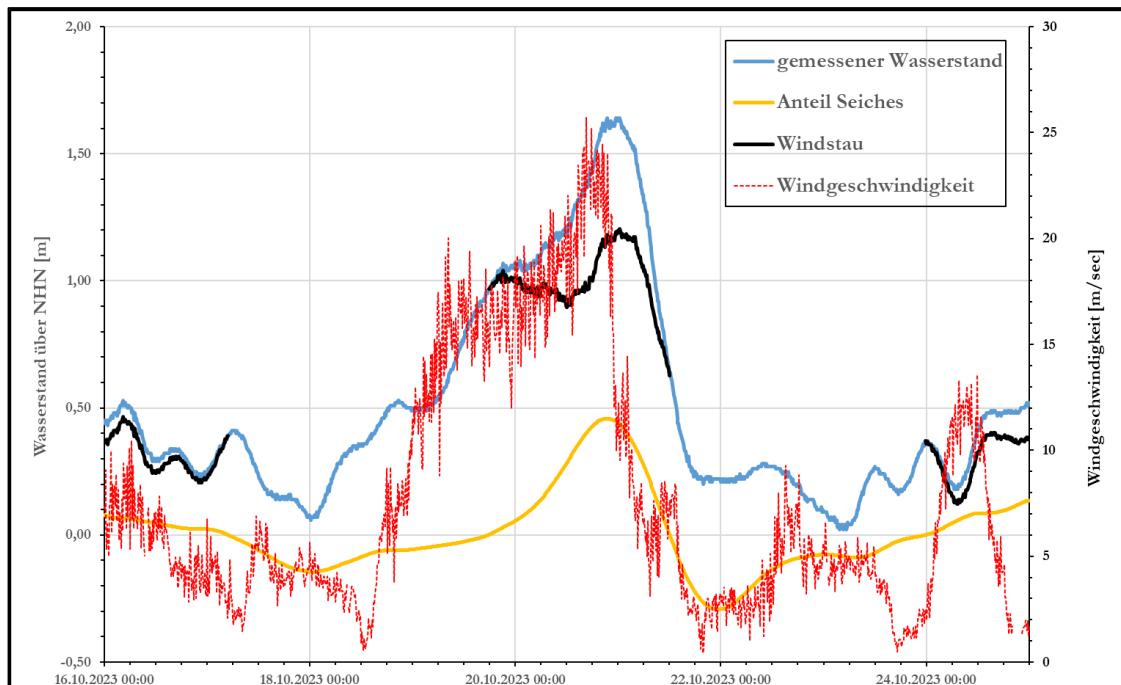


Abbildung 21: An der Station Marienleuchte gemessene Windgeschwindigkeiten und Wasserstände sowie ermittelte Wasserstandsanteile des Seiches und Windstaus.

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 Sturmwetterlage 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 Fördern 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., Miehlke, 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 Schiffahrtsamt 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.

Sturmflutschäden im Yachthafen Damp

Karsten Peters¹, Martin Jannsen² und Barbara Feyock³

¹ Ramboll Deutschland GmbH, karsten.peters@ramboll.com

² REAL Yachtservice GmbH

³ Bürgermeisterin Gemeinde Damp

Zusammenfassung

Die schwere Sturmflut vom 20.10.2023 hat neben den Küstenschutzanlagen entlang der Schleswig-Holsteinischen Ostseeküste auch zahlreiche Yachthäfen in Mitleidenschaft gezogen. Die Lage des Hafens spielte dabei eine entscheidende Rolle im Hinblick auf die Auswirkungen. Ungeschützte und nach Osten exponierte Häfen wie Maasholm und Damp waren besonders betroffen. Im Yachthafen Damp wurden sehr große Schäden an der Hafeninfrastruktur (Wellenbrecher, Deckwerke, Promenade, Bootsstege) verursacht. Dieser Beitrag dokumentiert diese sturmflutbedingten Schäden, benennt exemplarisch schadensursächlich anzunehmende Einwirkungen und gibt Hinweise und Empfehlungen für die Schutzbauwerke von Hafenanlagen, die Ausstattung und den Betrieb. Für vergleichbare Hafenanlagen wird empfohlen, eine Sicherheitsüberprüfung der Hafeninfrastruktur und der zugehörigen Schutzbauwerke durchzuführen, damit innerhalb des Hafens erst gar keine Schäden entstehen können. Schwimmstege bieten dabei große Vorteile gegenüber den vielerorts vorhandenen festen Steganlagen. Anpassungen im Hafenbetrieb sind zu prüfen.

Schlagwörter

Sturmflut, Schäden, Yachthafen, Wellenbrecher, Deckwerk, Stege

Summary

The severe storm surge on October 20th, 2023 not only affected the coastal defense systems along the Schleswig-Holstein Baltic Sea coast, but also affected numerous marinas. The location of the marina played a decisive role in terms of the impact. Unprotected marinas exposed to the east, such as Maasholm and Damp, were particularly affected. In the Damp marina, very extensive damage was caused to the harbour infrastructure (breakwaters, revetments, promenade, jetties). This article documents this storm surge-related damage, names examples of the likely causes of the damage and provides information and recommendations for the protective structures of harbour facilities, the equipment and the operation. For comparable marinas, it is recommended to carry out a safety check of the harbour infrastructure and the associated protective structures so that no damage can occur within the marina. Floating jetties offer great advantages over the fixed jetties available in many places. Adjustments to marina operations must be examined.

Keywords

storm surge, damages, marina, breakwater, revetment, jetty

1 Einleitung

Die schwere Sturmflut vom 20.10.2023 hat an der Schleswig-Holsteinischen Ostseeküste an den Küstenschutzanlagen aber auch in den zahlreichen Yachthäfen teils sehr starke Schäden verursacht. Die meteorologischen Bedingungen mit langanhaltenden östlichen Winden (mit einer maximalen Windstärke von 10 Bft am Leuchtturm Kiel) haben nicht nur hohe Wasserstände, sondern auch große Verweildauern zusammen mit entsprechenden Seegangsbedingungen erzeugt, die in ihrer Kombinationswirkung sehr starke Schäden entlang der Küste verursacht haben. In der Kieler Bucht und in der Mecklenburger Bucht wurden Wasserstände über 1,5 m über Normal erreicht. In Travemünde wurde ein maximaler Wasserstand von NMW +1,87 m gemessen. In nördlicher Richtung stiegen die maximalen Wasserstände bis nach Flensburg auf NMW +2,27 m an (vgl. Perlet-Markus 2023).

Die Lage des Hafens spielte eine entscheidende Rolle im Hinblick auf die sturmflutbedingten Schäden und Auswirkungen. Ungeschützte und nach Osten exponierte Häfen wie Maasholm und Damp waren besonders betroffen. Aber auch andere Yachthäfen in Flensburg, Schleswig, Schilksee, Heiligenhafen oder Großenbrode haben Schäden an Schiffen und Infrastruktur zu verzeichnen. Eine Übersicht der sturmflutbedingten Schäden in den Yachthäfen hat u. a. das Boote Magazin mit dem Artikel vom 02.11.2023 zusammengestellt.

Die folgende Abbildung 1 zeigt eine topografische Übersicht betroffener Yachthäfen (Delius Klasing 2023) und die Ausrichtung der Küstenlinie in Nord-Süd-Richtung im Bereich des sehr stark betroffenen Yachthafens Damp.



Abbildung 1: Übersichtskarte betroffener Yachthäfen während der Ostseesturmflut 2023 mit Kennzeichnung des Yachthafens Damp nach Delius Klasing (2023).

Der Yachthafen Damp auf der Halbinsel Schwansen hat im Zuge der Sturmflut vom 20.10.2023 sehr schwere Schäden an der Hafeninfrastruktur (Wellenbrecher, Deckwerke, Promenade, Bootsstege) aufgrund des hohen Sturmflutwasserstandes, der zugehörigen Verweilzeit und des senkrecht auf die Küste zulaufenden Wellenangriffs erlitten. Im Zuge einer separaten Begutachtung im Auftrage der REAL Yachtstrecke GmbH wurde am 06.02.2024 eine Ortsbesichtigung des Yachthafens Damp durchgeführt, der zu diesem Zeitpunkt für die Schifffahrt gesperrt war (vgl. Bekanntmachung für Seefahrer Nr. 42/24).

Zahlreiche der nachfolgenden Fotos stammen von dieser Ortsbesichtigung und dienen dazu, einen Teil der Schäden exemplarisch zu dokumentieren.

Dieser Beitrag dokumentiert im Folgenden diese sturmflutbedingten Schäden im Yachthafen Damp und benennt exemplarisch schadensursächlich anzunehmende Einwirkungen.

2 Yachthafen Damp

Die Kurbetriebe Damp GmbH ist zuständig für die Errichtung, den Betrieb und die Verpachtung sämtlicher Anlagen, Einrichtungen und Gebäude im Bereich des kommunalen Teils des Ostseebades Damp der Gemeinde Damp. Dazu zählt auch der Yachthafen Damp. Der Yachthafen Damp bietet an 14 Stegen insgesamt 365 Bootsliegeplätze im Außen- und Innenhafen. Der nach Südosten ausgerichtete Einfahrtsbereich des Yachthafens wird durch zwei Wellenbrecher (Nord- und Südmole) geschützt (vgl. Abbildung 2). Der Wellenbrecher der Nordmole (Länge ca. 270 m) besteht aus runden Deckwerksteinen mit einem Gewicht zwischen 1,0 to und 3,5 to. Die Kronenhöhe liegt bei ca. NHN +2 m.



Abbildung 2: Übersicht Yachthafen Damp (Quelle: Google).

Im Bereich des Innenhafens bestehen die Uferkonstruktionen aus Spundwänden, an die gepflasterte oder asphaltierte Böschungen und die höhergelegene Promenade anschließen.

Die festen (aufgeständerten) Steganlagen im Innen- und Außenhafen besitzen etwa ein Höhenniveau von NHN +0,8 m bis NHN +1,0 m. Die Boote und Yachten werden stegseitig an festen Klampen (auf den Stegen) und wasserseitig mit Hilfe von Heckpfählen vertäut. Im Innenhafen sind überwiegend Wassertiefen zwischen 3 m und 3,5 m vorhanden. Im Außenhafen sind 4 m bis 4,5 m Wassertiefen anzutreffen, die in Richtung

Hafeneinfahrt zunehmen. Weitere bautechnische Details zum Yachthafen Damp können bei der zuständigen Kurbetriebe Damp GmbH nachgefragt werden.

3 Dokumentation der Sturmflutschäden im Yachthafen Damp

Der extreme Wasserstandsverlauf während der Ostseesturmflut im Oktober 2023 in Verbindung mit den einwirkenden Seegangsbedingungen mit großen Wellenhöhen haben im Yachthafen Damp erhebliche Schäden verursacht. Dabei sind sowohl Schäden an der hafenseitigen Infrastruktur (Wellenbrecher der Nord- und Südmole, Deckwerke, Promenade, Bootsstege) entstanden als auch zahlreiche Boote und Yachten selbst zu Schaden gekommen. Teilweise sind die Schäden an der Hafeninfrastruktur innerhalb des Hafens auch durch Boote und Yachten selbst verursacht worden. Abbildung 3 verdeutlicht das Schadensbild der Hafeninfrastruktur.



Abbildung 3: Schadensbild der Hafeninfrastruktur (Quelle: Google).

3.1 Schäden an der Hafeninfrastruktur

3.1.1 Schäden der Nordmole

Während der Sturmflut im Oktober 2023 wurde der Wellenbrecher der Nordmole sehr stark beschädigt. Hoher Seegang aus östlicher Richtung in Verbindung mit den stark erhöhten Wasserständen haben die Nordmole derart belastet, dass auf größerer Länge die Deckwerkssteine aus der Krone des Wellenbrechers in Richtung Leeseite herausgeschlagen

wurden. Es ist davon auszugehen, dass die vergleichsweise geringe Kronenhöhe der Nordmole mitursächlich dafür ist, dass diese den Seegangbelastungen nicht mehr standhalten konnte. In der Folge verursachte die Schwächung des nördlichen Wellenbrechers eine Erhöhung der Seegangstransmission, d. h. der Seegang konnte verstärkt in den Außenhafen und anschließend in den Innenhafen vordringen und dort für zusätzliche Seegangsunruhe sorgen (vgl. Abbildung 4).



Abbildung 4: Blick in Richtung Osten auf den südlichen Teil des Yachthafens Damp während der Sturmflut (Foto: REAL Yachtsservice GmbH).

Abbildung 5 zeigt die beschädigte Nordmole mit dem wellenförmigen Kronenverlauf. Einer dieser Schadensbereiche (markiert in Abbildung 5 mit einem roten Kreis), in dem mehrere Steinlagen im Kronenbereich fehlen, wird in Abbildung 6 detaillierter dargestellt. Deutlich ist hier die Schädigung des Wellenbrechers mit den fehlenden Deckwerkssteinen zu erkennen.



Abbildung 5: Blick in Richtung Osten auf die beschädigte Nordmole (Foto: Peters).



Abbildung 6: Exemplarischer Schadensbereich der Nordmole (Foto: Peters).

3.1.2 Deckwerksschäden

Vor der DGzRS-Station im Übergang vom Außen- zum Innenhafen wurden das vorhandene Deckwerk (Betondeckwerk mit oberflächlich gesetzten Natursteinen) und die angrenzende asphaltierte Betriebsfläche entlang der ehemaligen Böschungsschulter stark zerstört (vgl. Abbildung 10). Schadensursächlich sind hier die Seegangseinwirkungen mit brechenden Wellen sowie Aus- und Unterspülungen des Bestandsdeckwerkes, so dass letztlich die höhergelegene Betriebsfläche entlang der ehemaligen Böschungsschulter abgesackt ist.



Abbildung 7: Deckwerksschäden im Bereich der DGzRS-Station (Foto: Peters).

3.1.3 Steganlagen im Innen- und Außenhafen

In der Abbildung 8 sind Schäden an der festen Steganlage im Außenhafen zu erkennen. Im Innenhafen wurden einzelne Steganlagen infolge losgerissener und umhertreibender Boote und Yachten z. T. so stark beschädigt, dass die Laufebenen einseitig abgeknickt bzw. vollständig eingebrochen sind (vgl. Abbildung 9).



Abbildung 8: Schäden an der Steganlage im Außenhafen (Foto: Peters).



Abbildung 9: Schäden an der Steganlage im Innenhafen (Foto: Peters).

3.2 Schäden an und von Booten und Yachten an der Hafeninfrastruktur

Zum Zeitpunkt des eintretenden Sturmflutereignisses war der Yachthafen Damp noch mit rd. 100 Booten und Yachten belegt. Der im Zuge der Sturmflut ansteigende Wasserstand im Zusammenspiel mit den festen Steganlagen und dem in den Yachthafen einlaufenden Seegang, der sich durch die Schäden der Nordmole weiter verstärkte, sorgte dafür, dass

- sich an zahlreichen Booten die Vertäuleinen extrem gespannt haben und in der Folge teilweise die stegseitigen Klampen abgerissen wurden,
- sich Boote und Yachten von den Stegen losgerissen haben, sich unkontrolliert und führerlos im Hafenbecken bewegten und in der Folge die Steganlagen, die Uferdeckwerke und die Promenade beschädigten und

- Boote und Yachten aufgrund von Kollisionen mit der Hafeninfrastruktur selbst so stark geschädigt wurden, dass diese Schiffe zum Teil im Hafenbecken gesunken sind (vgl. Abbildung 10). Insgesamt sind 35 der 100 Boote und Yachten sehr stark beschädigt worden. Diese havarierten und gesunkenen Boote und Yachten befanden sich alle im seegangsexponierten nördlichen und westlichen Hafenteil (vgl. Abbildung 11).



Abbildung 10: Westlicher Teil des Yachthafens Damp mit havarierten Schiffen (Foto: Tagesschau vom 21.10.2023).

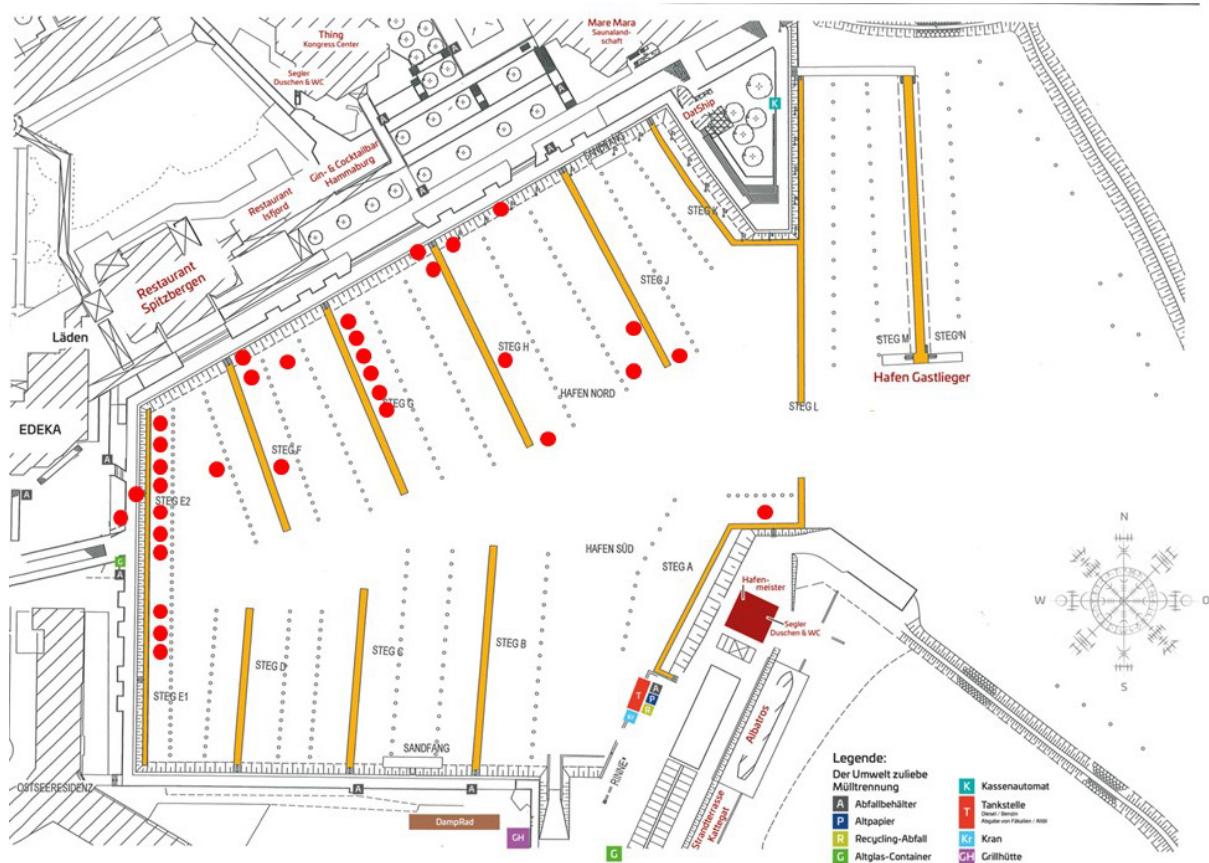


Abbildung 11: Übersicht gesunkener und havarierter Boote und Yachten im Yachthafen Damp (Quelle: REAL Yachtstrecke GmbH).

Im südlichen Bereich des Yachthafens Damp sind aufgrund der vor dem einlaufenden Seegang geschützten Lage hingegen keine Boote oder Yachten zu Schaden gekommen (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 11).

An den Stellen, an denen einzelne führerlos herumtreibende Boote oder Yachten mit der Hafeninfrastruktur kollidierten, traten entsprechende Schäden auf, in dem z. B. Boote und Yachten seegangsbedingt wiederholt und über längere Zeiträume mit dem Schiffsrumph oder dem Kiel gegen die Uferkonstruktion, Pflasterflächen, Laternen oder auch Treppenanlagen stießen und das Schadensbild kontinuierlich vergrößerten (vgl. Abbildung 12).



Abbildung 12: Westliche Uferkonstruktion mit schiffsbedingten Schäden an der Hafeninfrastruktur (Foto: Peters).

Weitere Schadensbilder aus anderen Yachthäfen können u. a. dem Artikel des Boote Magazins (Delius Klasing 2023) entnommen werden.

4 Hinweise und Empfehlungen

Die Sturmflut im Oktober 2023 hat in dem Yachthafen Damp sehr starke Zerstörungen sowohl an der Hafeninfrastruktur als auch an zahlreichen Booten und Yachten selbst verursacht. Der Yachthafen Damp und die sturmflutbedingt eingetretenen Schäden stehen an dieser Stelle stellvertretend für Schäden in anderen Yachthäfen. Aus den dokumentierten Schadensbildern im Yachthafen Damp können nachfolgende Hinweise und Empfehlungen abgeleitet werden:

- **Wellenbrecher zum Schutz der Hafenanlagen**

Der äußere Wellenbrecher der Nordmole des Yachthafens Damp wurde aufgrund seiner vergleichsweise niedrigen Kronenhöhe, des extremen Sturmflutwasserstandes und des anlaufenden Seeganges während der Sturmflut im Oktober 2023 so stark beschädigt, dass Deckwerksteine in der Gewichtsklasse 1,0 to bis 3,5 to leeseitig verschoben, die Wellenbrecherkrone bereichsweise erheblich verringert wurde und damit die Funktionsweise des Wellenbrechers bis heute deutlich eingeschränkt ist. Auch

wenn ein derartiges Sturmflutereignis nur selten eintritt, wird für bestehende und vergleichbare Hafenanlagen empfohlen, in regelmäßigen Abständen eine Sicherheitsüberprüfung der Hafeninfrastruktur und der zugehörigen Bauwerke durchzuführen, in der auch veränderte Randbedingungen bis hin zu Veränderungen des Meeresspiegelanstieges berücksichtigt werden könnten.

- **Steganlagen**

An der Ostseeküste sind feste Steganlagen in den Yachthäfen weit verbreitet. Vorteile liegen in der einfachen Konstruktion. Im Falle von Sturmflutereignissen wie im Oktober 2023 haben feste Steganlagen jedoch deutliche Nachteile, wenn die Leinen daran vertäuter Boote und Yachten überstreckt werden, Leinen oder Klampen abreißen und diese Schiffe führerlos im Hafenbecken herumtreiben, was wiederum weitere Schäden nach sich ziehen kann. Hier haben Schwimmstege deutliche Vorteile, da diese aufgrund ihrer Konstruktion und Masse wellendämpfende Wirkungen besitzen und die Schwimmstege mit den veränderlichen Wasserständen mitgehen, so dass es nicht zu einem Losreißen von Booten wie bei festen Steganlagen kommen kann. Damit ist nicht gemeint, dass sämtliche vorhandenen festen Steganlagen jetzt als Schwimmstege neu errichtet werden müssen. Vielmehr besteht bei künftigen Maßnahmen an den Steganlagen die Chance, den vorangegangenen Argumenten Rechnung zu tragen. Im Falle von Ertüchtigungsmaßnahmen könnte ein Teil der Steganlagen als Schwimmstege ausgebaut werden, an denen Schiffe dann auch außerhalb der sturmflutfreien Zeit liegen könnten.

- **Hafenbetrieb**

Viele Schäden im Yachthafen Damp wären nicht eingetreten, wenn einzelne Schiffe sich nicht von den Stegen losgerissen und in der Folge Schäden an der Hafeninfrastruktur bis zur schiffseigenen Havarie verursacht hätten. Vor diesem Hintergrund und angesichts der verlässlichen Verfahren zur Vorhersage von Wind und Wasserstand sollte über Anpassungen im Hafenbetrieb im Falle von Extremereignissen nachgedacht werden. Diese Anpassungen könnten das Verholen von Schiffen in sichere Hafenbereiche grundsätzlich ermöglichen oder das Kranen der Boote und Yachten bis zum Beginn der Sturmflutsaison einfordern. Hier können entsprechende Abstimmungen zwischen Hafenbetreibern und Bootseignern zielführend sein.

5 Literaturverzeichnis

Delius Klasing, Boote Magazin, Internetseite: Ostsee-Sturmflut: Bilanz der Schäden in den Häfen | BOOTE, Artikel vom 02.11.2023, Stand 03.11.2024: <https://www.boote-magazin.de/special/seenot/ostsee-sturmflut-bilanz-der-schaeden-in-den-haefen/>.

Gästeinformationssystem der Gemeinde Damp, Stand: 02.11.2024: www.gis-damp.de.

Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (MELUND), Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein, Fortschreibung 2022.

Perlet-Markus, I.: Schweren Sturmflut vom 20. Oktober 2023. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Stand: 30.04.2025: https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/_Anlagen/Downloads/Ostsee_Sturmflut_20231020.pdf?__blob=publicationFile&v=5.

Dokumentation der Sturmflutschäden in Großenbrode, Sütel und Süssau

Karsten Peters¹, Udo Scholz², Peer Knöfler³ und Sören Blaschke⁴

¹ Ramboll Deutschland GmbH, karsten.peters@ramboll.com

² Bürgermeister Gemeinde Heringsdorf

³ Bürgermeister Gemeinde Großenbrode

⁴ Amt Oldenburg-Land

Zusammenfassung

Die schwere Sturmflut vom 20.10.2023 hat entlang der Schleswig-Holsteinischen Ostseeküste und speziell in den Gemeinden Großenbrode, Neukirchen (Ortsteil Sütel) und Heringsdorf (Ortsteil Süssau) sehr große Schäden an den Küstenschutzanlagen (Vorstrand, Dünen, Deckwerke, Wellenbrecher), Steilküstenbereichen und wasserseitigen Infrastrukturanlagen (Yachthafen, Promenade) verursacht. Dieser Beitrag dokumentiert auszugsweise diese sturmflutbedingten Schäden in Großenbrode, Sütel und Süssau, benennt exemplarisch schadensursächlich anzunehmende Einwirkungen und gibt Hinweise und Empfehlungen, die ggf. auch auf andere Küstenabschnitte übertragen werden können.

Schlagwörter

Sturmflut, Schäden, Küstenschutzanlagen, Deckwerksschäden

Summary

The severe storm surge of October 20, 2023 caused very extensive damage to the coastal protection systems (foreshore, dunes, revetments, breakwaters), cliff areas and water-side infrastructure systems (yacht harbors and promenade) on the Schleswig-Holstein Baltic Sea coast and especially in the communities of Großenbrode, Sütel and Süssau. This article documents excerpts of this storm surge-related damage in Großenbrode, Sütel and Süssau, names examples of the possible causes of damage and provides information and recommendations that can be transferred to other coastal sections if necessary.

Keywords

storm surge, coastal protection, revetment, damages

1 Einleitung

Die schwere Sturmflut vom 20.10.2023 hat an der Schleswig-Holsteinischen Ostseeküste sehr starke Schäden verursacht. Die meteorologischen Bedingungen mit langanhaltenden östlichen Winden (mit einer maximalen Windstärke von 10 Bft am Leuchtturm Kiel) haben nicht nur hohe Wasserstände, sondern auch große Verweildauern zusammen mit



entsprechenden Seegangsbedingungen erzeugt, die in ihrer Kombinationswirkung sehr starke Schäden entlang der Küste verursacht haben. In der Kieler und Mecklenburger Bucht wurden Wasserstände über Normalmittelwasser (NMW) + 1,5 m erreicht. In Travemünde wurde ein maximaler Wasserstand von NMW +1,87 m gemessen. In nördlicher Richtung stiegen die maximalen Wasserstände bis nach Flensburg auf NMW +2,27 m an (vgl. Perlet-Markus 2023).

Die Gemeinden Großenbrode, Neukirchen (Ortsteil Sütel) und Heringsdorf (Ortsteil Süssau) im Kreis Ostholstein haben im Zuge der Sturmflut vom 20.10.2023 sehr schwere Schäden an den Küstenschutzanlagen (Vorstrand, Dünen, Deckwerke, Wellenbrecher), Steilküstenbereichen und wasserseitigen Infrastrukturanlagen (Yachthafen, Promenade) erlitten aufgrund des hohen Sturmflutwasserstandes, der zugehörigen Verweilzeit und des senkrecht auf die Küste zulaufenden Wellenangriffs (Nöthel et al. 2024, Hirschhäuser et al. 2024). In Schleswig-Holstein wurden durch die Ostseesturmflut insgesamt Schäden von etwa 200 Millionen Euro verursacht. Monetäre Angaben zu den Schäden in den drei Gemeinden Großenbrode, Neukirchen und Heringsdorf liegen nicht vor. Abbildung 1 zeigt die topografische Übersicht und die Ausrichtung der Küstenlinie im Bereich der betroffenen Gemeinden Großenbrode, Neukirchen (Ortsteil Sütel) und Heringsdorf (Ortsteil Süssau) in Nord-Süd-Richtung.

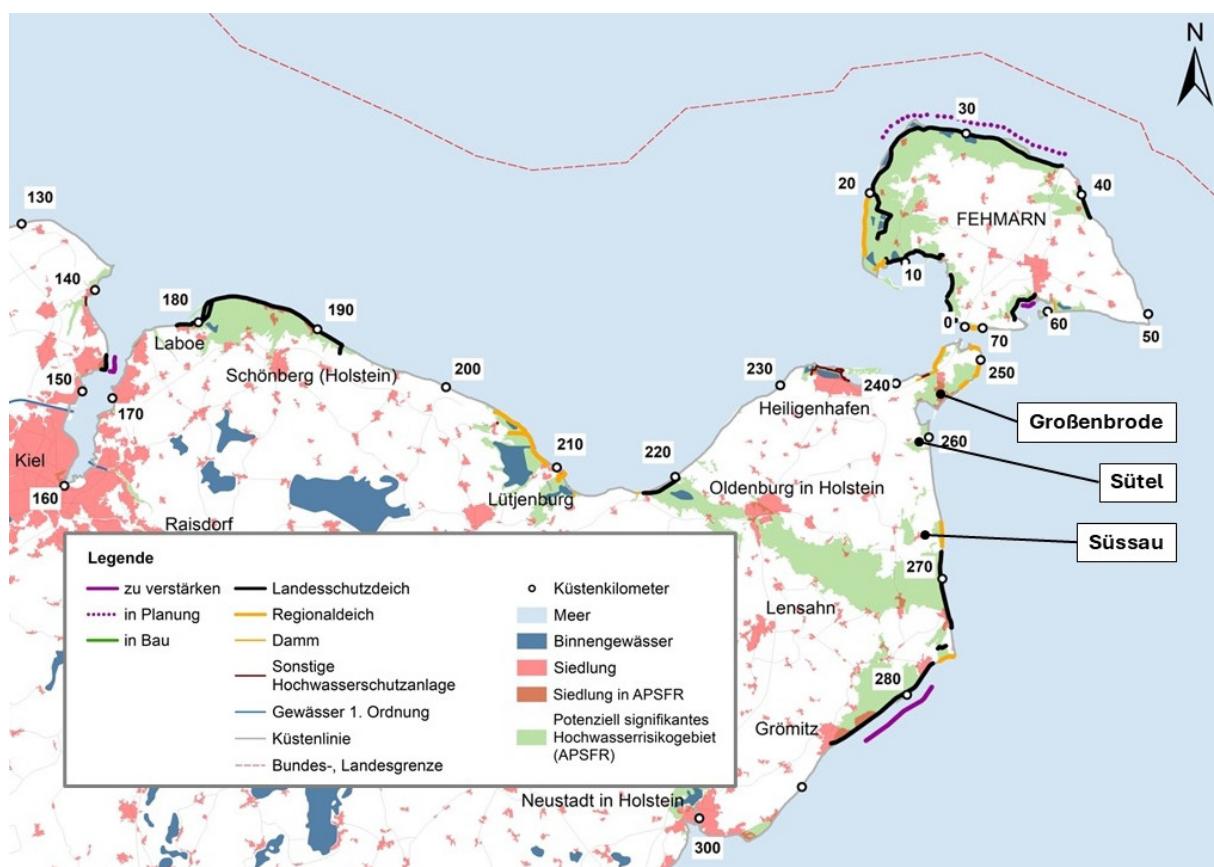


Abbildung 1: Übersichtskarte mit Kennzeichnung der Gemeinden Großenbrode, Neukirchen (Ortsteil Sütel) und Heringsdorf (Ortsteil Süssau) (Hintergrundkarte: Generalplan Küstenschutz (MELUND 2022)).

Im Auftrage des Amtes Oldenburg-Land wurden die Schäden in Großenbrode, Sütel und Süssau am 25.10.2023 unmittelbar nach dem Sturmflutereignis dokumentiert und der Umfang notwendiger Instandsetzungsmaßnahmen ermittelt. In den Folgemonaten wurden

erforderliche Abstimmungen mit den Gemeinden und Behörden geführt, Sicherungsmaßnahmen in einzelnen Küstenabschnitten vorgenommen, Planungen der notwendigen Instandsetzungsmaßnahmen durchgeführt, Ausschreibungen der erforderlichen Bauleistungen erstellt und deren Umsetzung organisiert. Aufgrund des Umfanges der erforderlichen baulichen Maßnahmen konnten die Instandsetzungsmaßnahmen in Teilbereichen bis zum Ende der sturmflutfreien Zeit 2024 noch nicht abgeschlossen werden.

Dieser Beitrag dokumentiert im Folgenden die sturmflutbedingten Schäden in dem Küstenabschnitt von Großenbrode (Kkm 248) über Sütel bis Süssau (Kkm 268) und benennt exemplarisch schadensursächlich anzunehmende Einwirkungen.

2 Kurze Beschreibung der Küstenschutzanlagen in Großenbrode, Sütel und Süssau

Die Küstenlinie in Großenbrode, Sütel und Süssau (vgl. Abbildung 1) besteht entsprechend der Topografie und Geologie aus unterschiedlichen Elementen wie

- Regionaldeichen (siehe Tabelle 1) überwiegend in Niederungsbereichen mit einem schmalen Vorland und vorgelagertem Deckwerk,
- Bereichen höherer Topografie, Steilufern und Kliffabschnitten mit schmalen Sandstränden,
- Bereichen mit touristischer Prägung mit befestigten Uferanlagen, Promenaden, breiteren Sandstränden, Seebrücken und Hafenanlagen sowie
- Buhnen und Molenbauwerken z. B. im Einfahrtsbereich zum Yacht- und Kommunalhafen Großenbrode

Tabelle 1: Regionaldeiche im Bereich Großenbrode bis Süssau als Auszug der Anlage 7 des Generalplanes Küstenschutz (MELUND 2022).

Nr.	NAME	Küsten-kilometer (Anfang) [km]	Küsten-kilometer (Anfang) [km]	Deich-länge** [km]	mittlere Kronenhöhe 2019/2020 [NNN+m]	Fläche [ha]	Ein-wohner*	Sach-werte** [Mo. €]	2030 HW100 [NNN+m]	Wiederkehrintervall kritisches Ereignis [Jahre]		
										Mittel-Wert	Bandbreite von	bis
Festland												
86,04	Deich Großenbrode NW	243,40	245,02	1,58	2,6	46	4	3,72	2,30	80	44	129
86,061	Deich Rethsollskamp	248,69	249,02	0,52	2,9	4	5	5,87	2,30	291	266	300
86,062	Deich Rethsollskamp	249,02	249,18	0,16	2,7	4	5	5,87	2,30	287	254	300
86,08	Deich Großenbroder Moor	250,35	251,23	0,89	3,5	615	1.231	258,33	2,35	204	98	300
86,1	Deich Rethwiese	251,93	252,56	0,64	3,0	615	1.231	258,33	2,35	70	20	149
86,14	Deich Süssau	266,04	267,70	1,65	3,3	72	3	19,95	2,35	92	32	180

Eine detailliertere Übersicht der Regionaldeiche in der Gemeinde Großenbrode zeigt Abbildung 2. Für weitergehende Erläuterungen zu den Küstenschutzanlagen wird u. a. auf den Generalplan Küstenschutz (MELUND 2022) verwiesen.

3 Dokumentation der Sturmflutschäden in Großenbrode, Sütel und Süssau

Im Folgenden werden die sturmflutbedingten Schäden in Großenbrode (an Deckwerken, Strand, Seebrücke, Mole, Yachthafen), Süsel (Strand, Deckwerke, Klifferosion) und Süssau (Strand, Deckwerk, Promenade, Klifferosion) dokumentiert. Alle Fotos stammen von der gemeinsamen Ortsbesichtigung am 25.10.2023 und zeigen damit den Zustand wenige Tage nach dem Sturmflutereignis. Anhand einzelner Schadensbilder, wie z. B. der Promenade in Süssau oder den Deckwerksschäden in den Abschnitten der Regionalaldeiche in Großenbrode, werden die als schadensursächlich anzunehmenden Einwirkungen beschrieben und entsprechende bautechnische Empfehlungen für deren Vermeidung gegeben.

3.1 Sturmflutschäden in Großenbrode

Die dokumentierten Schäden in Großenbrode werden nachfolgend für die einzelnen Abschnitte der Regionaldeiche Rethsollskamp, Großenbroder Moor und Rethwiese sowie für die Abschnitte Großenbrode Strand mit der Seebrücke und die südlich anschließende Mole beschrieben. Die Lage der Küstenlinie in diesen Bereichen kann Abbildung 2 entnommen werden. Seit September 2024 sind nahezu alle Schäden der Ostseesturmflut beseitigt. Der Regionaldeich Großenbrode NW wird nachfolgend nicht behandelt, da an diesem aufgrund der geschützten Leelage während der Ostseesturmflut im Oktober 2023 keine Schäden aufgetreten sind.

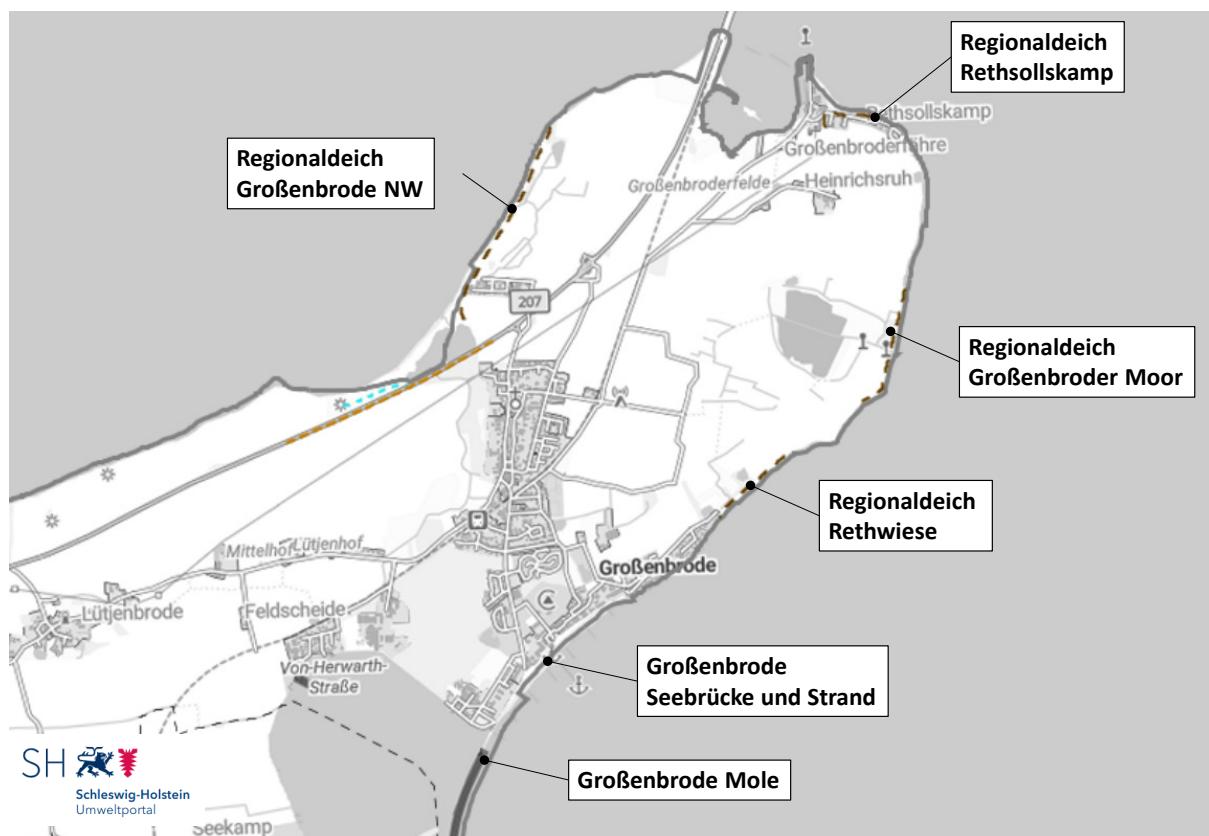


Abbildung 2: Großenbrode, Übersichtskarte mit Kennzeichnung einzelner Bereiche (Hintergrundkarte: Schleswig-Holstein Umweltportal).

Regionaldeich Rethsollskamp

Im Bereich des Regionaldeiches Rethsollskamp am Femarnsund ganz im Nordosten der Gemeinde Großenbrode sind lediglich kleinere Schäden am Deckwerk aus Natursteinen (mittlere Neigung: 1:6) und am anschließenden Regionaldeich aufgetreten (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 4). Die hydraulischen Belastungen im Zuge der Sturmflut mit brechenden Wellen haben zu Erosionen des Oberbodens oberhalb des Deckwerks (max. Höhe Deckwerksschulter: NHN +2,5 m) geführt. Darüber hinaus wurden kleinere Deckwerkssteine aus dem Deckwerk gelöst und landseitig verfrachtet. Treibsel und vorhandener Sand wurden bis auf die Krone des Regionaldeichs und weiter landseitig verfrachtet. Aufgrund des Untergrundes aus vergleichsweise erosionsstabilem Geschiebemergel ist es nicht zu weiteren Erosionen des Deckwerks gekommen.



Abbildung 3: Großenbrode, Abschnitt Rethsollskamp, Blickrichtung West (Foto: Ramboll).



Abbildung 4: Großenbrode, Abschnitt Rethsollskamp, Blickrichtung Ost (Foto: Ramboll).

Regionaldeich Großenbroder Moor

Im Bereich des Regionaldeiches Großenbroder Moor nimmt das Schadensbild aufgrund der Ausrichtung der Küstenlinie (Nordost – Südwest, vgl. Abbildung 2) und der auf diesen Küstenabschnitt während der Sturmflut nahezu senkrecht einwirkenden Seegangsbelastungen deutlich zu. Es wurden sehr starke Schäden am Deckwerk und am angrenzenden Deichvorland festgestellt (max. Höhe Deckwerksschulter: Normalhöhennull (NHN) + 2,5 m). Deckwerkssteine wurden aus dem Deckwerk (mittlere Neigung: 1:5) herausgehoben und auf das Vorland gespült (vgl. Abbildung 5). Teilweise liegt der anstehende Boden oder das unter dem Deckwerk verlegte Geotextil frei. Landseitig der Deckwerksschulter treten sehr starke Erosionen auf, die in das Deichvorland hineinreichen. Die Treibselgrenzen liegen unmittelbar unterhalb und teilweise auf der Krone des Regionaldeiches. Das im nördlichen Bereich angrenzende Kliff weist starke Erosionen (mehrere Meter) auf (vgl. Abbildung 6).



Abbildung 5: Großenbrode, Abschnitt Großenbroder Moor, Blickrichtung Nord (Foto: Ramboll).



Abbildung 6: Großenbrode, nördliches Ende im Abschnitt Großenbroder Moor, Blickrichtung Süd (Foto: Ramboll).

Regionaldeich Rethwiese

Im Bereich des südlich gelegenen Regionaldeiches Rethwiese setzt sich das Schadensbild aus dem Bereich Großenbroder Moor mit sehr starken Deckwerkschäden weiter fort. Teilweise treten noch größere Erosionen des Deckwerkes (mittlere Neigung: 1:6) und des Vorlandes landseitig der Böschungs- und Deckwerkschulter auf. Die Deckwerksteine an der Deckwerksschulter (max. Höhe Deckwerksschulter: NHN +2,5 m) liegen ebenso wie das eingebaute Geotextil abschnittsweise landseitig frei. Eine Vielzahl von Deckwerkssteinen mit einer Kantenlänge von bis zu rd. 40 cm liegt über das Vorland verstreut (vgl. Abbildung 7 und Abbildung 8).



Abbildung 7: Großenbrode, Abschnitt Rethwiese, Blickrichtung Nord (Foto: Ramboll).



Abbildung 8: Großenbrode, Abschnitt Rethwiese, Blickrichtung Süd (Foto: Ramboll).

Strand und Seebrücke in Großenbrode

Der Strandbereich wurde großräumig ausgeräumt. Nach überschlägigen Abschätzungen wurden in dem 800 m langen Abschnitt rund 3.000 m³ bis 4.000 m³ Sand erodiert. Landseitig wurde das Deckwerk in der Hochwasserschutzdüne freigelegt. Erste Sicherungsmaßnahmen wurden am 25.10.2023 bereits durchgeführt (vgl. Abbildung 9).



Abbildung 9: Großenbrode, Strand, Blickrichtung Süd (Foto: Ramboll).

Auch an der Seebrücke sind deutliche Schäden an der aufliegenden Holzkonstruktion insbesondere am Brückenkopf zu verzeichnen gewesen. Gehbeläge wurden abgehoben und Geländer beschädigt (vgl. Abbildung 10).

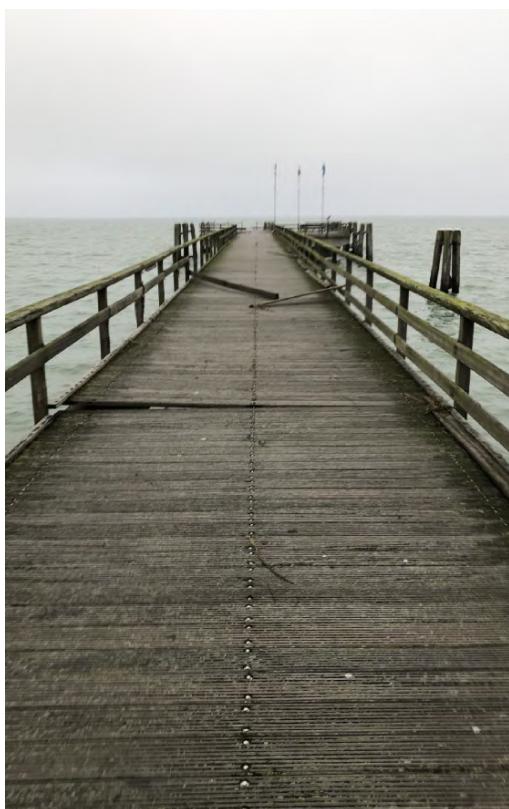


Abbildung 10: Großenbrode, Seebrücke (Fotos: Ramboll).

Mole Großenbrode

Die Mole in Großenbrode, welche die Hafenanlagen in Großenbrode schützt, hat ebenfalls starke Schäden im Zuge der Sturmflut erlitten. Die mit Betonplatten abgedeckte Mole wurde in Einzelbereichen so stark geschädigt, dass Betonplatten abgehoben, der Molenkern freigelegt und teilweise ausgewaschen wurde. Auf der Leeseite sind deutliche Spuren des Wellenüberschlags und nachfolgender Erosion zu erkennen.

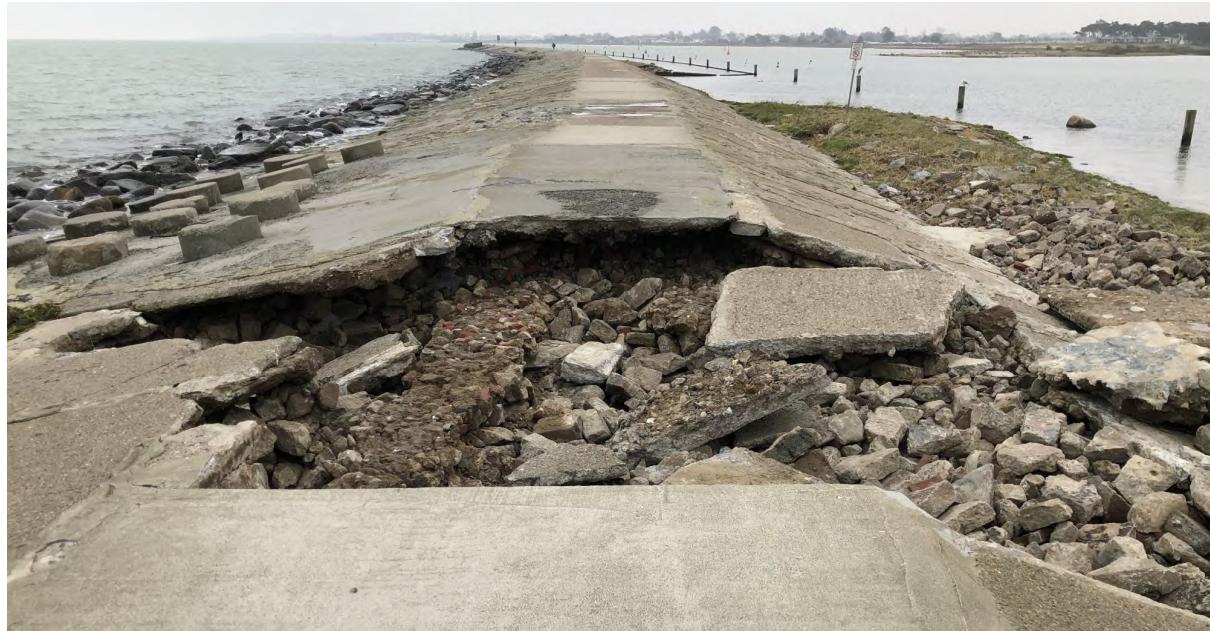


Abbildung 11: Großenbrode, Mole (Foto: Ramboll).

Es ist anzunehmen, dass vorhandene Fehlstellen der geschlossen ausgebildeten Molenoberfläche ursächlich sind für ein derartiges Schadensbild. Während des Sturmflutereignisses stand die Mole vollständig unter Wasser. Brechende Wellen müssen dann kurzzeitig Druckschläge in dem wassergesättigten Molenkern erzeugt haben, so dass die Betonabdeckplatten sich gelöst haben und in der Folge abgehoben wurden.

Die Schadensbereiche wurden im Zuge der Reparaturmaßnahmen in 2024 mit geeignetem Steinmaterial aufgefüllt und mit einem Vollverguss gesichert.

Zwischenfazit für die Deckwerksausbildung

Aus den Schadensbildern der Deckwerke entlang der Regionaldeiche in Großenbrode können folgende Schlüsse zur Deckwerksausbildung gezogen werden. Die Deckwerke in Großenbrode verfügten nicht über eine ausreichende Stabilität gegenüber den hydraulischen Einwirkungen im Zuge der Sturmflut. Die Schadensbilder verdeutlichen, dass das Brechen der Wellen auf dem Deckwerk bzw. an der Deckwerksschulter starke Erosionen auf dem Deckwerk selbst und an dem angrenzenden Vorland verursacht hat. Dies lässt sich mit der Seegangsbelastung bei erhöhtem Sturmflutwasserstand erklären. Für eine ausreichende Sicherheit müssen die Geometrie und der Aufbau der Deckwerke angepasst werden. So ist zu empfehlen, die Deckwerksschulter entweder zu erhöhen oder eine Übertragungssicherung herzustellen und u.a. mit größeren Deckwerkssteinen besser zu sichern.

3.2 Sturmflutschäden in Sütel

Der Küstenabschnitt in Sütel im Bereich des Campingplatzes verfügt landseitig überwiegend über eine ausreichende topografische Höhenlage mit Kliffbereichen, wasserseitigen Deckwerken und Strand. Im Zuge der Ostseesturmflut im Oktober 2023 wurde der Strand im gesamten Abschnitt sehr stark erodiert, Deckwerke zerstört. Kliffabschnitte wurden ebenfalls sehr stark erodiert. Abbildung 12 zeigt den Einfahrtsbereich zum Campingplatz vor und nach der Sturmflut im Oktober 2023. Teilweise reichte die Wasserlinie im Oktober 2023 bis an das vorhandene Deckwerk im nördlichen Abschnitt heran (vgl. Abbildung 14).



Abbildung 12: Sütel Strand vor der Sturmflut (Foto: WWP Architekten, oben) und nach der Sturmflut (Foto: Ramboll, unten).

Der südlich an den Strandzugang angrenzende Kliffbereich (Höhe ca. 4 m–5 m) wurde sehr stark erodiert, und das Kliff ist abschnittsweise mehr als 10 m zurückgewichen; die kliffnahe Wegeverbindung wurde zerstört und der Strandzugang stark in Mitleidenschaft gezogen. Die ursprünglich vor dem Klifffuß liegenden Findlinge und Steine markieren die Linie vor der Sturmflut (vgl. Abbildung 13).

Als auffällig wurde bei der Ortsbesichtigung wahrgenommen, dass sich der erodierte Kliffbereich und die jetzige Geländeoberfläche als bindige Bodenschicht (Geschiebemergel) zeigte. Darüber waren erodierbare Bodenschichten zu erkennen, was letztlich den enormen Kliffrückgang erklären könnte.



Abbildung 13: Süsel Strand nach der Sturmflut, Erosion von Kliffbereichen (Foto: Ramboll).

Im nördlichen Bereich des Campingplatzes zeigten sich sehr deutliche Schäden des vorhandenen Deckwerkes aus Steinmatratzen und des sich oberhalb anschließenden Walls analog zu den Schädigungen des Deichvorlandes im Übergang zum Deckwerk in Großembrüder (vgl. Abschnitt 3.1). Die folgende Abbildung 14 zeigt diese Schäden und verdeutlicht nochmals die Verschiebung der Wasserlinie in Richtung Land. Der Strand wurde während der Sturmflut ausgeräumt und war in der Folge nicht mehr vorhanden.



Abbildung 14: Süsel Strand nach der Sturmflut, Blickrichtung Süd (Foto: Ramboll).

3.3 Sturmflutschäden in Süssau

Der Küstenabschnitt in Süssau zeichnet sich durch eine vor dem Regionaldeich liegende Häuserreihe mit wasserseitiger Promenade und Strand aus. Die Seebrücke in Süssau teilt diesen Promenadenbereich in einen nördlichen und südlichen Teil von jeweils etwa 200 m Länge (vgl. Abbildung 15). Für die Promenade und das wasserseitige Deckwerk in Süssau ist die Gemeinde Heringsdorf zuständig. Der landseitige Regionaldeich liegt im Zuständigkeitsbereich des Wasser- und Bodenverbandes Ostholstein und weist laut Tabelle 1 eine Kronenhöhe von NHN +3,3 m auf.

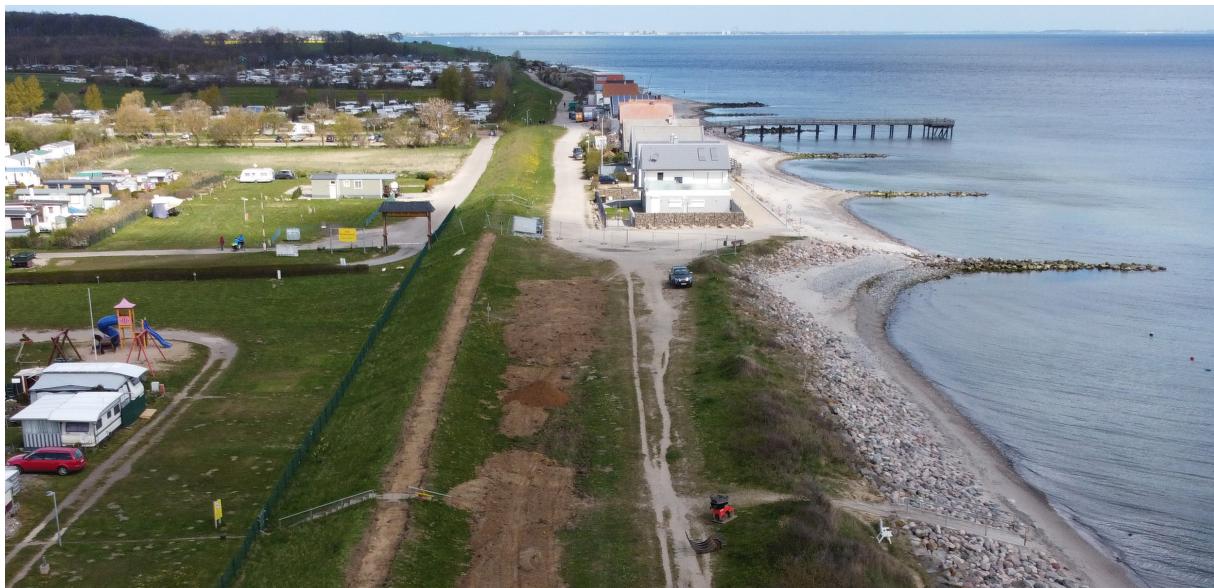


Abbildung 15: Süssau, Blickrichtung Nord (Foto: Wasser- und Bodenverband Ostholstein).

Die Oktobersturmflut 2023 hat mit einem (in Ermangelung von Messdaten) geschätzten maximalen Wasserstand von NMW +1,7 m in Verbindung mit dem auftretenden Seegang in Süssau für schwerste Schäden gesorgt.

Das Deckwerk südlich der Promenade wurde sehr schwer beschädigt. Deckwerksteine wurden aus dem Deckwerk gelöst und auf das Vorland vor dem Regionaldeich geworfen (vgl. Abbildung 16). Das Vorland wurde auf gesamter Breite erodiert. Im Vergleich waren diese Vorland- und Deckwerksschäden deutlich stärker als die in Großenbrode. Die Treibsegelgrenze lag unmittelbar wasserseitig auf der Krone des Regionaldeiches. In Zusammenarbeit mit dem Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) wurde in der Folge der Bereich mit einem Geotextilwall für die sturmflutgefährdete Zeit 2023/24 gesondert gesichert (vgl. Abbildung 17). Die bauliche Wiederherstellung des Deckwerkes in Süssau auf der Länge von rd. 1,2 km liegt im Zuständigkeitsbereich des Wasser- und Bodenverbandes Ostholstein und wurde in 2025 abgeschlossen.



Abbildung 16: Süssau nach der Sturmflut, Blickrichtung Nord (Foto: Ramboll, 25.10.2023).



Abbildung 17: Süssau, Geotextilwall, Blickrichtung Süd (Foto: Ramboll, 26.03.2024).

Im Bereich der Promenade (Höhe ca. NHN +2 m) zeigte sich, dass das Promenadenpflaster in großen Abschnitten vor den Gebäuden zerstört wurde. Die einzelnen Pflastersteine wurden gegen die Hausfassaden geschleudert (vgl. Abbildung 18).



Abbildung 18: Promenade und Strandbereich in Süssau vor (links, Foto: ostsee-ferienwohnung.de) und nach der Sturmflut (rechts, Foto: Ramboll, 25.10.2023).

Der wasserseitige Kantenstein aus Granit, der auf der Betonwand befestigt war, fehlte ebenfalls überall dort, wo das Pflaster geschädigt wurde. Bei genauerer Betrachtung wurde schnell deutlich, worin die Schadensursache besteht. Zum einen war die Wasserseite der Promenade nur unzureichend mit einem Deckwerk geschützt. Der obere Bereich der Betonwand mit der Promenade war mangels ausreichender Deckwerkshöhe überwiegend ungeschützt, so dass die angreifenden Wellen unmittelbar vor der Wand brechen konnten und ihre Druckkräfte auf den Kantenstein, die Betonwand und das landseitige Pflaster ausüben konnten. Vorhandene Spalten und Fugen sorgten dafür, dass sich dieser Wasserdruck fortpflanzte und zuerst der Kantenstein abgehoben und in der Folge die lose verlegten Pflastersteine gegen die Häuser geworfen wurden. Nur in Bereichen, in denen entweder das Deckwerk bis zur Oberkante der Betonwand incl. Kantenstein reichte oder ein besserer

Verbund des Kantensteines zur Betonwand gegeben war, wurde das Pflaster nicht geschädigt (vgl. Abbildung 19).



Abbildung 19: Promenade und Strandbereich in Süssau nach der Sturmflut (Foto: Ramboll, 25.10.2023).

In der zeitlichen Folge nach der Sturmflut wurden die Planungen für die Wiederherstellung der Promenade und des wasserseitigen Deckwerkes in Süssau durch die Gemeinde Herringdorf in Angriff genommen. In den Monaten Mai 2024 bis Oktober 2024 wurde das Deckwerk mit Wasserbausteinen der Klasse LMB 60/300 und einer wasserseitigen Fußpfahlreihe auf der Länge von rd. 500 m wiederhergestellt (vgl. Abbildung 20).



Abbildung 20: Promenade und nördlicher Strandbereich in Süssau mit neuem Deckwerk nach Wiederherstellung (Foto: Ramboll, 02.10.2024).

Weitere Schäden infolge der Sturmflut im Oktober 2023:

- Im nördlichen Abschnitt wurde der vorhandene Holzbohlenweg als verlängerte Promenade an der Deckwerksschulter vollständig zerstört (vgl. Abbildung 21, oben).
- Am nördlich anschließenden Kliff, wo der Regionaldeich nach Norden ausläuft, sind sehr starke Erosionen erkennbar. Das Kliff wurde mehrere Meter erodiert (vgl. Abbildung 21, Mitte und unten).



Abbildung 21: Zerstörter Holzbohlenweg (oben), nördliches Ende des Deckwerkes in Süssau (Mitte) mit angrenzendem Kliff (unten) (Foto: Ramboll, 25.10.2023).

4 Hinweise und Empfehlungen

Die Sturmflut im Oktober 2023 hat in den Gemeinden Großenbrode, Neukirchen (Ortsteil Sütel) und Heringsdorf (Ortsteil Süssau) sehr starke Zerstörungen verursacht. Aus den dokumentierten Schadensbildern können nachfolgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Die Deckwerke und die landseitigen Vorlandbereiche in den Bereichen Großenbrode und Süssau haben starke Schäden im Zuge der Sturmflut 2023 erlitten. Dafür sind der erhöhte Wasserstand und die zeitgleich aufgetretenen Wellenbedingungen maßgebend, so dass die Wellen auf dem oberen Deckwerk gebrochen sind. Die Schadensbilder zeigen, dass insbesondere der Übergangsbereich vom Deckwerk zum Vorland besser gegen brechende Wellen und die Einwirkungen des Wellenauflaufes gesichert werden sollte. Sofern technisch möglich, sollten die Deckwerksschulter (gemeinsam mit dem Vorland) erhöht, die Deckwerkssteine vergrößert und/oder die Deckwerksneigung verringert werden, um die Einwirkungen aus brechenden Wellen insgesamt zu verringern.
- Rampen und Treppen haben den Wellenauflauf auf die Promenade in Süssau oder in das Vorland begünstigt und so die Schadenswirkung unterstützt (vgl. Schäden in Sütel und Süssau). An dieser Stelle wird der Hinweis gegeben, dass etwaige Rampen oder Slipanlagen in vergleichbaren Situationen entsprechend erosionsstabil auszubilden sind. Darüber hinaus wird in gefährdeten Bereichen empfohlen, während der Sturmflutsaison entsprechende Störelemente wie z. B. geotextile Sandcontainer oder sandgefüllte Bigbags aufzustellen, um den Wellenauflauf und nachlaufende Schadensketten zu unterbinden bzw. zu reduzieren.
- Die Sturmflut im Oktober 2023 hat die Strandbereiche in Großenbrode, Sütel und Süssau stark erodiert. Abschnittsweise liegt die Mittelwasserlinie wie in Sütel und Süssau nunmehr unmittelbar am Deckwerksfuß an. Es wird empfohlen, weitergehende Untersuchungen zu Veränderungen der Unterwassertopografie durchzuführen, um nachfolgend abzuleiten, ob die Stranderosionen dauerhaft anhalten und welche Konsequenzen daraus für die Küstenschutzanlagen erwachsen. Darüber hinaus sollte untersucht werden, ob Strandvorspülungen zur Erhöhung der Sicherheit der Küstenschutzanlagen vorzunehmen sind.
- Entlang der Regionaldeiche in Großenbrode (Rethsollskamp, Großenbroder Moor und Rethwiese) und Süssau lagen nach der Sturmflut die Treibselgrenzen knapp unterhalb und punktuell auch auf der Deichkrone. Eine Überprüfung der Schutzhöhen der Regionaldeiche in Großenbrode, Sütel und Süssau wird empfohlen.
- Aufgrund teilweise muldenartig ausgeführter Vorlandbereiche wie in Süssau kommt es nach Starkniederschlägen oder auch nach der Sturmflut im Oktober 2023 zu einer großräumigen Vernässung des Vorlandes wasserseitig vor dem Regionaldeich. Dies führt zusätzlich auch zu einer Durchnässung des Regionaldeiches und reduziert dessen Standsicherheit. Im Ergebnis der Erfahrungen in Süssau wird empfohlen, in solchen Fällen eine Dränage oder ein Grabensystem anzulegen, um das Wasser aus dem Vorland kontrolliert abzuleiten.

5 Literaturverzeichnis

Hirschhäuser, Th.; Blümel, M.; Dey, Th.; Thiesen, H.; Peters, J.; Christiansen, L.; Franz, B.: Die Ostseesturmflut Oktober 2023 in Schleswig-Holstein. In: Die Küste, 94, <https://doi.org/10.18171/1.094103>, 2024.

Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (MELUND), Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein, Fortschreibung 2022.

Nöthel, H.; Neemann, V.; Hausmann, L.; Bauerhorst, H.; Schwuchow, N.: Ablauf der Ostseesturmflut vom Oktober 2023. In: Die Küste, 94, <https://doi.org/10.18171/1.094109>, 2024.

Perlet-Markus, I.: Schwere Sturmflut vom 20. Oktober 2023. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/_Anlagen/Downloads/Ostsee_Sturmflut_20231020.pdf.

Beyond the 2023 surge: Quantifying shoreline dynamics in the German Baltic Sea with Sentinel-2

Eike M. Schütt¹, Kerstin Stelzer², Jorrit Scholze², Marcel König², Lutz Christiansen³ and Natascha Oppelt⁴

¹ Earth Observation and Modelling, Department of Geography, Kiel University, Kiel, Germany
schuet@geographie.uni-kiel.de

² Brockmann Consult GmbH, Hamburg, Germany

³ Schleswig-Holstein Agency for Coastal Defence, National Park and Marine Conservation (LKN.SH), Husum, Germany

⁴ Earth Observation and Modelling, Department of Geography, Kiel University, Kiel, Germany

Summary

Monitoring coastal zones is essential for evidence-based coastal management. Commonly applied methods and technologies like beach surveys, aerial imagery, and Light Detection and Ranging (LiDAR) provide highly accurate data but are often limited in spatial coverage or monitoring frequency due to high costs. Satellite remote sensing has emerged as a promising and cost-effective alternative, offering frequent, large-scale shoreline observations. To facilitate rapid and precise satellite-based shoreline change analysis across large regions, we developed the Shoreline Extraction and Change Analysis Tool (SEaCAT). This Python-based toolkit leverages cloud technology to semi-automate key stages of data processing, including scene selection, shoreline extraction, and change analysis. We employ SEaCAT to assess the impact of the October 2023 storm surge on coastal morphology in two regions along the German Baltic Sea coast. By analysing the entire Sentinel-2 archive (July 2015 to June 2024), we contextualize the event within broader morphodynamic trends and observe post-storm recovery. Our findings reveal that due to differences in the surges' duration and intensity, it had a significantly higher morphodynamic impact in Angeln, Schleswig-Holstein, compared to Mönchgut, Mecklenburg-Vorpommern. Despite this, recovery processes in the months after the surge mitigated the surge's effects along most coastal sections. However, the Schleimünde sand spit emerges as an erosion hotspot, experiencing continued coastal recession for approximately six months post-surge due to a dramatically altered spit profile. Our study demonstrates that, although satellite-based shoreline monitoring may not achieve the accuracy of commonly employed methods, its frequent observations and low costs make it a valuable complement to existing monitoring strategies.

Keywords

shoreline monitoring, satellite derived shoreline, shoreline change analysis, Sentinel-2, storm surge, extreme event, erosion, coastal morphodynamics

Zusammenfassung

Das Monitoring von Küstenzonen ist eine wesentliche Grundlage für ein evidenzbasiertes Küstenmanagement. Gängige Methoden wie GPS-Vermessungen oder die Auswertung von Luftbildern oder Laserscans liefern zwar hochpräzise Daten, sind jedoch häufig aufgrund hoher Kosten in der räumlichen Abdeckung oder der Vermessungshäufigkeit eingeschränkt. Um diese Datenlücken zu schließen, bietet sich die Satellitenfernerkundung als vielversprechende und kostengünstige Methode an, die regelmäßige, großflächige Beobachtungen der Küstenlinie ermöglicht. Um eine schnelle und präzise satellitengestützte Analyse von Küstenlinienveränderungen über große Regionen hinweg zu erleichtern, haben wir das 'Shoreline Extraction and Change Analysis Tool' (SEaCAT) entwickelt. Dieses Python-basierte Toolkit nutzt Cloud-Technologie, um zentrale Schritte der Datenverarbeitung, wie die Szenenauswahl, Küstenlinienextraktion und Veränderungsanalyse größtenteils zu automatisieren. Mithilfe von SEaCAT zeigen wir die Auswirkungen der Sturmflut vom Oktober 2023 auf die Küstenmorphologie in zwei Regionen der deutschen Ostseeküste. Durch die Analyse des gesamten Sentinel-2-Archivs (Juli 2015 bis Juni 2024) setzen wir die Sturmflut in einen morphodynamischen Kontext und beobachten Veränderungen nach dem Sturm. Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Sturmflut aufgrund längerer Dauer und höherer Intensität einen deutlich stärkeren morphodynamischen Einfluss in Angeln, Schleswig-Holstein, als im Mönchgut, Mecklenburg-Vorpommern, hatte. Durch natürliche Ausgleichsprozesse in den Monaten nach der Sturmflut wurden ihre Auswirkungen auf die Küstenlinie in vielen Regionen abgemildert. Eine Ausnahme bildet der Nebrungshaken von Schleimünde, der aufgrund eines stark veränderten Höhenprofils bis etwa sechs Monate nach der Sturmflut einen Küstenrückgang verzeichnete. Mithilfe dieser Studie demonstrieren wir, dass satellitengestütztes Küstenlinienmonitoring zwar nicht die gleiche Genauigkeit herkömmlicher Methoden erreicht, durch kurze Aufnahmeintervalle und geringe Kosten aber trotzdem eine wertvolle Ergänzung zu bisher eingesetzten Methoden zum Küstenmonitoring darstellt.

Schlagwörter

Küstenmonitoring, Küstenlinie, Uferlinie, Satellit, Sentinel-2, Sturmflut, Erosion, Morphodynamik, Veränderungsanalyse

1 Introduction

Shorelines are the dynamic boundary between land and sea. Wind, waves and currents constantly change shoreline morphology through erosion and accumulation of sediments (Wright and Short 1984, Weisse et al. 2021, Castelle and Masselink 2023). Extreme events, such as storm surges, significantly accelerate morphological evolution and may lead to abrupt shoreline changes (Łabuz and Kowalewska-Kalkowska 2011, Harley et al. 2017). With the expected increase in extreme events due to climate change and the dynamic, non-linear response of coastal morphology to sea level rise, morphological evolution will expedite further (Łabuz 2015, Passeri et al. 2015, Vousdoukas et al. 2020, Meier et al. 2022, Pang et al. 2023).

As shoreline dynamics continue to evolve, morphological changes pose increasing risks to communities, assets, and infrastructure in the coastal zone. These hazards include flooding, property damage and loss of land through erosion (Nicholls and Cazenave 2010, Hallegatte et al. 2013). Addressing these threats requires a comprehensive understanding

of coastal processes and an effective coastal management (Jacobson et al. 2014, Williams et al. 2018).

Coastal management critically depends on accurate and frequent monitoring data to identify morphodynamic hotspots and evaluate the effectiveness of coastal protection measures (Pikelj et al. 2018, Williams et al. 2018), but existing monitoring schemes are limited in spatio-temporal coverage. A common method to quantify morphodynamics is shoreline change analysis (SCA, Birmingham and Fernandez-Nunez 2020). Currently, SCA often relies on data from beach surveys along pre-defined transects or manual interpretation of orthophotos (Boak and Turner 2005, Dolch 2010). Also, more advanced methods such as photogrammetry or Light Detection and Ranging (LiDAR) surveys with drones or airplanes are increasingly often employed to acquire data with high accuracies (Casella et al. 2020, Christiansen 2021). However, these methods are either labour-intensive and limited in coverage or relatively expensive, often leading to infrequent data collection (Boak and Turner 2005, Apostolopoulos and Nikolakopoulos 2021, Christiansen 2021).

Satellite Earth Observation (EO) data can address these limitations by offering a cost-effective solution for large-scale shoreline monitoring with frequent revisits (Vitousek et al. 2023). For example, data of the Sentinel-2 satellite constellation of the European Space Agency (ESA) is distributed under an open data license, keeping the costs of data analysis inherently low (ESA 2015). Sentinel-2 offers a 10–60 m spatial resolution with a revisit time of 5 days at the equator and 2–3 days in northern Europe, theoretically enabling near-real time detection of shoreline change. The daily growing archive and continuation of the program in coming decades make this program particularly interesting for shoreline monitoring.

However, despite the advantages of EO data, using it for shoreline monitoring presents its own set of challenges. The substantial data volumes of satellite archives, even for relatively small study areas, pose significant technical challenges, requiring substantial computational resources (Vitousek et al. 2023). To effectively manage these large datasets and maintain a reasonable level of effort for processing the data, a high degree of automation is necessary, including data selection and preparation, shoreline extraction and change analysis. Several automated methods for land-water segmentation have been developed, most importantly spectral water indices, which enhance the contrast between land and water (Toure et al. 2019, Apostolopoulos and Nikolakopoulos 2021). Combining these indices with fixed or adaptive thresholding techniques allows to automatically identify the land-water boundary in EO data. In recent years, approaches to delineate the shoreline along the land-water boundary with sub-pixel accuracy have emerged (Hagenaars et al. 2018, Bishop-Taylor et al. 2019).

The increasing availability of cloud-computing platforms, particularly the Google Earth Engine, opened new possibilities, such as first global-scale studies on shoreline change (Luijendijk et al. 2018, Mentaschi et al. 2018). However, achieving the highest possible accuracy in shoreline extraction requires careful selection of water indices and parameter settings, which vary depending on environmental factors like coastal landforms and water characteristics (Bishop-Taylor et al. 2019, Schütt 2022). Thus, EO-based shoreline monitoring at regional scales should ideally be tailored to the specific conditions of the study area.

To address these challenges, we developed the Shoreline Change and Analysis Tool (SEaCAT), a flexible, sensor-agnostic semi-automatic pipeline that optimises the entire

process from data ingestions to shoreline extraction. SEaCAT extends similar shoreline extraction toolkits, such as CoastSat (Vos et al. 2019) or CoastSeg (Fitzpatrick et al. 2024) by an integrated, highly automated shoreline change analysis module and further offers interactive quality screening, data exploration and visualisation. The pipeline leverages cloud-computing technology to efficiently manage large volumes of satellite data without the need to download raw data. By automating key steps, such as the identification of suitable scenes, shoreline extraction and shoreline change analysis, our approach minimises labour-intensive aspects of EO-based shoreline monitoring while maintaining a high level of accuracy. This integrated, scalable, and transferable approach enables EO-based shoreline monitoring across large spatial and temporal scales.

In this study, we demonstrate our approach by analysing the impacts of the October 2023 storm surge on the German Baltic Sea coast. We focus on two study areas: one in Schleswig-Holstein and the other in Mecklenburg-Vorpommern. In both study areas, we delineate shorelines from the entire Sentinel-2 archive (July 2015 to June 2024) and use this data to analyse the surge's effect on coastal morphology, considering both longer-term variability and trends, identify erosion hotspots and monitor post-storm recovery. Finally, we use our findings to critically assess the potential of EO-based shoreline monitoring to supplement existing monitoring efforts.

2 Methods

2.1 Study areas and the October 2023 storm surge

We chose two study sites at the German Baltic Sea, which were exposed to the easterly winds and waves of the October 2023 storm surge (Figure 1).

The first study area, “Angeln”, is located in the federal state of Schleswig-Holstein and extends about 18 km between the two sand spits Geltinger Birk in the north and Schleimünde in the south (Figure 1B). It mainly consists of beaches with narrow dunes or beach ridges and a 3 km long eroding soft cliff (Haffskoppel) in the centre of the study area (Ziegler and Heyen 2005, LKN.SH 2020). The net long-shore sediment transport splits at this cliff and is directed away from it (Eiben 1992). The cliff thus acts as major sediment source, together with inputs from submarine abrasion platforms (Averes et al. 2021). Large parts of this study have no erosion control, except three groin fields (Hasselberg, Oehe, Schleimünde) and few revetments.

The second study area is located on the “Mönchgut” peninsular on the island of Rügen, Mecklenburg-Vorpommern (Figure 1C). It extends 18 km from the town of Sellin in the North to the southern-most point of the peninsular, Südperd, and features a series of wide sandy beaches and four cliffs: Granitz, Nordperd, Lobber Ort, and Südperd (arranged from north to south). Erosion control primarily involves regular beach nourishments between the towns of Göhren and Thiessow (StALU 2021). In some sections of the cliff coast, riprap, revetments, and detached breakwaters are employed, while in others erosion is permitted to provide sediment for nearby beaches.

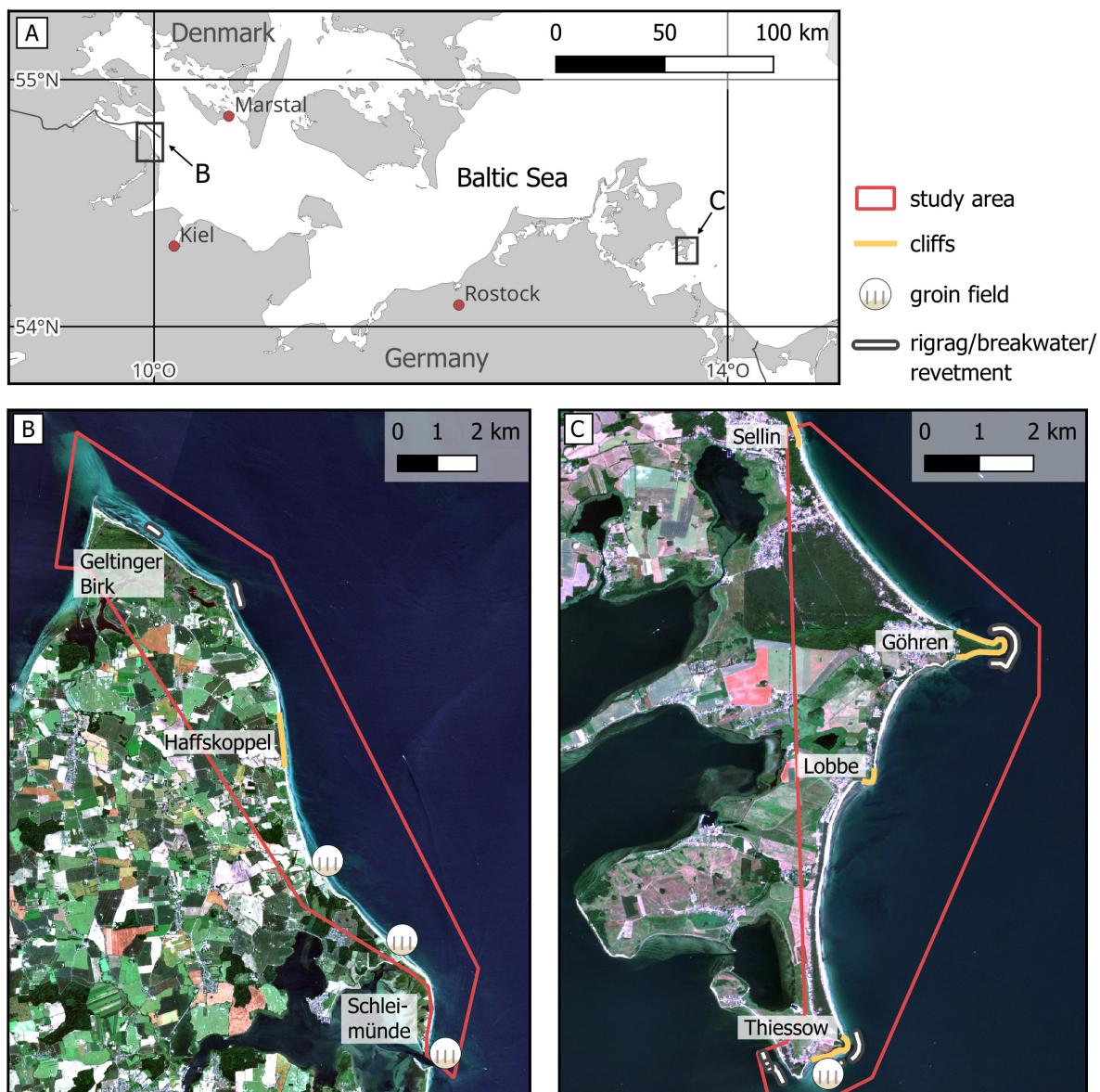


Figure 1: Study areas. A: Overview map of the German Baltic Sea coast. Locations of the subsets B and C are outlined in black. B: Study area “Angeln”. C: Study area “Mönchgut”. CRS: in A WGS84, in B: UTM32N, in C: UTM33N. Background maps in B and C are Sentinel-2 True Colour RGBs.

In the second half of October 2023, prolonged north-east to easterly gale-force winds over the Baltic Sea caused a severe storm surge along the German Baltic Sea coast (Kiesel et al. 2024). The duration of the event and peak water levels increased from east to west. At Thiessow (study area Mönchgut), the tide gauge recorded a surge duration of 22 hours and a peak water level of 130 cm above mean sea level (MSL), which is categorised as moderate storm surge in the German Baltic Sea (Figure 2A). The tide gauge at Schleimünde (study area Angeln) registered a peak water level of 207 cm above MSL, the highest recorded at this station since 1904 (MELUND 2022). The surge duration at this station was 45 hours, of which 16 hours were a severe storm surge (> 150 cm above MSL).

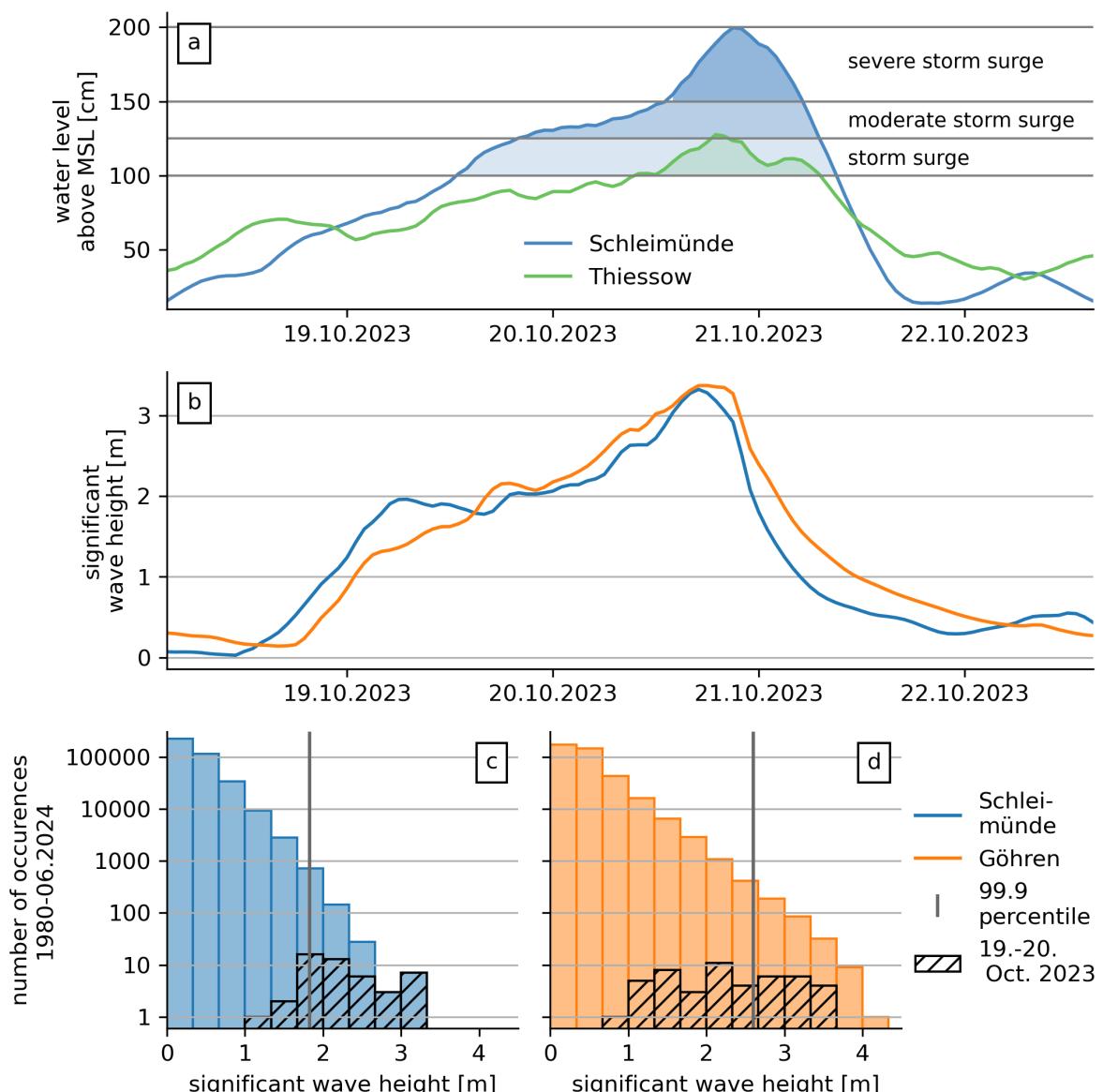


Figure 2: Water level measurements and modelled wave heights during the 2023 storm surge. A: Water levels at the tide gauges of Schleimünde (study area Angeln) and Thiessow (study area Mönchgut). The timeseries are smoothed to hourly means for better readability. Indicated storm surge categories follow the definitions of the Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH). Tide gauge data were provided by the Federal Waterways and Shipping Administration (WSV), made available by the Federal Institute of Hydrology (BfG). B: Significant wave height data for locations off Schleimünde (study area Angeln) and Göhren (Mönchgut). C and D show the distribution of wave heights since 1980 off Schleimünde and Göhren, respectively. Wave height distributions of the 19. and 20.10.2023 are shown in black. Note the logarithmic scale on the y axis. See Lindgren et al. (20024) for more details on the wave model.

The gale-force winds from north-easterly and easterly directions generated large waves in the south-western Baltic Sea. Figure 2B-D present modelled wave height data for both study areas from a hindcast model (Lindgren et al. 2024). While the maximum significant wave height near the shore during the storm surge were similar in both study areas (~ 3.3 m, Figure 2B), this was the highest wave height modelled in the Angeln study area since 1980 (Figure 2C), exceeding previous events by about 70 cm. Generally, the Mönchgut study area experiences a higher-energy wave climate than in Angeln. Although

similar and even stronger wave events have been observed on a decadal timescale, wave heights during the October 2023 storm surge partially exceeded the 99.9 percentile and can thus still be categorized as extreme (Figure 2C and D).

2.2 SEaCAT

We developed SEaCAT for fast semi-automatic monitoring of shoreline changes based on satellite imagery. SEaCAT includes a multi-step workflow for shoreline delineation including selection of suitable satellite images for a given region and time range of interest and subsequent extraction of the land-water boundary based on spectral indices, achieving sub-pixel accuracy of about one-third of the satellite's spatial resolution in microtidal environments (Schütt 2022). Subpixel co-registration of satellite images can be achieved using AROSICS (Scheffler et al. 2017). Multiple quality screening and filtering steps ensure reliable results. Shoreline change can then be quantified by a set of traditional and newly developed algorithms. SEaCAT is implemented in Python and builds on the xcube data cube toolkit (xcube developers, n.d.) and its Sentinel Hub API integration for accessing satellite image archives in the cloud, while also allowing to easily analyse raster datasets from other sources. Extensive sensitivity analysis and validation of this tool was conducted in Schütt (2022).

Here we used SEaCAT to derive SDS from the entire Sentinel-2 archive (August 2015 to June 2024) for both regions of interest, respectively.

Initially, we selected all Sentinel-2 scenes with less than 20% cloud cover along the coastline and water levels within ± 30 cm of mean sea level (MSL) at acquisition time using local gauge data. The gauge data were provided by the Federal Waterways and Shipping Administration (WSV), made available by the Federal Institute of Hydrology (BfG). The scene selection based on the water level ensures to capture longer-term shoreline change and avoid outliers caused by extreme water level events. The influence of residual water level-related biases on individual SDS and derived trends will be discussed later.

A manual quality screening excluded scenes with residual cloud contamination along the shoreline and those with breaking waves, which introduce bias to SDS positions (Hagenaars et al. 2018).

SEaCAT extracts shorelines from the selected scenes by first emphasizing the contrast between land and water using a spectral water index and then generating the land-water boundary line using the marching squares algorithm (Cipolletti et al. 2012) in combination with Otsu's adaptive thresholding (Otsu 1979). Previous validation efforts of SEaCAT tested six water indices (NDWI (McFeeters 1996), MNDWI (Xu 2006), AWEInsh (Feyisa et al. 2014), MuWI (Wang et al. 2018), ANDWI (Rad et al. 2021) and the NIR-Blue Normalized Index, NBNI) at six validation sites in the Baltic Sea and the North Sea against reference shorelines from laser scans and orthophotos (Schütt 2022). In the Baltic Sea, NBNI performed best and was selected as spectral water index in this study. It utilizes the strong contrast of water reflectance in different parts of the electromagnetic spectrum and is defined as:

$$NBNI = \frac{Blue - NIR}{Blue + NIR} \quad (1)$$

The marching squares algorithm is used to generate contour lines from a two-dimensional grid of scalar values along a provided threshold. It iterates over the grid and linearly interpolates the position of the contour line within each cell based on the values at the cell corners. For example, if two adjacent cell corners, c_1 and c_2 , have values of 0.0 and 1.0, and the threshold is set to 0.8, the contour line would be placed at 80% of the distance between c_1 and c_2 . This interpolation enables the extraction of contour lines with sub-pixel precision and results in a smooth representation of the shoreline (Bishop-Taylor et al. 2019, Vos et al. 2019). For each image we determined the optimal NBNI threshold for shoreline detection using Otsu's adaptive thresholding. At validation sites most similar to our study areas, a sandy beach and a cliff coast close to the city of Kiel, the mean absolute error of this setup was 2.9 and 3.5 m and the bias 0.7 and 2.5 m, respectively, compared to shorelines derived from LiDAR data and orthophotos (Schütt 2022).

We quantify shoreline change with our proposed Directional Buffer Overlay method (DBO). This approach combines the strengths of traditional methods like the transect-from-baseline (TFB) and the buffer overlay (BO; Heo et al. 2009) methods while mitigating their respective weaknesses, including TFBs sensitivity to baseline and transect definition (Khallaghi and Pontius 2022) or BOs inability to specify the change direction (Heo et al. 2009). DBO first divides the coast into small segments. In this study, we used a spacing of 100 m between the transects. In each segment, a series of buffers is used to determine the average shoreline shift between consecutive shoreline observations, creating a time series of a shorelines' cross-shore position. These time series are then analysed statistically to quantify shoreline change. The segmentation of the coastline is broadly based on Jackson et al. (2012) but optimised for automation (Figure 3). Alternatively, user-defined baselines and transects can be used for the analysis.

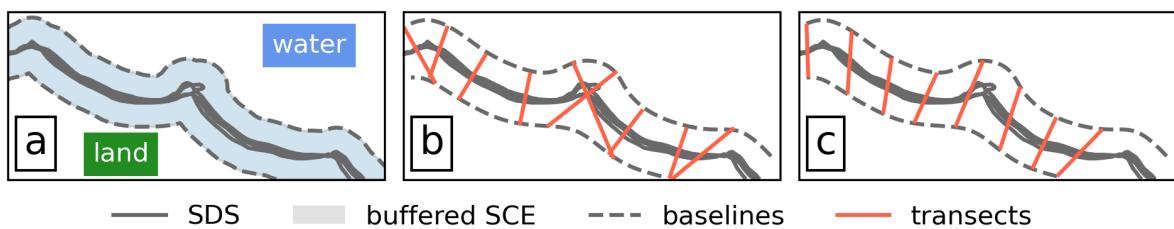


Figure 3: Automatic baseline and transect generation in SEaCAT. A: Seaward and landward baselines are generated around the buffered shoreline change envelope (SCE). B: Baselines are smoothed with a Gaussian filter and transects are generated perpendicular from the seaward to the landward baseline. C: Smoothing of the transects azimuth and filtering removes crossing transects.

After segmenting the coastline, a modification of the BO method (Heo et al. 2009) is used within each segment to estimate the average shoreline displacement between consecutive SDS. A single-sided buffer is created on the seaward side of the first observation with a width much smaller than the satellites pixel resolution (Figure 4). In this study, we used an increment of 1 m. We then determine the length of the new shoreline inside the buffer and store this value. This procedure repeats iteratively as the buffer moves away from the first shoreline observation until no parts of the new shoreline are within the buffer. The procedure is mirrored on the inshore side of the first shoreline observation with erosional shifts stored as negative values. This iterative buffering derives the probability density function (PDF) of distances between the two lines, accounting for the shift direction.

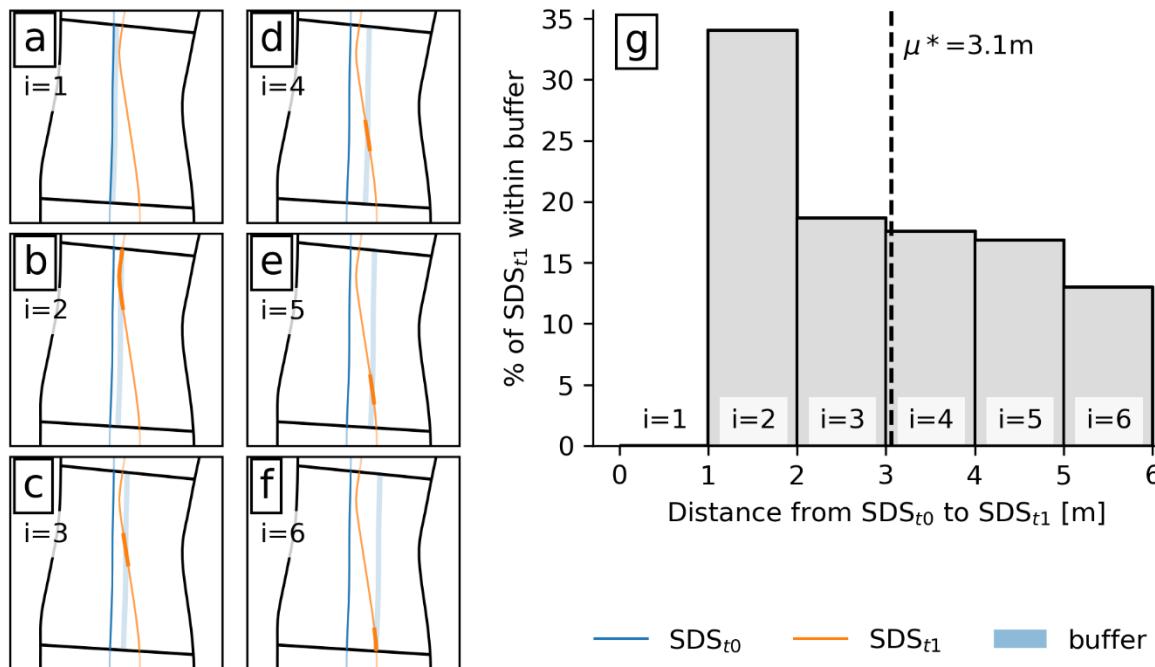


Figure 4: Schematic diagram of the distance measurements with DBO. In this example, we measure the distance from SDS_{t0} and SDS_{t1} . A-F show the moving buffer from SDS_{t0} in each iteration i . The part of SDS_{t1} in the buffer is indicated in bright. G shows the histogram of the distances between SDS_{t0} and SDS_{t1} . The dashed line indicates the weighted average distance (μ^*).

We derive the average shoreline shift between the two lines by calculating the weighted average of this distribution:

$$\mu^* = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \omega_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i} \quad (2)$$

where μ^* is the weighted mean distance, N the number of bins in the distance distribution, x the centre distance of a bin and ω the proportion of the new shoreline observation within a bin.

Sensitivity analysis of DBO have proven the robustness of this method (Schütt 2022). In contrast to the TFB method, DBO is not sensitive to the definition of baselines, which is a prerequisite for automatic SCA. Moreover, the increment in the buffer analysis has insignificant influence on derived distances if it is $< 20\%$ of the pixel resolution.

To estimate shoreline changes over time, SEaCAT runs DBO iteratively for each consecutive pair of observations in the time series to generate a time series of cross-shore positions. To quantify shoreline change, we derive five key measures, including Net Shoreline Movement (NSM), Shoreline Change Envelope (SCE), end-point rate (EPR) and linear regression rate (LRR; see Birmingham and Fernandez-Nunez (2020) for definition and discussion).

In this study, we focus on the LRR, which reflects the time averaged linear trend of shoreline change. To ensure the reliability of LRR calculations for any subset of the dataset, we verify that the distribution of water levels in the subset is consistent with that of the entire timeseries by performing a Kolmogorov–Smirnov test ($p > 0.05$).

3 Results

3.1 Angeln

After filtering for water level, cloud cover, and completing the final manual quality control, we retained 125 SDS observations in the Angeln study area from the Sentinel-2 archive, from which the change of the coastline was determined. In three small areas, shadows from tall trees near the shoreline were misclassified as land by our water index. These areas were masked to exclude erroneous SDS from further analysis.

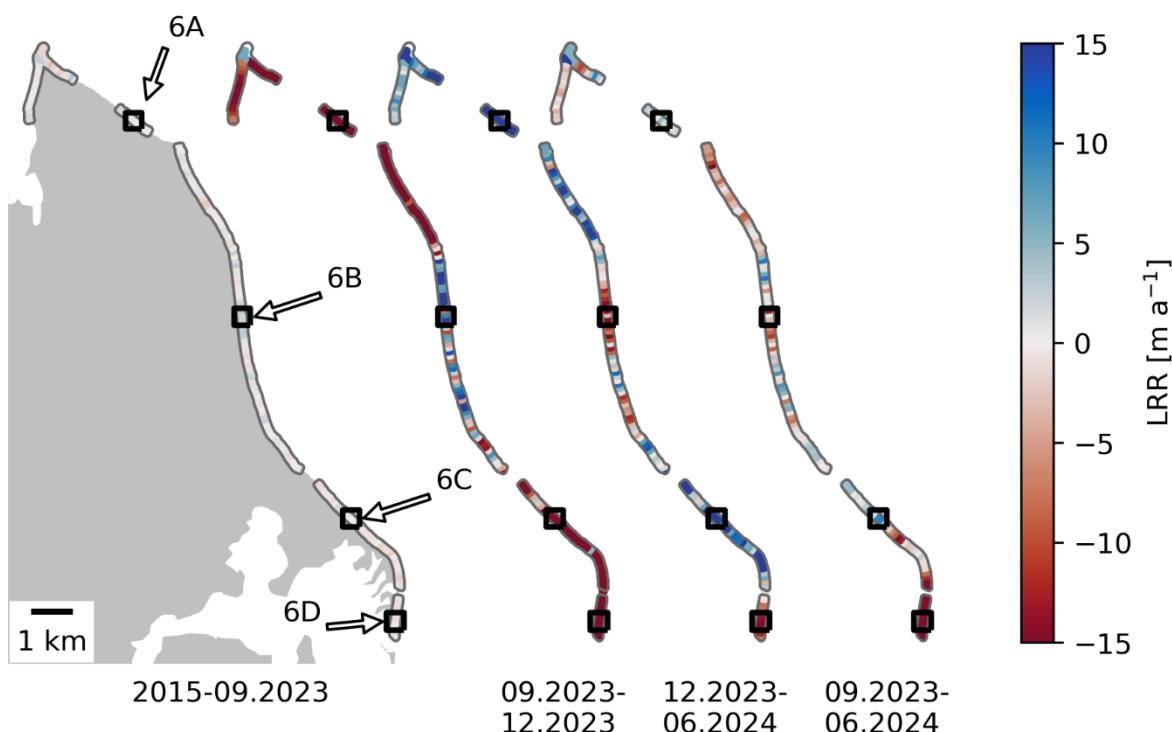


Figure 5: Linear shoreline change rates (linear regression rate, LRR) in the Angeln study area derived with SEaCAT for different periods (left to right): baseline period, immediate post-storm surge, stabilization phase and post-storm recovery phase. Negative (positive) trends, i.e. erosion (accretion) are shown in red (blue). Black boxes show the locations of the cross-shore subsets in Figure 6.

Our SCA reveals distinct patterns of gradual erosion and accretion in the baseline period prior to the October 2023 surge event (Figure 5). Average absolute change during the eight years before the surge were lower than one m a^{-1} . Since the surge, morphological change has accelerated. In the post-storm recovery phase between September 2023 and June 2024, 64% of the studied coastline showed a shoreline retreat. Erosion hotspots are the Schleimünde sand spit and the coastline between Haffskoppel and Geltinger Birk. The centre of the study area, i.e. the Haffskoppel cliff and adjacent beaches, shows complex patterns of erosion and accretion.

In the immediate post-storm period, i.e. the initial three months after the surge until December 2023, significant erosion especially in the northern and southern part of the study area can be observed, while at the Haffskoppel cliff we registered shoreline advance (Figure 5 and Figure 6B). In the following stabilization phase between December 2023 and

June 2024, trends reversed in most places, indicating a beginning shoreline recovery. At Schleimünde, however, erosion continued at fast rates until May 2024 (Figure 6D).

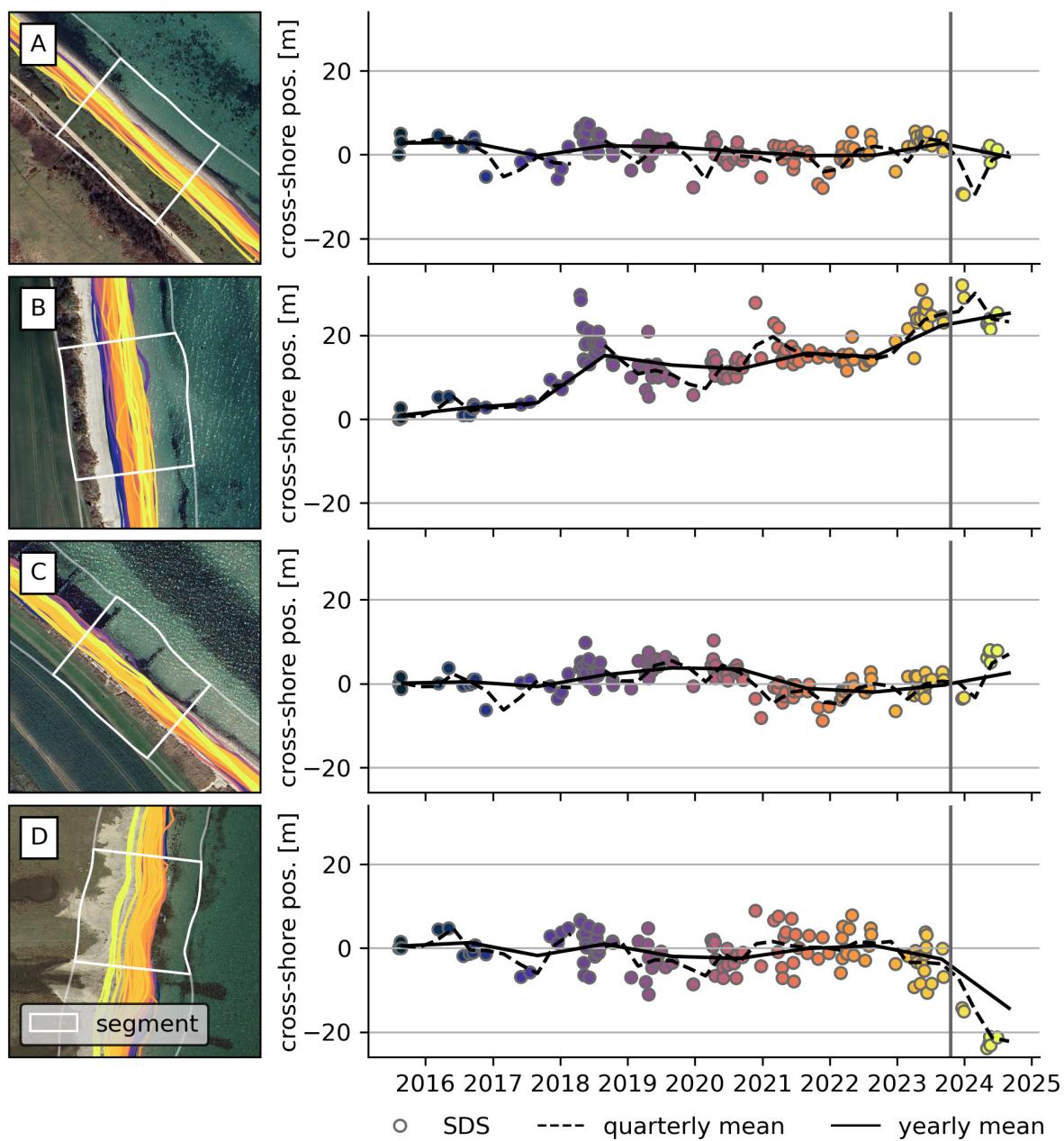


Figure 6: Cross-shore shoreline positions in selected segments of the Angeln study area. Locations of each segment are indicated in Figure 5. The left column shows delineated shorelines, the right column provides cross-shore positions of each shoreline observation. Colour coding indicates the time of a shoreline observation. The vertical grey line in the right column indicates the October 2023 storm surge.

3.2 Mönchgut

After our quality control, 118 SDS since July 2015 remained in our dataset, including 9 observations collected after the October 2023 storm surge. We masked two sections of the coast where shadow confusion along north-facing cliffs impaired our SDS results.

The baseline period in Figure 7 highlights long-term erosion patterns at the Lobbe cliff and the southernmost point at Thiessow before the October 2023 surge (see also Figure 8D). Our SCA also reveals positive shoreline change rates along the beaches between Göhren and Thiessow. However, a closer inspection reveals that these positive change rates can be attributed to single shoreline advancements in 2017 (Figure 8C) and 2021 (Figure 8B).

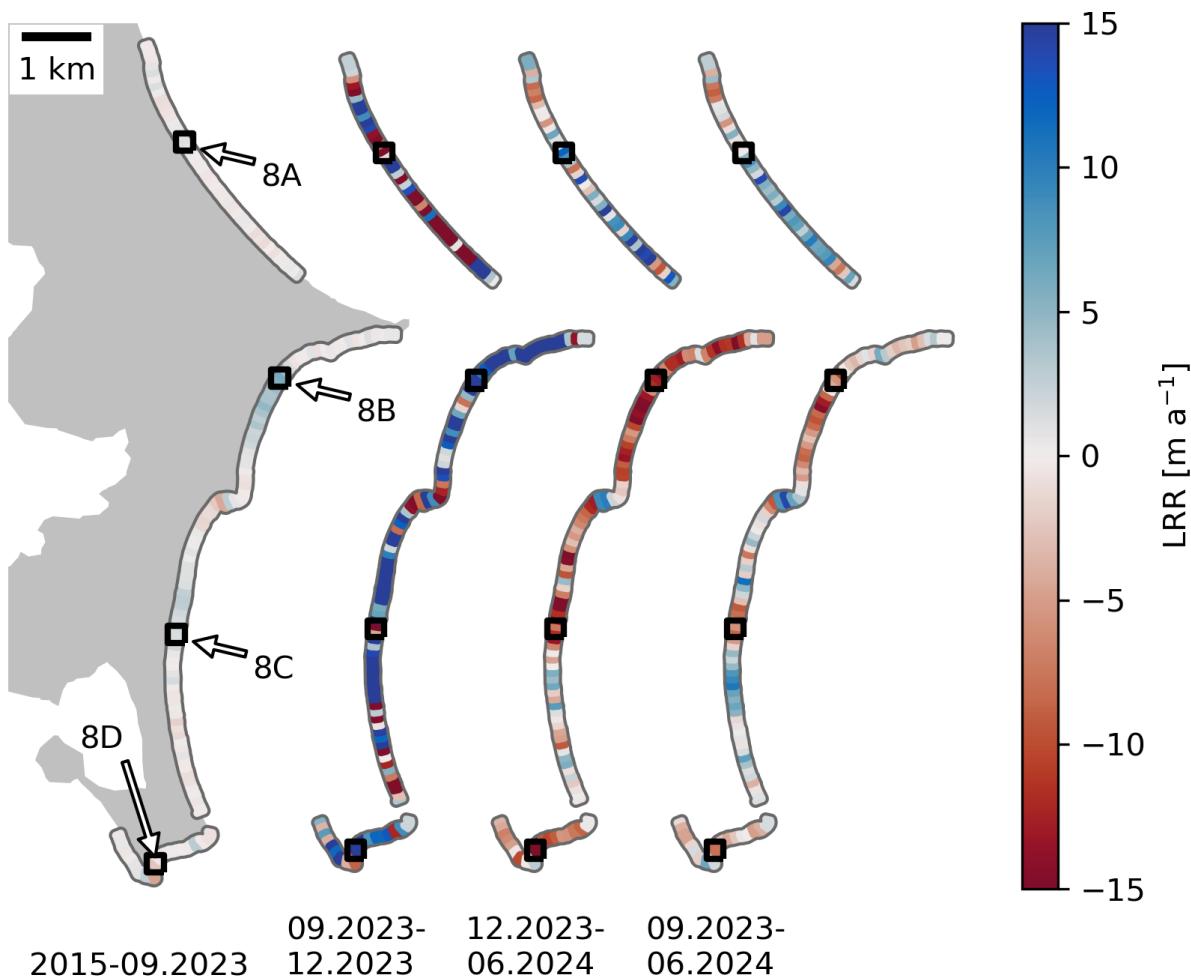


Figure 7: Linear shoreline change rates at Mönchgut derived with SEaCAT for different periods (left to right): baseline period, immediate post-storm surge, stabilization phase and post-storm recovery phase. Black boxes in A show the locations of the cross-shore subsets in Figure 8.

After the surge, our SCA reveals net shoreline retreat along half of Mönchgut's coastline in the post-storm recovery phase until June 2024 (Figure 7). Erosion is especially evident at the beach between Göhren and Lobbe (Figure 8B), while we observe net accumulation at beaches north of Göhren and north of Thiessow. However, initial changes after the surge until December 2023 show an almost reversed pattern with erosion north and accumulation south of Göhren. This suggests that the October 2023 storm surge had only a short-term impact on coastal morphology, with most changes being reversed over the following months. This is further supported by the cross-shore positions in Figure 8, which suggest that effects of this event were within the range of longer-term variability.

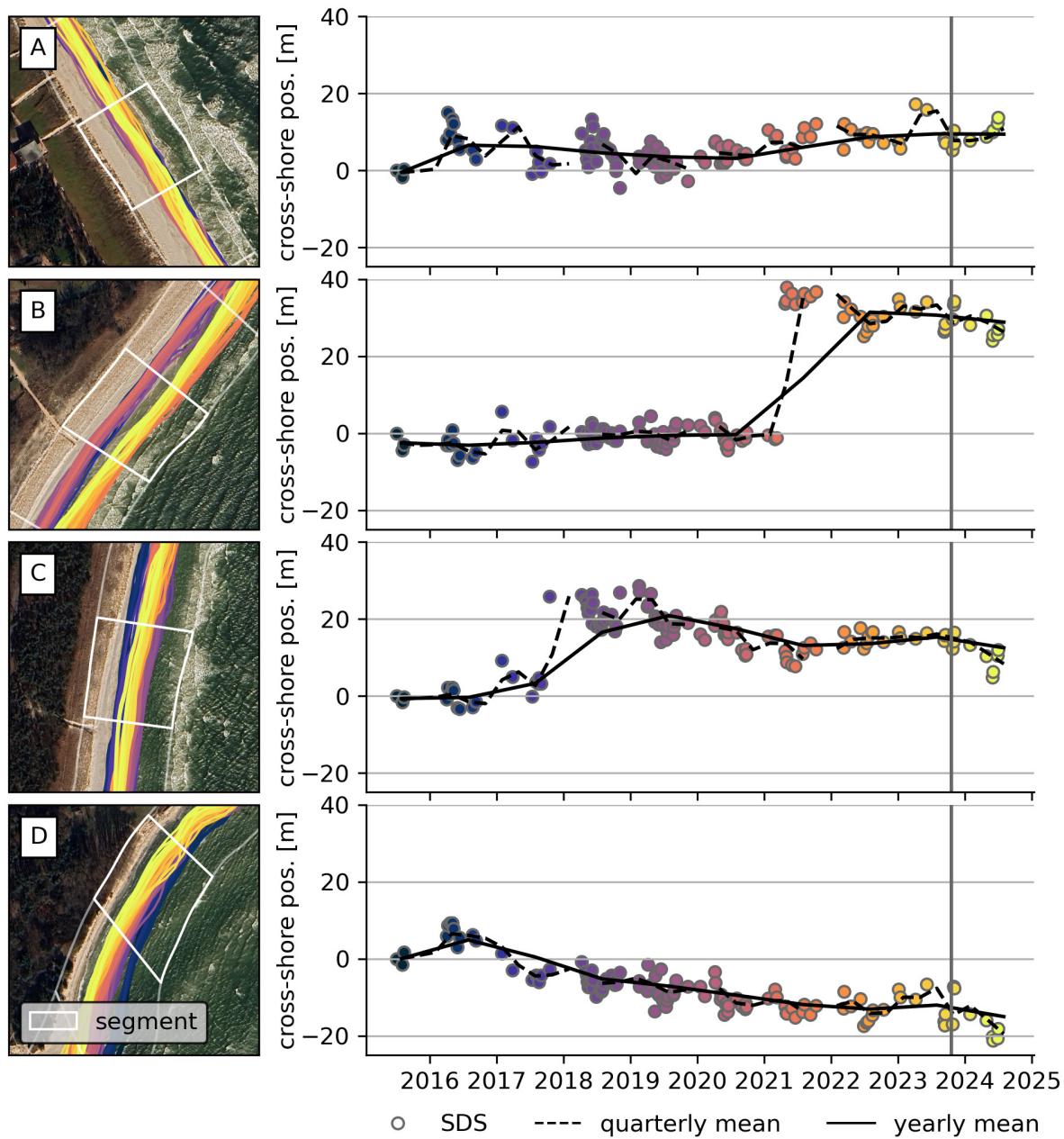


Figure 8: Cross-shore shoreline positions in selected segments of the Mönchgut study area. Locations of each segment are indicated in Figure 7. The vertical grey line indicates the October 2023 storm surge. The figure follows the same format as Figure 6.

4 Discussion

4.1 Effects of the storm surge on coastal morphodynamics

The degree of impact of the October 2023 storm surge differs considerably between our two study sites. It is significantly larger in the more westerly Angeln study area than at Mönchgut, where morphological changes caused by this event are within the range of morphodynamics observed since 2015. This pattern cannot be attributed solely to wave heights, as these were comparable in both study regions (Figure 2B). However, given Mönchgut's

higher-energy wave climate, it is plausible that its beaches feature an adapted sediment distribution and slope, which may have contributed to a greater resilience to the storm surge (Angnuureng et al. 2017). Furthermore, both longer surge duration and peak water levels created a higher morphodynamic potential in Angeln (Figure 2, Łabuz and Kowalewska-Kalkowska 2011). In Angeln, water levels exceeded those of a 200-year event by approximately 10 cm, while in Mönchgut, they were about 30 cm lower than a 200-year event (Kiesel et al. 2024).

In the Angeln study area, the Schleimünde sand spit showed the most significant morphological changes, characterized by an accelerated shoreline retreat lasting until approximately six months after the event. This can likely be attributed to drastic changes in the horizontal profile of the spit, which were reported by early on-site investigations (pers. comm. Christian Winter, 23.08.2024). Wind and waves destabilized beach ridges in the east of the spit, moving a considerable volume of material from the beach ridges westward, burying vegetation underneath (Figure 9). Therefore, the profile at the shoreline to the open Baltic Sea flattened, causing a westward movement of the shoreline. Three minor storm surges in January and February 2024 (highest water level 116 cm above MSL) likely contributed to further shoreline retreat. True colour satellite images suggest that the spit profile is not reverting to its pre-surge shape, indicating a lasting change of the spit's morphology (Figure 9C). A more in-depth analysis of this area with altimetry data is needed to verify this hypothesis, quantify volumetric change and investigate potential implications for the spits mid- and long-term structural resistance.

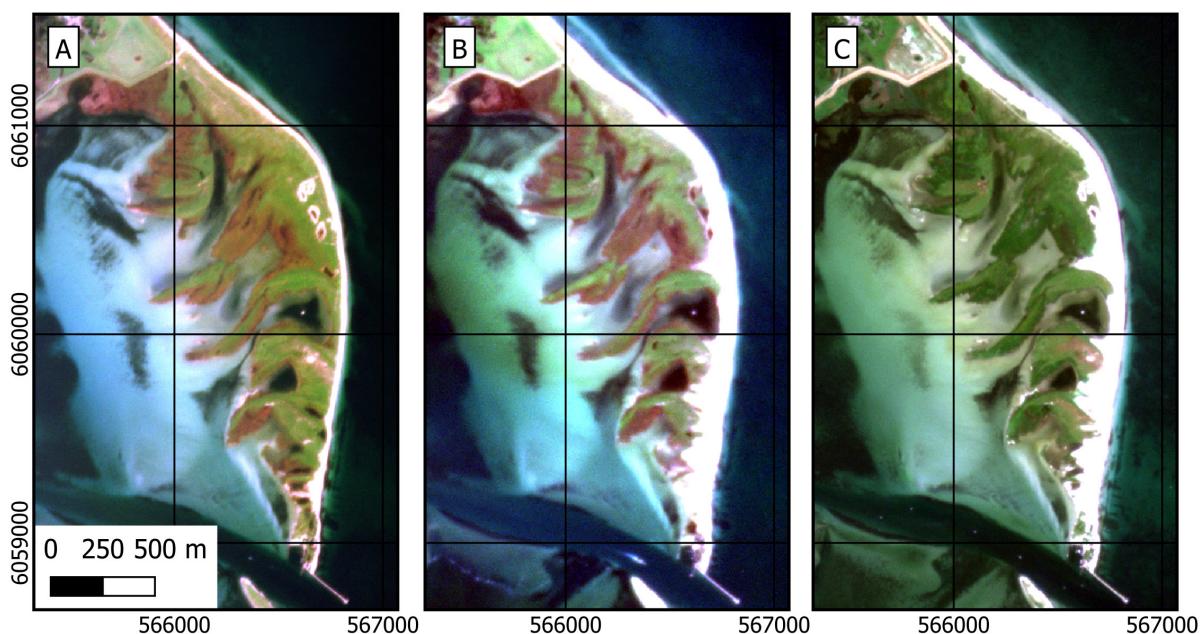


Figure 9: True Colour RGB Planet SuperDove images of the Schleimünde sand spit (Planet Labs 2024). A: Before the surge (18.10.2023). B: Immediately after the surge (23.10.2023). C: 8 months after the storm surge (25.06.2024). CRS: UTM32N/WGS84 (EPSG:32632).

The centre of the Angeln study area shows a complex pattern of erosion and accretion directly after the storm surge. This is likely an effect of local cliff collapses at Haffskoppel, which released new material into the system and may initially move the shoreline seaward (Brooks and Spencer 2010). This effect can also be observed in previous years: notable shoreline advancements in April 2018, November 2020, and May/June 2023 follow storm

surges or wind storms from easterly directions shortly before the shoreline observation (BSH 2018, 2020, 2023).

The eroded cliff material initially deposited in front of the cliff toe is redistributed according to its grain size and transport capacity in both cross-shore and long-shore sediment transport directions (Averes et al. 2021). The long-shore sediment transport splits at Haffskoppel, allowing the redistribution of material to both northerly and southerly directions (Eiben 1992). The material deposits in sink areas such as the sand spit at Geltinger Birk or the groin field in Figure 6C. This highlights the importance of cliffs as sediment source for this sediment-starved environment (Averes et al. 2021).

The widespread shoreline recovery along the sandy beaches in the months following the surge (Figure 5) is further supported by a reduction of average wave energy during spring and summer. This seasonal effect causes a beach profile transition from a narrower beach during winter to a wider beach during summer, as net onshore transport of material stored in nearshore bar systems increases (Schwarzer et al. 2003, Senechal and Ruiz de Alegria-Arzaburu 2020). Evidence for this seasonal effect along sandy beaches in the Angeln study area can be seen in the years before the 2023 surge in subsets A, C and D of Figure 6.

In the Mönchgut study area, linear change rates observed in the shorter periods following the storm surge deviate considerably from the long-term changes since 2015 (Figure 7). However, cross-shore positions in Figure 8 do not indicate a substantial or only a short-lived impact of the storm surge on the shoreline. Considering the comparably low intensity of the storm surge and the likely higher resilience of beaches in the Mönchgut study region to wave events of this magnitude, it is not surprising that the shoreline changes induced by the October 2023 storm surge fall within the range of observed long-term morphodynamics. The higher change rates seen after the surge in Figure 7 can be attributed to the brief assessments periods, which capture short-term, event-driven alterations leading to exaggerated rates of shift when extrapolated to annual rates. Among these events is, despite the October 2023 surge, one other storm surge in January 2024 (103 cm above MSL) and 14 events with elevated water levels ($50 \text{ cm} < \text{water level} < 100 \text{ cm}$). Other likely contributing elements include seasonal changes in wave patterns (Siewert et al. 2015) or precipitation-driven cliff collapses, which often have a phase lag after triggering events (Dietze et al. 2020).

Although the morphodynamic effects of the October 2023 surge were low in the Mönchgut study area, our data reveals other distinct morphodynamic patterns. Specifically, along many parts of the exposed beaches between Göhren and Thiessow, we observed short-term accretionary events of large magnitude, which temporarily offset otherwise negative shoreline trends. These can be attributed to single beach nourishments in 2017 (Figure 8C) and 2021 (Figure 8B). Nourishments of these beaches are carried out regularly to compensate sediment deficits in this area (StALU 2021). The nourishments shifted the shoreline seaward by approximately 20-35 meters. These single events mask the longer-term trend of erosion, which can be observed after the nourishments at both beaches. That coastal morphodynamics in this area are dominated by nourishments is typical for soft coasts of Mecklenburg-Vorpommern, where annual nourishment volumes amount to about 0.5 million m^3/a (StALU 2021, Tiede et al. 2023). The trends of erosion after the nourishments further underscore the need for regular nourishments for preserving the beach. At the same time, regular nourishments can create a misleading sense of security regarding coastal hazards, possibly inflating property values (Gopalakrishnan et al. 2011)

and encouraging both investments and relocations into the coastal zone, which in turn increases coastal risks (Tiede et al. 2023).

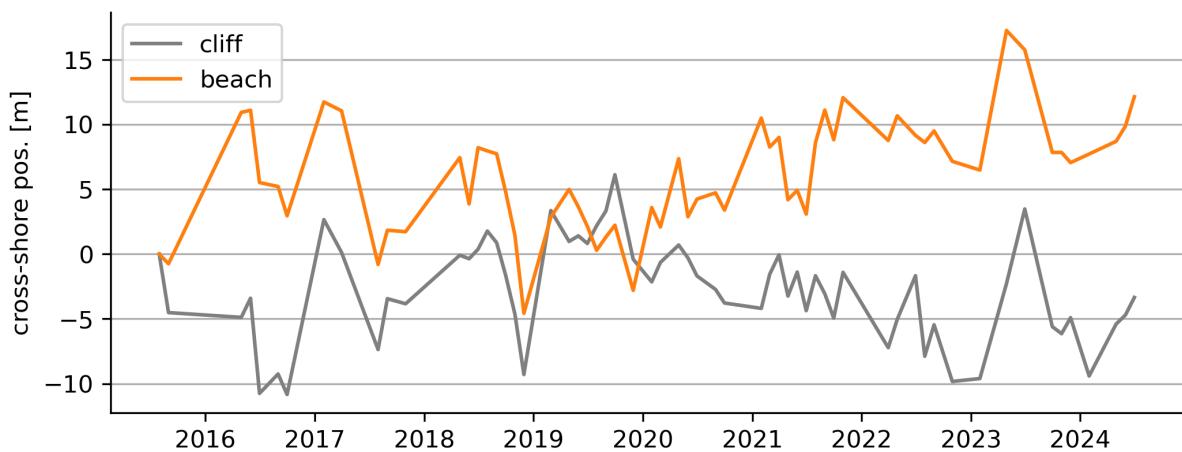


Figure 10: Mean monthly shoreline position of a cliff segment (north-west corner of the study area) and the beach segment from Figure 8A.

The beach between Göhren and Sellin is not nourished, however, it shows no major trends since 2015 (Figure 7, Figure 8A). Material eroded at the unprotected Granitz cliff at Sellin supplies this beach and compensates losses (pers. comm. Ulrich Floth, 23.07.2024). In fact, the significant negative correlation between shoreline positions of the Granitz cliff and the beach, support this interpretation (Figure 10, Pearson $R = -0.51$, $p << 0.005$ at two months lag).

The peninsular at Thiessow is well protected against coastal erosion by rigrags, breakwaters and groins. Low long-term erosion rates (2015 to 2023) suggest that this concept works well. Only exception is the unprotected beach in Figure 8D, which erodes since at least 2016. It appears that a reduced sediment supply from the nearby protected cliffs cause this shoreline retreat.

4.2 Considerations of EO-based shoreline monitoring at regional scales

We presented the potential of earth observation for describing, analysing and interpreting morphological changes in the coastal zone by using the semi-automated toolkit SEaCAT. SEaCAT enables to monitor largescale trends as well as identify hotspots of short-term shoreline change. The analyses are based on the water-land boundary lines depicted from individual satellite images and in combination with information on water level at the time of acquisition, morphological processes can be described. Thus, the detection of seasonal and long-term dynamics can supplement existing monitoring data, although the often high cloud coverage in northern Germany limits available observations. Nevertheless, we derived, on average, more than 13 shoreline observations per year in both study areas, which allows to evaluate the impact of, for instance, a storm season or even a single event.

We achieve these frequent observations by tolerating water levels of $MSL \pm 30$ cm at satellite acquisition. This range introduces potential water level-related biases in individual shoreline positions. Therefore individual measurements should be treated with caution. However, aggregating multiple observations in trend analysis helps to average out these biases, enabling increasingly robust change analysis as the number of observations grows

(Xu 2018). While this approach is particularly suited to micro-tidal environments, strict water level filtering in a macro-tidal environment would drastically reduce the number of available observations (Schütt 2022), or require a tidal correction of the shoreline position using beach slope data (Vos et al. 2020).

Although a manual quality screening of all shorelines is still required, the availability of Sentinel-2 data for low or no costs (depending on the data source), high automation level and robustness of SEaCATs shoreline extraction and change analysis make it a fast and cost-effective tool for shoreline monitoring. Even more accurate SDS could potentially be derived from commercial very-high resolution data, although regular acquisitions with VHR satellites would significantly increase costs of our approach (Birmingham and Fernandez-Nunez 2020, Smith et al. 2021).

SDS accuracy from Sentinel-2 is not as high as methods currently employed for shoreline monitoring (LiDAR/ALB scans or manual delineation in high-resolution aerial imagery; Christiansen 2016, Smith et al. 2021). It also lacks information in the vertical dimension, which LiDAR offers. EO-based shoreline monitoring can thus not replace those traditional methods but can help to use them more efficiently by identifying priority areas for monitoring and defining optimal revisit times for flight campaigns. Especially its comparably frequent observations at low costs makes it a reasonable addition to existing monitoring methods.

We have shown that access to the Sentinel-2 archive (since 2015) allows to retrospectively derive baselines and assess longer-term dynamics and trends of coastal development. The high availability of data combined with an accuracy suitable for trend and change analysis provides additional information that closes temporal data gaps of local or large-scale aerial surveys. Particularly in areas with relatively minor morphological changes, such as the Baltic Sea coast, the coastal protection administrations, the waterway and shipping administrations and the Federal Maritime and Hydrographic Agency have correspondingly little coastal data at their disposal. The availability of EO-based information is even more important in remote regions where no monitoring of coastal changes took place in the past.

The observation period of Sentinel-2 can be enlarged with other satellite missions such as the Landsat archive, which goes back to 1982 (Wulder et al. 2019). However, the spatial resolution of 30 m, lower temporal coverage, and higher noise especially in the data from early Landsat sensors provide a lower accuracy of the derived SDS (Apostolopoulos and Nikolakopoulos 2020, Sunny et al. 2022). Nevertheless, larger changes in coastline positions can be derived.

Essentially, SEaCAT provides robust methods to monitor land-water boundaries and quantify their change over time. This offers opportunities for related applications. Notably, SEaCAT is currently also being used to monitor morphodynamics of tidal creek systems in the German Wadden Sea. This demonstrates the method's capability to derive information in remote or inaccessible regions where data is scarce. With small adaptations, the toolkit could also be applied to monitor other linear features, such as dune base lines or even glaciers. Looking ahead, advancements in sensor technology and data analysis will enhance our capabilities for EO-based coastal monitoring. For example, integrating space-born optical and LiDAR sensors like IceSAT-2 now allows to derive near-shore bathymetry and monitor its dynamics without in-situ calibration data (Thomas et al. 2021).

5 Acknowledgements

We gratefully acknowledge Benjamin Franz from the Ministry for Energy Transition, Climate Protection, Environment and Nature (MEKUN), Schleswig-Holstein, and Ulrich Floth from the State Offices for Agriculture and Environment (StALU), Mecklenburg-Vorpommern, for their inspiring discussions and valuable support. We would like to thank the anonymous reviewer for their constructive comments and valuable feedback, which greatly improved this study.

The development of SEaCAT has been largely supported by the ESA funded project Space for Shore.

6 References

- Angnuureng, D. B.; Almar, R.; Senechal, N.; Castelle, B.; Addo, K. A.; Marieu, V.; Ranasinghe, R.: Shoreline resilience to individual storms and storm clusters on a meso-macrotidal barred beach. In: *Geomorphology*, 290, 265–276, 2017.
- Apostolopoulos, D.; Nikolakopoulos, K.: Assessment and Quantification of the Accuracy of Low- and High-Resolution Remote Sensing Data for Shoreline Monitoring. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9, 6, 391, 2020.
- Apostolopoulos, D.; Nikolakopoulos, K.: A review and meta-analysis of remote sensing data, GIS methods, materials and indices used for monitoring the coastline evolution over the last twenty years. In: *European Journal of Remote Sensing*, 54, 1, 240–265, 2021.
- Averes, T.; Hofstede, J. L. A.; Hinrichsen, A.; Reimers, H.-C.; Winter, C.: Cliff Retreat Contribution to the Littoral Sediment Budget along the Baltic Sea Coastline of Schleswig-Holstein, Germany. In: *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 8, 870, 2021.
- Bishop-Taylor, R.; Sagar, S.; Lymburner, L.; Alam, I.; Sixsmith, J.: Sub-Pixel Waterline Extraction: Characterising Accuracy and Sensitivity to Indices and Spectra. In: *Remote Sensing*, 11, 24, 2984, 2019.
- Boak, E. H.; Turner, I. L.: Shoreline Definition and Detection: A Review. In: *Journal of Coastal Research*, 214, 688–703, 2005.
- Brooks, S. M.; Spencer, T.: Temporal and spatial variations in recession rates and sediment release from soft rock cliffs, Suffolk coast, UK. In: *Geomorphology*, 124, 1-2, 26–41, 2010.
- BSH: Abflussjahr 2018, Nr.05. Hydrologischer Monatsbericht März 2018 für die Schleswig-Holsteinische und Mecklenburg-Vorpommersche Ostseeküste, Rostock: Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie, 2018. <https://www2.bsh.de/aktdat/wvd/Beichte/Ostsee/A%202018/Monatsbericht%2005%20M%C3%A4rz%202018.pdf>, accessed 03.12.2024.
- BSH: Abflussjahr 2020, Nr.12. Hydrologischer Monatsbericht Oktober 2020 für die Schleswig-Holsteinische und Mecklenburg-Vorpommersche Ostseeküste, Rostock: Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie, 2020. https://www2.bsh.de/aktdat/wvd/Beichte/Ostsee/A_2020/Monatsbericht_12_Oktober_2020.pdf, accessed 03.12.2024.

- BSH: Abflussjahr 2023, Nr.07. Hydrologischer Monatsbericht Mai 2023 für die Schleswig-Holsteinische und Mecklenburg-Vorpommersche Ostseeküste, Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie, 2023. https://www2.bsh.de/aktdat/wvd/Berichte/Ostsee/A_2023/Monatsbericht_07_Mai_2023.pdf, accessed 03.12.2024.
- Burningham, H.; Fernandez-Nunez, M.: Shoreline change analysis. In: Jackson, D. W.; Short, A. D. (eds.): *Sandy Beach Morphodynamics*, Elsevier, 439–460, <https://doi.org/10.1016/10.1016/B978-0-08-102927-5.00019-9>, 2020.
- Casella, E.; Drechsel, J.; Winter, C.; Benninghoff, M.; Rovere, A.: Accuracy of sand beach topography surveying by drones and photogrammetry. In: *Geo-Marine Letters*, 40, 2, 255–268, 2020.
- Castelle, B.; Masselink, G.: Morphodynamics of wave-dominated beaches. In: Cambridge Prisms: *Coastal Futures*, 1, 2023.
- Christiansen, L.: New techniques in capturing and modelling of morphological data. In: *Hydrographische Nachrichten*, 105, 11, 22–25, 2016.
- Christiansen, L.: Laser Bathymetry for Coastal Protection in Schleswig-Holstein. In: *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 89, 2, 183–189, 2021.
- Cipolletti, M. P.; Delrieux, C. A.; Perillo, G. M.; Cintia Piccolo, M.: Superresolution border segmentation and measurement in remote sensing images. In: *Computers & Geosciences*, 40, 87–96, 2012.
- Dietze, M.; Cook, K. L.; Illien, L.; Rach, O.; Puffpaff, S.; Stodian, I.; Hovius, N.: Impact of Nested Moisture Cycles on Coastal Chalk Cliff Failure Revealed by Multiseasonal Seismic and Topographic Surveys. In: *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125, 8, 2020.
- Dolch, T.: Analysis of Long-Term Changes of a Sandy Shoreline Utilising High-Resolution Aerial Photography. In: Green, D. R. (ed.): *Coastal and Marine Geospatial Technologies*, Springer Netherlands, Dordrecht, 187–196, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9720-1_17, 2010.
- Eiben, H.: Schutz der Ostseeküste von Schleswig-Holstein. In: Kramer, J.; Rohde, H. (eds.): *Historischer Küstenschutz. Deichbau, Inselschutz und Binnenentwässerung an Nord- und Ostsee*, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 517–534, 1992.
- ESA: Sentinel-2 User Handbook, European Space Agency, 2015. https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook, accessed 02.09.2024.
- Feyisa, G. L.; Meilby, H.; Fensholt, R.; Proud, S. R.: Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. In: *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35, 2014.
- Fitzpatrick, S.; Buscombe, D.; Warrick, J. A.; Lundine, M. A.; Vos, K.: CoastSeg: an accessible and extendable hub for satellite-derived-shoreline (SDS) detection and mapping. In: *Journal of Open Source Software*, 9, 99, 6683, 2024.

Gopalakrishnan, S.; Smith, M. D.; Slott, J. M.; Murray, A. B.: The value of disappearing beaches: A hedonic pricing model with endogenous beach width. In: *Journal of Environmental Economics and Management*, 61, 3, 297–310, 2011.

Hagenaars, G.; Vries, S. de; Luijendijk, A. P.; Boer, W. P. de; Reniers, A. J.: On the accuracy of automated shoreline detection derived from satellite imagery: A case study of the sand motor mega-scale nourishment. In: *Coastal Engineering*, 133, 113–125, 2018.

Hallegatte, S.; Green, C.; Nicholls, R. J.; Corfee-Morlot, J.: Future flood losses in major coastal cities. In: *Nature Climate Change*, 3, 9, 802–806, 2013.

Harley, M. D.; Turner, I. L.; Kinsela, M. A.; Middleton, J. H.; Mumford, P. J.; Splinter, K. D.; Phillips, M. S.; Simmons, J. A.; Hanslow, D. J.; Short, A. D.: Extreme coastal erosion enhanced by anomalous extratropical storm wave direction. In: *Scientific Reports*, 7, 1, 6033, 2017.

Heo, J.; Kim, J. H.; Kim, J. W.: A new methodology for measuring coastline recession using buffering and non-linear least squares estimation. In: *International Journal of Geographical Information Science*, 23, 9, 1165–1177, 2009.

Jackson, C. W.; Alexander, C. R.; Bush, D. M.: Application of the AMBUR R package for spatio-temporal analysis of shoreline change: Jekyll Island, Georgia, USA. In: *Computers & Geosciences*, 41, 199–207, 2012.

Jacobson, C.; Carter, R. W.; Thomsen, D. C.; Smith, T. F.: Monitoring and evaluation for adaptive coastal management. In: *Ocean & Coastal Management*, 89, 51–57, 2014.

Khallaghi, S.; Pontius, R. G.: Area method compared with Transect method to measure shoreline movement. In: *Geocarto International*, 37, 20, 5963–5984, 2022.

Kiesel, J.; Wolff, C.; Lorenz, M.: Brief communication: From modelling to reality – flood modelling gaps highlighted by a recent severe storm surge event along the German Baltic Sea coast. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24, 11, 3841–3849, 2024.

Łabuz, T. A.: Environmental Impacts—Coastal Erosion and Coastline Changes. In: The BACC II Author Team (ed.): *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, Springer International Publishing, Cham, 381–396, https://doi.org/10.1016/10.1007/978-3-319-16006-1_20, 2015.

Łabuz, T. A.; Kowalewska-Kalkowska, H.: Coastal erosion caused by the heavy storm surge of November 2004 in the southern Baltic Sea. In: *Climate Research*, 48, 1, 93–101, 2011.

Lindgren, E.; Tuomi, L.; Huess, V.; Kanarik, H.: EU Copernicus Marine Service Product User Manual for Baltic Sea Wave Hindcast Product BALTICSEA_MULTI-YEAR_WAV_003_015. Issue: 2.0, Mercator Ocean International, Toulouse, 2024. <https://documentation.marine.copernicus.eu/PUM/CMEMS-BAL-PUM-003-015.pdf>, accessed 02.12.2024.

LKN.SH (Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein): Fachplan Küstenschutz Ostseeküste: Grundlagen. Einteilung in Küstenabschnitte. Abschnitt Schleimünde, Husum: LKN.SH, 2020. https://schleswig-holstein.de/mm/downloads/LKN/kuestenschutz_fachplaene/1_Ostseekueste/2_Grundlagen/2-2_Abschnitt_82_Schleimuendung.pdf, accessed 29.08.2024.

Luijendijk, A.; Hagenaars, G.; Ranasinghe, R.; Baart, F.; Donchyts, G.; Aarninkhof, S.: The State of the World's Beaches. In: *Scientific Reports*, 8, 1, 6641, 2018.

McFeeters, S. K.: The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. In: *International Journal of Remote Sensing*, 17, 7, 1425–1432, 1996.

Meier, H. E. M.; Kniebusch, M.; Dieterich, C.; Gröger, M.; Zorita, E.; Elmgren, R.; Myrberg, K.; Ahola, M. P.; Bartosova, A.; Bonsdorff, E.; Börgel, F.; Capell, R.; Carlén, I.; Carlund, T.; Carstensen, J.; Christensen, O. B.; Dierschke, V.; Frauen, C.; Frederiksen, M.; Gaget, E.; Galatius, A.; Haapala, J. J.; Halkka, A.; Hugelius, G.; Hünicke, B.; Jaagus, J.; Jüssi, M.; Käyhkö, J.; Kirchner, N.; Kjellström, E.; Kulinski, K.; Lehmann, A.; Lindström, G.; May, W.; Miller, P. A.; Mohrholz, V.; Müller-Karulis, B.; Pavón-Jordán, D.; Quante, M.; Reckermann, M.; Rutgersson, A.; Savchuk, O. P.; Stendel, M.; Tuomi, L.; Viitasalo, M.; Weisse, R.; Zhang, W.: Climate change in the Baltic Sea region: a summary. In: *Earth System Dynamics*, 13, 1, 457–593, 2022.

MELUND (Ministerium für Energiewende; Landwirtschaft; Umwelt; Natur und Digitalisierung): Generalplan Küstenschutz Schleswig-Holstein. Fortschreibung 2022, Kiel: MELUND, 2022. https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/K/kuestenschutz/Downloads/Generalplan.pdf?__blob=publicationFile&v=3, accessed 02.09.2024.

Mentaschi, L.; Vousdoukas, M. I.; Pekel, J.-F.; Voukouvalas, E.; Feyen, L.: Global long-term observations of coastal erosion and accretion. In: *Scientific Reports*, 8, 1, 12876, 2018.

Nicholls, R. J.; Cazenave, A.: Sea-level rise and its impact on coastal zones. In: *Science* (New York, N.Y.), 328, 5985, 1517–1520, 2010.

Otsu, N.: A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9, 1, 62–66, 1979.

Pang, T.; Wang, X.; Nawaz, R. A.; Keefe, G.; Adekanmbi, T.: Coastal erosion and climate change: A review on coastal-change process and modeling. In: *Ambio*, 52, 12, 2034–2052, 2023.

Passeri, D. L.; Hagen, S. C.; Medeiros, S. C.; Bilskie, M. V.; Alizad, K.; Wang, D.: The dynamic effects of sea level rise on low-gradient coastal landscapes: A review. In: *Earth's Future*, 3, 6, 159–181, 2015.

Pikelj, K.; Ružić, I.; Ilić, S.; James, M. R.; Kordić, B.: Implementing an efficient beach erosion monitoring system for coastal management in Croatia. In: *Ocean & Coastal Management*, 156, 223–238, 2018.

Planet Labs: Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth, 2024. <https://api.planet.com>, accessed 29.08.2024.

Rad, A. M.; Kreitler, J.; Sadegh, M.: Augmented Normalized Difference Water Index for improved surface water monitoring. In: *Environmental Modelling & Software*, 140, 105030, 2021.

Scheffler, D.; Hollstein, A.; Diedrich, H.; Segl, K.; Hostert, P.: AROSICS: An Automated and Robust Open-Source Image Co-Registration Software for Multi-Sensor Satellite Data. In: *Remote Sensing*, 9, 7, 676, 2017.

Schütt, E. M.: Monitoring Coastal Change from Space. Assessing the applicability to monitor shoreline evolution with multitemporal Sentinel-2 MSI data in Schleswig-Holstein. Master thesis, Kiel University, Kiel, 2022.

Schwarzer, K.; Diesing, M.; Larson, M.; Niedermeyer, R.-O.; Schumacher, W.; Furmanczyk, K.: Coastline evolution at different time scales – examples from the Pomeranian Bight, southern Baltic Sea. In: *Marine Geology*, 194, 1-2, 79–101, 2003.

Senechal, N.; Ruiz de Alegria-Arzaburu, A.: Seasonal imprint on beach morphodynamics. In: Jackson, D. W.; Short, A. D. (eds.): *Sandy Beach Morphodynamics*, Elsevier, 461–486, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00020-5>, 2020.

Siewert, M.; Schlamkow, C.; Saathoff, F.: Spatial analyses of 52 years of modelled sea state data for the Western Baltic Sea and their potential applicability for offshore and nearshore construction purposes. In: *Ocean Engineering*, 96, 284–294, 2015.

Smith, K. E. L.; Terrano, J. F.; Pitchford, J. L.; Archer, M. J.: Coastal Wetland Shoreline Change Monitoring: A Comparison of Shorelines from High-Resolution WorldView Satellite Imagery, Aerial Imagery, and Field Surveys. In: *Remote Sensing*, 13, 15, 3030, 2021.

StALU (Staatliches Amt für Umwelt und Natur): Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern: Übersichtsheft. Grundlagen, Grundsätze, Standortbestimmung und Ausblick, Rostock: StALU, 2021. <https://www.stalu-mv.de/serviceassistant/download?id=1639581>, accessed 29.08.2024.

Sunny, D. S.; Islam, K. A.; Mullick, M. R. A.; Ellis, J. T.: Performance study of imageries from MODIS, Landsat 8 and Sentinel-2 on measuring shoreline change at a regional scale. In: *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28, 100816, 2022.

Thomas, N.; Pertiwi, A. P.; Traganos, D.; Lagomasino, D.; Poursanidis, D.; Moreno, S.; Fatoyinbo, L.: Space-Borne Cloud-Native Satellite-Derived Bathymetry (SDB) Models Using ICESat-2 And Sentinel-2. In: *Geophysical Research Letters*, 48, 6, 2021.

Tiede, J.; Jordan, C.; Moghimi, A.; Schlurmann, T.: Long-term shoreline changes at large spatial scales at the Baltic Sea: remote-sensing based assessment and potential drivers. In: *Frontiers in Marine Science*, 10, 2023.

Toure, S.; Diop, O.; Kpalma, K.; Maiga, A. S.: Shoreline Detection using Optical Remote Sensing: A Review. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8, 2, 75, 2019.

Vitousek, S.; Buscombe, D.; Vos, K.; Barnard, P. L.; Ritchie, A. C.; Warrick, J. A.: The future of coastal monitoring through satellite remote sensing. In: *Cambridge Prisms: Coastal Futures*, 1, 2023.

Vos, K.; Harley, M. D.; Splinter, K. D.; Simmons, J. A.; Turner, I. L.: Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. In: *Coastal Engineering*, 150, 160–174, 2019.

Vos, K.; Harley, M. D.; Splinter, K. D.; Walker, A.; Turner, I. L.: Beach Slopes From Satellite-Derived Shorelines. In: *Geophysical Research Letters*, 47, 14, 2020.

Vousdoukas, M. I.; Ranasinghe, R.; Mentaschi, L.; Plomaritis, T. A.; Athanasiou, P.; Luijendijk, A.; Feyen, L.: Sandy coastlines under threat of erosion. In: *Nature Climate Change*, 10, 3, 260–263, 2020.

- Wang, Z.; Liu, J.; Li, J.; Zhang, D. D.: Multi-Spectral Water Index (MuWI): A Native 10-m Multi-Spectral Water Index for Accurate Water Mapping on Sentinel-2. In: *Remote Sensing*, 10, 10, 1643, 2018.
- Weisse, R.; Dailidienė, I.; Hünicke, B.; Kahma, K.; Madsen, K.; Omstedt, A.; Parnell, K.; Schöne, T.; Soomere, T.; Zhang, W.; Zorita, E.: Sea level dynamics and coastal erosion in the Baltic Sea region. In: *Earth System Dynamics*, 12, 3, 871–898, 2021.
- Williams, A. T.; Rangel-Buitrago, N.; Pranzini, E.; Anfuso, G.: The management of coastal erosion. In: *Ocean & Coastal Management*, 156, 4–20, 2018.
- Wright, L.; Short, A.: Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. In: *Marine Geology*, 56, 1-4, 93–118, 1984.
- Wulder, M. A.; Loveland, T. R.; Roy, D. P.; Crawford, C. J.; Masek, J. G.; Woodcock, C. E.; Allen, R. G.; Anderson, M. C.; Belward, A. S.; Cohen, W. B.; Dwyer, J.; Erb, A.; Gao, F.; Griffiths, P.; Helder, D.; Hermosilla, T.; Hipple, J. D.; Hostert, P.; Hughes, M. J.; Huntington, J.; Johnson, D. M.; Kennedy, R.; Kilic, A.; Li, Z.; Lymburner, L.; McCorkel, J.; Pahlevan, N.; Scambos, T. A.; Schaaf, C.; Schott, J. R.; Sheng, Y.; Storey, J.; Vermote, E.; Vogelmann, J.; White, J. C.; Wynne, R. H.; Zhu, Z.: Current status of Landsat program, science, and applications. In: *Remote Sensing of Environment*, 225, 127–147, 2019.
- xcube developers: xcube - An xarray-based EO data cube toolkit: n.d. <https://xcube.readthedocs.io/en/latest/index.html>, accessed 28.09.2024.
- Xu, H.: Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. In: *International Journal of Remote Sensing*, 27, 14, 3025–3033, 2006.
- Xu, N.: Detecting Coastline Change with All Available Landsat Data over 1986–2015: A Case Study for the State of Texas, USA. In: *Atmosphere*, 9, 3, 107, 2018.
- Ziegler, B.; Heyen, A.: Rückgang der Steilufer an der schleswig-holsteinischen westlichen Ostseeküste. In: *MEYNIANA*, 57, 2005.

Die Ostseesturmflut vom 20./21. Oktober – Ursachen des vergleichsweise hohen Schadensaufkommens sowie Betrachtung im Hinblick auf mögliche Minimierungsstrategien

Guntram Seiß

Bundesanstalt für Wasserbau, guntram.seiss@baw.de

Zusammenfassung

Die Ostseesturmflut vom Oktober 2023 war geprägt durch ein hohes Schadensaufkommen. Ein erheblicher Teil der Schäden betraf Einrichtungen mit einer hohen Sachwertdichte, die saisonbedingt dem Ereignis ausgesetzt waren, insbesondere Campingplätze, Marinas und bewirtschaftete Strände. Für den ausreichenden Schutz solcher Einrichtungen ist im Regelfall der Betreiber oder die Kommune zuständig, soweit er diesen nach geltenden Vorschriften gewährleisten muss. Die Wirkungen der Sturmflut werden dargestellt und mögliche Minimierungsstrategien aufgezeigt. Marinas mit ihrer hohen Sachwertdichte bieten über eine Umrüstung ihrer bestehenden, höhenfesten Festmacheeinrichtungen zu dem Wasserstand folgenden Festmachemöglichkeiten ein hohes Potential zur zukünftigen Minimierung der Sachschäden. Konkrete, individuelle Evakuierungspläne können helfen, Schäden auf Campingplätzen zu vermeiden und den Verlust touristischer Infrastruktur auf bewirtschafteten Stränden zu minimieren.

Schlagwörter

Ostseesturmflut; Schadensanalyse; Risikominimierung; individueller Hochwasserschutz

Summary

The Baltic Sea storm surge of October 2023 was characterized by an unusually high level of damage. A significant part of the damage affected facilities with a high density of material assets that were exposed to the event for seasonal reasons, in particular campsites, marinas and managed beaches. The operator or municipality is usually responsible for adequate protection of such facilities, insofar as they are required to do so in accordance with applicable regulations. The effects of the storm surge were presented and possible minimization strategies were shown. Marinas in particular, with their high density of material assets, offer great potential for minimizing future property damage by converting their existing, height-fixed mooring facilities to mooring options that follow the water level. Concrete, individual evacuation plans can help to avoid damage to campsites and minimize the loss of tourist infrastructure on managed beaches.

Keywords

Baltic Sea storm surge; damage analysis; risk minimization; individual flood protection

1 Einleitung

Die Ostseesturmflut vom Oktober 2023 war gekennzeichnet durch ein hohes Schadensaufkommen mit vielfältigen Schadensbildern. Laut Oelerich (2024) betrug der bis heute bezifferte, direkte Schaden ca. 200 Mio. Euro, davon ca. 45 Mio. Euro an Küstenschutzeinrichtungen. Darüber hinaus sind unmittelbar und mittelbar weitere Schäden aufgetreten, durch die auch Institutionen im Umweltmanagement und in der Wasserstraßenverwaltung befasst sind. Begleitende Auswirkungen sind beispielsweise der Austritt umweltgefährdender Betriebsstoffe aus Fahrzeugen und die Behinderung der Schifffahrt durch Treibgut und gesunkene Fahrzeuge.

Aufgrund der vergleichsweise hohen Scheitelwasserstände von teilweise über +2 m NHN kann bei oberflächlicher Betrachtung der Schluss gezogen werden, das hohe Schadensaufkommen allein auf die Hochwasserlage und die begleitende Sturmsituation zurückzuführen. Diese Faktoren sind jedoch nur ein Teilaспект der Betrachtung. Im Folgenden soll die hydrologische Situation mit ihren wesentlichen schadenswirksamen Komponenten analysiert werden und in einen kausalen Bezug zu den aufgetretenen Schäden gesetzt werden.

Die Betroffenheiten im Revier der Kieler Bucht werden dann im Kontext des Risikos zugeordnet. In der vorliegenden Betrachtung wird die Sturmflut mit anderen aus der Historie bekannten Ereignissen qualitativ und quantitativ verglichen.

Das Schadensaufkommen von Extremereignissen ist abhängig von der Eintrittshäufigkeit des Ereignisses, der Schwere des Ereignisses und dem Schadenspotential, welches vom Sachwert selbst und dem vorhandenen Schutzniveau abhängt.

Die Schäden werden anhand der Betroffenheiten kategorisiert, mögliche Ursachen ermittelt und Strategien zur zukünftigen Vermeidung oder Minimierung aufgezeigt. Hierbei wird auf Erkenntnisse aus dem EU-Projekt RISC-KIT zurückgegriffen.

2 Rekapitulation des Sturmflutereignisses

Das Ereignis vom Oktober 2023 wird als eine der schwersten Sturmfluten seit Beginn regelmäßiger Pegelaufzeichnungen betrachtet. Die Darstellung des Ereignisses und seine Wirkungen auf die primär betroffenen Sachwerte wird nachfolgend beschrieben, soweit dies zur Nachvollziehbarkeit der Ausführungen erforderlich erscheint.

2.1 Beschreibung der hydrologischen Situation

Die klassische Kategorisierung von Ostseesturmfluten wird anhand des höchsten, während des Ereignisses aufgetretenen Wasserstandes vorgenommen. Nach der offiziellen Kategorisierung des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrografie (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie 2023) erreicht das Ereignis lokal (an den Pegeln Flensburg, Schleswig und Eckernförde) die höchste Kategorie „sehr schwere Sturmflut“. An diesen Pegeln wurden Wasserstände zwischen 2,1 m und 2,3 m über Normalhöhennull (NHN) erreicht (Oelerich 2024). Vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie wurde das Ereignis regional übergreifend jedoch in die Kategorie „schwere Sturmflut“ eingeordnet (Perlet-Markus 2023).

Neben dem Scheitelwasserstand ist die Dauer der Sturmflut ein für die Bewertung des Schadenspotentials wichtiger Parameter. Diese berechnet sich nach der Dauer der Überschreitung eines Wasserstandes von einem Meter über NHN. Für den Pegel Flensburg kann beispielsweise aus der Zeitreihe des Bundespegels eine Sturmflutdauer von 52 Stunden und 11 Minuten abgeleitet werden. Da der Verlauf der Wasserstände in der gesamten Region der Kieler Bucht vergleichbar ist, kann für die gesamte Region von einer Sturmflutdauer von um oder über 50 Stunden ausgegangen werden (Perlet-Markus 2023), was Oelrich (2024) bestätigt.

Auch die Steiggeschwindigkeit und die Fallgeschwindigkeit während des Ereignisses und danach kann hinsichtlich der Resilienz ein relevanter Aspekt für die Praxis sein. In Tabelle 1 sind die aus den Pegeldaten abgeleiteten, mittleren und maximalen Steig- und Fallgeschwindigkeiten für fünf Pegel der westlichen Ostsee aufgeführt. Demnach waren die höchsten Steig- und Fallgeschwindigkeiten an den Pegeln Eckernförde und Flensburg zu beobachten. Die höheren Werte an diesen Pegeln lassen sich durch das zusätzliche Auftreten lokaler Eigenschwingungen von Teilsystemen (z. B. der Flensburger Förde), die eine höhere Frequenz als das Tidesignal und die windbedingten Ostseeseiches besitzen, plausibel erklären. Der Pegel Schleswig ist während des Ereignisses ausgefallen, so dass die Werte, insbesondere der Fallgeschwindigkeit, nicht plausibel ermittelt werden konnten.

Tabelle 1: Steig- und Fallgeschwindigkeiten an 5 Pegeln in der Kieler Bucht und angrenzenden Gewässern während der Sturmflutdauer (Wasserstand über +1 m NHN).

Pegel	mit. Steiggeschwindigkeit (m/h)	max. Steiggeschwindigkeit (m/h)	mit. Fallgeschwindigkeit (m/h)	max. Fallgeschwindigkeit (m/h)
Flensburg	0.09	0.67	0.10	0.52
Schleswig	0.06	0.20	0.02	0.08
Eckernförde	0.15	1.04	0.14	1.09
Kiel-Holtenau	0.06	0.36	0.06	0.29
Heiligenhafen	0.06	0.34	0.06	0.32

Ebenfalls von erheblicher Relevanz für die Bewertung des Ereignisses sind Windstärken, Windrichtung und die daraus resultierende Höhe des Seegangs und der Wellenrichtung. Während des Ereignisses herrschte nach der Wetterstation Schönhagen eine Windrichtung zwischen Ostsüdost und Ostnordost. Dabei wurden an dieser Wetterstation Windgeschwindigkeiten von bis zu 22,7 m/s (gemittelt), entsprechend 9 Bft gemessen. An der im Rahmen des Ausbaus des Nord-Ostsee-Kanals eingerichteten Messstelle M2 in der Kieler Bucht nördlich des Stollergrundes wurde eine signifikante Wellenhöhe von 2 m bis 3 m während des Ereignisses gemessen (WNA Nord-Ostsee-Kanal 2024).

Die Sturmflut zeigt eine sehr lange Periode des Anstiegs von mehreren Tagen bis zum Erreichen des Scheitelwasserstandes. Bereits am 19.10.2023 wurde ein Wasserstand von 1 m über NHN überschritten. Zum Vergleich der zeitlichen Verläufe werden in Abbildung 1 zwei weitere historische Sturmhochwasser gemeinsam mit dem aktuellen Ereignis exemplarisch für den Pegel Kiel-Holtenau dargestellt:

- Das Sommerhochwasser vom 28./29.08.1989 (Neemann 1994), welches hinsichtlich des resultierenden Schadensaufkommens sehr gut dokumentiert wurde (WSA Lübeck 1990).

- Das Hochwasser vom 04.11.1995 (Krasemann 2009), welches in Holtenau eine vergleichbare Scheitelhöhe erreichte wie das aktuelle Ereignis.

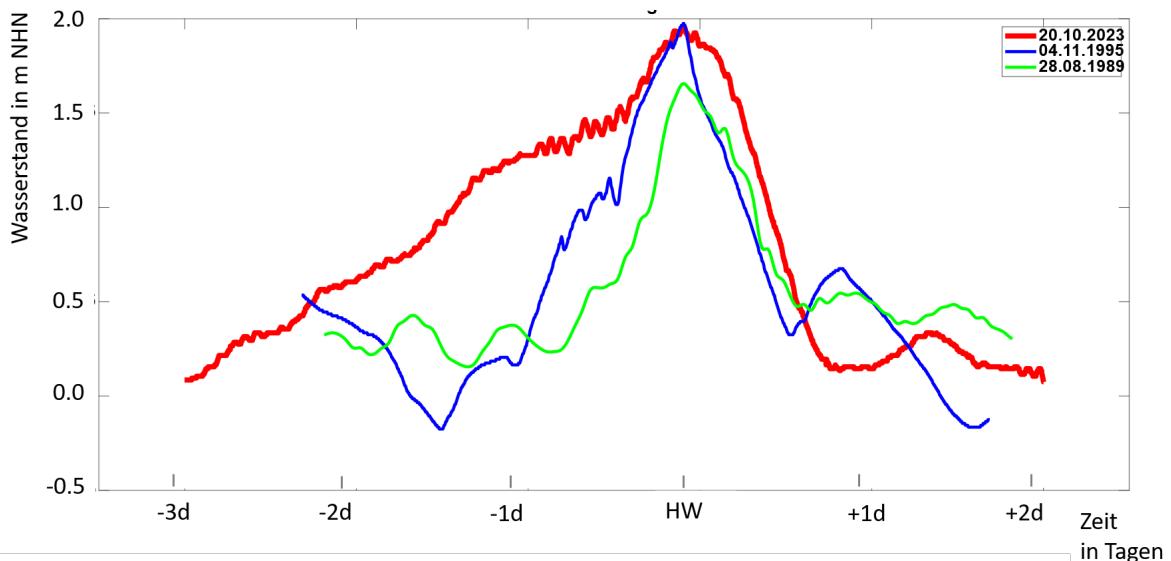


Abbildung 1: Der Verlauf der Sturmflut vom 20./21.10.2023 im Vergleich zu den Sturmflutverläufen vom 04.11.1995 und vom 28.08.1989 am Pegel Kiel Holtenau. Die HW-Scheitel der drei Ereignisse wurden zeitlich übereinander projiziert.

Um einen Eindruck von den unterschiedlichen Charakteristiken der Verläufe zu bekommen, wurden die Kurven auf den Zeitraum des Oktoberhochwassers übertragen und zwar so, dass die Hochwasserscheitel der Ereignisse zeitlich zusammenfallen. Den beiden historischen Ereignissen ist gemeinsam, dass der Anstieg deutlich steiler verläuft und somit die Sturmflutdauer kürzer ist. Während das Ereignis 1989 in der touristischen Hauptsaison lag, fällt das Hochwasser 1995 auf den Beginn der Wintersaison.

Allen drei Ereignissen ist gemeinsam, dass vergleichbare Schadensbilder auftraten, wenn auch in unterschiedlicher Intensität.

2.2 Beschreibung der aufgetretenen Schadensbilder

Zunächst muss bei den aufgetretenen Schadensbildern eine Differenzierung in Bezug auf die örtlichen Gegebenheiten vorgenommen werden. Demnach sind zu unterscheiden:

- Schäden in Gebieten, die innerhalb der von Hochwasserschutzeinrichtungen geschützten Flächen aufgrund von Versagen des Bauwerks aufgetreten sind, sowie Schäden an Küstenschutzbauwerken.
- Schäden, die im Gebiet außerhalb der Hochwasserschutzeinrichtungen aufgetreten sind. Gemeint ist hier das Gebiet, welches die Bemessungshöhen des Landeshochwasserschutzes nicht erfüllt und der geschlossenen Deich-/Dünenschutzeinrichtung mit Bemessungshöhe vorgelagert ist.

In der weiteren Betrachtung sollen erstere nicht weiter diskutiert werden, da hier die Ursache der Schäden trivialerweise auf eine konstruktionsbedingt verminderte Resilienz eines Küstenschutzbauwerkes zurückzuführen ist. Auch sollen natürliche Veränderungen der

Küstenlinie wie Sandverlagerung an Stränden oder Erosion von Steilküsten nicht als Schäden im engeren Sinn betrachtet werden, sondern nur Folgen dieser Veränderungen auf menschengemachte Sachwerte.

In die zweite Kategorie fallen daher unter anderem die folgenden Schäden:

- Folgeschäden an erodierten Ufern, z. B. Uferpromenaden, Uferwegen
- Sandverluste an künstlich angelegten oder verbreiterten Strandabschnitten
- Schäden an touristischer Infrastruktur (Servicegebäude, DLRG-Stationen, Seebrücken, weitere Strandinfrastruktur)
- Schäden an mariner Infrastruktur (Marinas, sonstige Hafenanlagen, Anlegebrücken)
- Schäden an Wassersportfahrzeugen in mariner Infrastruktur
- Schäden auf den vor den Hochwasserschutzeinrichtungen in Überflutungsgebieten gelegenen Campingplätzen

Die Schadensbilder der zweiten Kategorie sind, abgesehen von den Folgeschäden von Ufererosionen, in der Historie der jüngeren Sturmfluten nur bei einem Ereignis in vergleichbarem Ausmaß aufgetreten: dem Sommerorkan vom 28./29. August 1989 (WSA Lübeck 1990). So wurden allein in der Marina Wendtorf damals 99 gesunkene Fahrzeuge gemeldet, was in etwa der Größenordnung der im Oktober 2023 gesunkenen Fahrzeuge der Häfen Damp und Schilksee zusammen entspricht (WSA Lübeck 1990). Die Schäden an den Steganlagen selbst waren in Wendtorf 1989 und Schilksee 2023 qualitativ vergleichbar.

Auch das Schadensmuster auf den tiefgelegenen Campingplätzen bei Waabs und Damp trat im August 1989 auf einigen Plätzen qualitativ in ähnlicher Form auf wie im Oktober 2023.

Verluste von Strandinfrastruktur wie Strandkörben sind ebenfalls vergleichbar, allerdings war die Größenordnung für das Ereignis 1989 deutlich besser dokumentiert.

2.2.1 Folgeschäden an erodierten Ufern

Der Erosionsprozess an Steilufern ist ein natürlicher Vorgang. Da jedoch aufgrund touristischer Nutzung vielfach Uferwege entlang der Steilküsten angelegt wurden, sind hier lokale Folgeschäden entstanden, die mittelfristig jedoch auch bei einem späteren Ereignis eintreten mussten.

Auch an Uferpromenaden innerhalb von Ortschaften waren Schäden zu verzeichnen. Oft handelt es sich dabei um aufwändig gestaltete, gepflasterte Wege. Im Allgemeinen ist nicht davon auszugehen, dass die Einwirkung erosiver Kräfte durch Seegang bei der Anlage dieser Wege ausreichend berücksichtigt wurde. Daher können sich beispielsweise Pflastersteine aus dem Verbund lösen und weiterer Erosion den Weg bereiten.

Der materielle Schaden ist im Regelfall überschaubar, sieht man von den entstehenden Arbeitskosten für die Wiederherstellung ab. Ein Teil des abgetragenen Pflastermaterials kann zur Wiederherstellung der Funktionalität zunächst direkt wiederverwendet werden. Anders verhält es sich bei geteerten Wegen, da hier der abgetragene Belag recycelt werden muss.

2.2.2 Schäden an touristischer Infrastruktur

Hier handelt es sich im Regelfall um Schäden an Infrastruktur, die in exponierten Küstenbereichen errichtet wurden und daher zwangsläufig einer schweren Sturmflut ausgesetzt sind. Schäden entstehen hier überwiegend dann, wenn das Objekt nicht für die aufgetretene Einwirkung des Seegangs (Einwirkdauer und -intensität) ausgelegt wurde. Generell ist bei solchen Objekten ein Schaden nicht zu vermeiden, soweit sie immobil ausgelegt sind, d. h. ein rechtzeitiges Entfernen des Objektes nicht möglich ist.

Ein größerer Schaden in Höhe von ca. 1,8 Mio. Euro war beispielsweise an den neu gestalteten Molen des Ferienzentrums Olpenitz zu verzeichnen (Karbe 2024).

Bei mobiler Infrastruktur (z. B. einem mobilen Verkaufsstand oder Strandkorb) war es durchaus möglich, den Schaden zu vermeiden, wenn eine rechtzeitige Evakuierung erfolgt ist. Dennoch wurden auch bei mobiler Infrastruktur Schäden verzeichnet.

2.2.3 Schäden an mariner Infrastruktur

Für Hafenanlagen gelten ähnliche Bedingungen wie für touristische Infrastruktur. Im Regelfall sind diese jedoch so ausgelegt, dass sie eine klassische Wintersturmflut überstehen können, sofern sie winterfest gemacht werden. Da Wintersturmfluten mit Höhen zwischen 1,5 und 1,8 m in den letzten 10 Jahren zweimal aufgetreten sind, ohne dass erhebliche Schäden an Hafenanlagen und Marinas zu verzeichnen waren, kann generell davon ausgegangen werden, dass die Anlagen selbst ausreichend stabil ausgelegt sind, um auch höheren Wasserständen und Wellenunruhe standzuhalten, solange die Liegeplätze nicht belegt sind, oder dass die potentiell auftretenden, geringen Schäden wirtschaftlich in Kauf genommen werden können.

Tatsächlich können die massiven Schäden an Steganlagen, die in einigen Marinas auftraten (beispielhaft sind hier die Häfen Damp und Schilksee genannt) im Zusammenhang mit der Tatsache gesehen werden, dass die Häfen noch relativ stark genutzt waren, da die Sommersaison hier erst Ende Oktober endet. So teilte der Hafen Sonderburg beispielsweise eine Belegung von ca. 25 % mit (Brock 2024). Schäden an Steganlagen waren u. a. Folge davon, dass Wasserfahrzeuge sich losrissen und auf die Anlagen konstruktiv nicht eingeplante Belastungen ausübten (Kollision, Strandung). Die Schadenssumme belief sich in dem letztgenannten Hafen auf geschätzt 3 Mio. Kronen oder 0,4 Mio. Euro, im Yachthafen Damp sogar auf 4,4 Mio. Euro (Brock 2024). Ein Großteil dieser Schäden wäre vermutlich vermeidbar, sofern das Losreißen von Fahrzeugen und die damit auftretenden Folgen effektiv unterbunden werden könnten. So hatten Marinas mit Schwimmstegen generell eine deutlich günstigere Schadensbilanz (Bolle und Müller 2023). Eine Schilderung der sehr geringen Schäden der Marina Wendtorf durch den Betriebsleiter bestätigt diese Auffassung (Krüger 2024). Dort kann nur das Losreißen einer Belegklampe mit der Hochwasserlage oder der Wellenunruhe erklärt werden. Auch in der Marina Olpenitz, die trotz der Exposition nach Osten durch die hohen Schutzmolen des ehemaligen Marinehafens gegen Wellenunruhe ausreichend geschützt erscheint und ebenfalls Schwimmstege besitzt, wurden keine Schäden verzeichnet (Öchsle 2024, Karbe 2024).

2.2.4 Schäden an Wasserfahrzeugen

In der Größenordnung übersteigen die Schäden in den betroffenen Ostsee-Marinas untergebrachten Wasserfahrzeugen alle übrigen, außerhalb der Küstenschutzlinie aufgetretenen Schadensaufkommen der Sturmflut. Allein in den beiden Häfen Schilksee und Damp wurden bereits kurz nach dem Ereignis ca. 60 Boote als Totalschäden registriert (NDR 2023). Der Yachthafen Sonderburg meldete 10 gesunkene und etwa 30 schwer beschädigte Boote (Brock 2024). Es ist daher davon auszugehen, dass die Gesamtzahl der Total- und Teilschäden in den Häfen der Kieler Bucht sich auf deutlich über 100 Fahrzeuge beläuft. Allein der Versicherer Pantaenius kalkuliert um die 100 Totalschäden durch die Sturmflut ein (NDR 2023). Verglichen mit August 1989 liegt diese Zahl niedriger, was auf die geringere Belegung der Häfen und seitdem erfolgten Maßnahmen in einzelnen Häfen zurückgeführt wird.

Die Entstehung der Schäden beruht darauf, dass sich die Fahrzeuge durch Überlastung von Leinen oder Festmachebeschlägen auf Drift gingen und dann durch Kollision mit Stegen oder anderen Fahrzeugen schwer beschädigt wurden.

Die Überlastung der Festmacheeinrichtungen hat im Wesentlichen drei Ursachen:

1. Werden die Leinen bei steigendem Wasserstand nicht regelmäßig angepasst, kann die auf das Fahrzeug wirkende Auftriebskraft die Bruchlast der Leinen oder der Festmachebeschläge überschreiten. Ist das Fahrzeug nicht mehr ausreichend vertaut, kann es mit seinen Nachbarn kollidieren und die Schäden führen im Extremfall zu Leckagen.
2. Auch bei häufigen, ruckartigen Belastungen durch ungewöhnlich starke Wellenunruhe können Leinen oder Festmacheeinrichtungen brechen.
3. Bei schon relativ gering erhöhtem Wasserstand wird der Zugwinkel der stegseitigen Leinen so ungünstig, dass die Stegbeschläge falsch belastet werden und brechen oder die Leinen slippen. Wo sogenannte „Leinenfänger“ an den Pfählen fehlen, können die Leinen zudem bei zu geringer Pfahlhöhe slippen.

Neben den unmittelbaren Schäden an Fahrzeugen ergeben sich mögliche Folgeschäden:

- Aus gesunkenen Fahrzeugen können Betriebsstoffe in das Wasser austreten.
- Das Bergen eines gesunkenen Fahrzeugs kann mit erheblichen Kosten verbunden sein.
- Manche Schäden werden über Versicherungen abgewickelt, was weitere Kosten in Form von Gutachten und Schadensabwicklung verursacht.

Auch die aufgetretenen Schäden an Wasserfahrzeugen sind saisonbedingt. Während der Wintersaison ist die Anzahl der im Wasser liegenden Fahrzeuge überschaubar gering.

Eine Sicherung der Boote während des Sturmhochwassers war kaum möglich ohne hohe Risiken einzugehen, da die Stege unter Wasser lagen und somit nicht mehr sicher begehbar waren.

Aufgrund der hohen Dichte von hochwertigen, mobilen Objekten stellten offensichtlich Marinas, die während des Ereignisses noch belegt waren, ein hohes Schadenspotential dar.

2.2.5 Schäden auf Campingplätzen

Einige küstennahe, exponierte Campingplätze waren durch Überflutung betroffen, unter anderem Waabs, Damp und Langballigau. Dabei entstanden an Vorzelten sowie Wohnwagen und deren Einrichtungen meist Totalschäden. Es fielen große Abfallmengen an, die von der kommunalen Müllentsorgung zusätzlich zum Regelbetrieb entsorgt werden mussten. Diese Folgekosten wurden vom Individuum auf die kommunale Gemeinschaft übertragen. Zusätzlich entstanden möglicherweise Versicherungsansprüche, die weitere Kosten für die Versichertengemeinschaft verursachen.

Bei den Betroffenheiten handelte es sich zu einem erheblichen Teil um mobile Sachwerte, die bei einer ausreichenden Vorlaufzeit aus der Gefahrenzone entfernt werden können.

3 Rahmenbedingungen für die Entwicklung von Minimierungsstrategien

Die Entwicklung von Strategien im Umgang mit Sturmfluten wird von der potentiellen Lebensdauer der Objekte, deren Wiederbeschaffungswert und der Wahrscheinlichkeit bestimmt, mit der die Objekte einer Sturmflut ausgesetzt werden. Bei den Betroffenheiten der Sturmflut 2023 handelt es sich überwiegend um Objekte, deren Nutzung mittel- bis langfristig angelegt ist. Die geplante Nutzungsdauer reicht hier von mindestens einem Jahrzehnt bei Wohnwagen bis hin zu mehreren Jahrzehnten bei Booten, touristischer Infrastruktur und Marinas. Dies lässt sich daraus ableiten, dass Landfahrzeuge, die der Entsorgung zugeführt werden (mit Ausnahme von Unfallfahrzeugen) üblicherweise älter als zehn Jahre sind. Für Wohnmobile werden sogar bis zu 30 Jahre Lebensdauer angegeben (Garic 2015). Die überwiegende Zahl der Wasserfahrzeuge erreicht dagegen aufgrund der Verwendung von verrottungsfesten, salzwasserbeständigen Materialien für Rumpf und wesentliche Bauteile leicht ein Alter von 30 bis 50 Jahren. Bei Häusern deutet schon die gesetzlich festgelegte steuerliche Abschreibungsrate von 50 Jahren auf eine Haltbarkeit in dieser Größenordnung oder mehr hin.

Bei der Entwicklung einer Strategie zur Minimierung wirtschaftlicher Schäden spielen daher die Betrachtung von Eintrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses und die Mobilität der Objekte oft eine wesentliche Rolle.

3.1 Bedeutung der Eintrittswahrscheinlichkeit für Minimierungsstrategien

Für die Entwicklung von zukünftigen Minimierungsstrategien ist es erforderlich, das mögliche Schadensrisiko vergleichbarer Sturmfluten abzuschätzen und in Relation zum Aufwand zu setzen, der zu erbringen wäre, um den Schaden zu vermeiden.

Oft wird Extremereignissen eine Eintrittshäufigkeit in der Form „einmal in X Jahren“ zugeordnet. Ein mit der Oktobersturmflut vergleichbares Ereignis stellt die Silvestersturmflut von 1904 dar. Es ist daher naheliegend, die Eintrittshäufigkeit auf „geringer als einmal in 100 Jahren“ festzusetzen.

Daraus lässt sich die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine bestimmte Betroffenheit ableiten, indem die Existenz der Betroffenheit mitberücksichtigt wird. Dies lässt sich am besten durch folgende Beispiele erläutern:

1. Angenommen, die Lebensdauer einer Steganlage ist 20 Jahre. Die Eintrittshäufigkeit der Sturmflut wird vereinfacht mit 1:100 angenommen. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Sturmflut also in den nächsten 100 Jahren wieder auftritt, ist 100 %! Die Wahrscheinlichkeit, dass die Steganlage (die 20 Jahre halten soll) betroffen ist, ist demnach 20 %, unter der Annahme, dass der Eintritt des Ereignisses gleichverteilt ist.
2. Eine Hafenmole wurde auf eine Lebensdauer von 100 Jahren ausgelegt. In diesem Fall ist die Rechnung einfach: die Wahrscheinlichkeit, dass die Anlage von einem „100-jährigen“ Ereignis betroffen sein wird, ist 100 %, nur der Zeitpunkt steht nicht fest.
3. Die Rechnung unter 1. sieht jedoch für einen Hafenbetreiber anders aus, wenn auf die für 20 Jahre ausgelegte Anlage regelmäßig ein Ersatz erfolgen soll oder die Anlage über die Lebensdauer der Erstinvestition auf einem nutzbaren Erhaltungszustand gehalten wird. Dann ist die Wahrscheinlichkeit nicht auf die Lebensdauer der Anlage, sondern auf die geplante Betriebsdauer des Hafens zu beziehen. Die Periode, die für den Hafenbetreiber relevant sein könnte, wäre dann z. B. 40 oder gar 60 Jahre, wodurch die Eintrittswahrscheinlichkeit des „hundertjährigen Ereignisses“ innerhalb dieses Zeitraums auf 40 % oder 60 % steigt.

Wenn also mit Eintrittswahrscheinlichkeiten bei der Risikovorsorge argumentiert wird, wird diese nicht allein von der Häufigkeit des Ereignisses selbst, sondern auch der Zeitdauer bestimmt, in der ein gegebenenfalls betroffenes Objekt dem Überflutungsraum vor der Hochwasserschutzeinrichtung ausgesetzt ist. Bei Einrichtungen, deren Betrieb auf unbestimmte Zeit (also im Idealfall dauerhaft, vorgesehen ist, ist die Wahrscheinlichkeit, dass während der Lebensdauer eine Sturmflut auftritt, 100 %. Bei temporären Bauwerken, z. B. einer Baustelleneinrichtung, kann wie oben gezeigt, eine niedrigere Wahrscheinlichkeit angenommen werden.

Marinas, Campingplätze und andere touristische Einrichtungen können nur unter bestimmten, eingeschränkten Nutzungsbedingungen dauerhaft exponiert werden, da sie als Dauereinrichtungen auf unbestimmte Zeit vorgesehen sind. Die wichtigsten Einschränkungen werden hierbei durch die meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen gesetzt.

Hier spielt die saisonale Komponente an der Ostseeküste eine wesentliche Rolle: die touristische Nutzung der Küste. Die typische Tourismusperiode beginnt Anfang April bzw. mit den Osterferien und endet Ende Oktober. Daraus ergibt sich ein zeitabhängiger Risikomultiplikator, der als Schätzwert zu verstehen ist.

Dieser setzt sich wiederum aus zwei Faktoren zusammen:

1. Einem Schätzwert, der den Anteil der in den Überflutungsbereich gebrachten, gefährdeten Sachwerte beschreibt. Dieser ist im Winter sehr klein (faktisch 0). Im Sommer ist er 100 % und in den Übergangsmonaten kann er als monoton steigend/fallend angenommen werden. Der Wert in der Tabelle stellt einen Schätzwert dar, der zumindest von den für die Recherche zur Schadensbilanz angeschriebenen Marinas in etwa bestätigt wurde und auch der persönlichen Erfahrung nach plausibel ist.
2. Einer Funktion, die die Wahrscheinlichkeit einer schweren Sturmflut im jahreszeitlichen Verlauf beschreibt. Eine solche Funktion wurde hier aus den Sturmflutereignissen rekonstruiert, die sicher bekannt sind. Hierzu wurden sämtliche seit Beginn

moderner Pegelaufzeichnungen bekannten Hochwasserereignisse in der Kieler Bucht mit einem Scheitelwasserstand über 1,5 m NHN monatsweise eingeordnet und der prozentuale Anteil an der Gesamtzahl dieser Ereignisse ermittelt.

Durch die tabellarische Darstellung in Tabelle 2 wird verdeutlicht, dass ein Risiko hoher Schäden durch Ostseesturmfluten in den Übergangsmonaten zur Saison im Frühjahr und Herbst vorhanden ist.

Tabelle 2: Monatliche Differenzierung der Schadenswahrscheinlichkeit, abgeleitet aus dem Anteil der mobilen, gefährdeten Objekte und der jahreszeitlichen Verteilung der Sturmflutereignisse.

Monat	Anteil gefährdeter mobiler Objekte (%)	Anteil Ereignisse >1,5 m ü. NHN (%)	Kombinierte „Schadenswahrscheinlichkeit“
Januar	~0	35	0
Februar	~0	10	0
März	~25	8,33	2,08
April	~50	1,67	0,83
Mai	~100	0	0
Juni	~100	0	0
Juli	~100	0	0
August	~100	1,67	1,67
September	~75	0	0
Oktober	~25	1,67	0,42
November	~5	21,67	1,08
Dezember	~0	20	0

Die letzte Spalte der Tabelle stellt die Wahrscheinlichkeit dar, dass in dem jeweiligen Monat gefährdete, mobile Objekte durch eine Sturmflut beschädigt werden können.

Auch wenn die Statistik der Ereignisse nur einen relativ geringen Zeitraum umfasst, lässt sich ableiten, dass die Schadenswahrscheinlichkeit in den Wintermonaten nur deswegen gering ist, weil saisonbedingt die gefährdeten, mobilen Objekte (Boote, Campingfahrzeuge, Strandinfrastruktur) aus dem Gefahrenbereich außerhalb der Hochwasserschutzlinie entfernt, d. h. evakuiert, werden. Das relativ hohe Schadensrisiko im November erklärt sich durch die hohe Anzahl der Sturmflutereignisse, das Schadensrisiko im August (oder September) dagegen durch die volle Belegung der touristischen Bereiche.

3.2 Bedeutung der Mobilität für Minimierungsstrategien

Für die Entwicklung von Minimierungsstrategien bezogen auf den Verlust von Sachwerten stellt die Mobilität derselben einen wichtigen Faktor dar. Die Oktobersturmflut war ein Ereignis, das in seiner Entwicklung sehr gut vorhergesagt wurde, auch wenn die vorhergesagten Scheitelwasserstände zum Teil geringfügig übertroffen wurden. Die Vorlaufzeit von mehreren Tagen ist angesichts der Mobilität mancher der betroffenen Werte (Wohnmobile, Wohnanhänger, Zelte, Kleinboote) aus praktischer Sicht für eine Evakuierung/oder Sicherung ausreichend gewesen.

Die betroffenen Sachwerte können bei der Entwicklung von Vermeidungs- und Minimierungsstrategien in drei Kategorien unterteilt werden:

1. Sachwerte mit immobilem Charakter, dazu zählen z. B. feste Gebäude, Hafenanlagen, Verkehrswege, Küstenschutzbauwerke.
2. Sachwerte mit mobilem Charakter, deren Evakuierungskosten, gemessen am Sachwert, hoch sind oder/und deren Evakuierung nicht zeitnah realisierbar ist.
3. Sachwerte mit mobilem Charakter, deren Entfernungskosten, gemessen am Sachwert, gering sind oder deren Evakuierung zeitnah zu realisieren ist.

Für die erste Kategorie ist eine Sicherung nur dadurch möglich, dass das Objekt den Kräften, denen es während der Sturmflut ausgesetzt wird, widerstehen kann. Bei den Herstellungskosten ist dies schon in der Planung zu berücksichtigen, wenn das Objekt eine lange Lebens-/Betriebsdauer besitzen muss. Ist das Objekt anhand der Bemessung oder aufgrund von Alterung der Belastung nicht gewachsen, sind weitere Maßnahmen vor Ort zu ergreifen, wie z. B. der Schutz eines Deiches mit Sandsäcken.

Bei mobilen Sachwerten ist die Strategie des Ausweichens (rechtzeitige Evakuierung) die vorzugsweise zu wählende Strategie. Ist jedoch der Wert des zu evakuierenden Objektes einschließlich möglicher Folgekosten eines Verlustes deutlich geringer als der Kostenaufwand für eine Sicherung desselben, kann die Inkaufnahme des Verlustes oder der Beschädigung die favorisierte Variante sein. Werte, die zwar wertvoll sind, deren Evakuierung jedoch praktisch schwer realisierbar ist, sind dagegen wie immobile Objekte zu behandeln, d. h. eine Sicherung ist durch geeignete Bemessung und konzeptionelles Design der Infrastruktur zu bewerkstelligen.

4 Praktische Minimierungsstrategien

Da wie in Kapitel 2.2 beschrieben, neben den direkten, individuell zuzuordnenden Schäden weitere, schwer kalkulierbare Folgekosten, auftreten können, die in der Regel auf die Gemeinschaft zurückfallen, ist die Minimierung derartiger Schäden sinnvoll, soweit geeignete Maßnahmen bekannt sind und der Aufwand verhältnismäßig ist.

Während des EU-Projektes RISC-KIT (van Dongeren et al. 2018) wurden verschiedene Methoden der Risikominimierung für Extremereignisse in Küstenregionen erarbeitet. Diese sind derzeit noch verfügbar auf <https://www.coastal-management.eu/> auch wenn die Aufbewahrungsfrist von 5 Jahren bereits abgelaufen ist. Nachfolgend werden die wesentlichen Empfehlungen aufgeführt, die für die Region der Kieler Bucht zur Anwendung kommen können.

4.1 Schadensvorsorge auf Campingplätzen

Campingplätze, die im Einflussbereich schwerer Sturmfluten liegen, sind zusammenhängende Einheiten mit aufgrund hoher Sachwertdichte hohem Schadenspotential, aber auch hoher Mobilität.

Daher können die nachfolgend genannten Maßnahmen maßgeblich zur Schadenminimierung beitragen:

1. Jeder Campingplatz im Hochwassergebiet sollte einen funktionierenden Notfallplan haben, der vorsieht, bei welchen Situationen vorsorglich eine Evakuierung von Sachwerten zu erfolgen hat und wie diese abzulaufen hat. Dieser Notfallplan ist an

- die Besucher zu kommunizieren und sollte von der zuständigen Genehmigungsbehörde vorgeschrieben werden.
2. Gegebenenfalls sind regelmäßige, praktische Übungen abzuhalten, um sicherzustellen, dass die Evakuierung in der Praxis geordnet ablaufen kann.
 3. Auf immobile Einrichtungen sollte vor der Hochwasserschutzlinie weitestgehend verzichtet werden. Sanitäre Einrichtungen und andere Gemeinschaftsräumlichkeiten können ebenso gut mobil bereitgestellt werden.
 4. Auf das Errichten von festen Vorzelten, die sich nicht in angemessener Zeit (d. h. wenigen Stunden) abbauen lassen, sollte auf Standorten mit Höhenlagen unter 3 m NHN verzichtet werden.
 5. Alle Standplatzinhaber sind über das Verhalten im Sturmflutfall in Kenntnis zu setzen.

4.2 Schadensvorsorge in Marinas

Marinas sind während der Saison ebenfalls Bereiche mit einer hohen Sachwertdichte. Anders als bei Campingplätzen ist eine zeitnahe Entfernung der hohen Sachwerte jedoch aus praktischen Gründen nur eingeschränkt möglich. Da das Wetter meist schon vor der Sturmflut für das Verlassen des Hafens Risiken birgt und geeignete Alternativhäfen nur in unzureichendem Maße vorhanden sind, können die Boote im Regelfall das Ereignis nur vor Ort abwettern. Daher bietet sich hier an, vor Ort geeignete Einrichtungen zu schaffen:

1. Ein bedeutender Faktor für die Schadensminimierung ist, dass die Boote dem Wasserstand folgen können. Dies kann im Idealfall durch Schwimmstege erreicht werden, die konstruktiv für den vollen Bereich der Variabilität des Wasserstandes ausgelegt sind, Voraussetzung ist eine ausreichende Länge der Haltepfähle oder Ankerketten gemäß dem lokalen Bemessungswasserstand. Dieser beträgt an der Ostsee von ca. -2,5 m bis +2,8 m, lokal auch bis 4 m bezogen auf NHN, wenn eine Sicherheit von einigen Dezimetern eingeplant wird. Von Bolle und Müller (2023) wird bestätigt, dass Schwimmstege ein deutliches Plus an Sicherheit bieten.
2. Da jedoch eine Umrüstung bestehender Anlagen recht teuer werden kann, bieten sich auch Nachrüstungen an, die es erlauben, das Schiff an einem festen Steg so zu vertäuen, dass ein begrenztes Ausgleichen des erhöhten Wasserstandes möglich ist. Dies sind:
 - a. Mit Gewichten beschwerte Festmacher, die über Rollen am Steg die Länge der Vorleinen variabel halten. Öfter sieht man diese Konstruktionen an Heckdalben für Kleinstboote, bei denen schon Änderungen des Wasserstandes von weniger als einem Meter kritisch sein können. Da die Verbindungsleinen zum Steg jedoch die kürzesten Leinen sind, sind dort die flexiblen Festmacheeinrichtungen besser platziert.
 - b. Am Steg auf- und abgleitende, schwimmende Festmacheeinrichtungen (Bojen), wie sie auch in RISC-KIT als Konzept vorgeschlagen werden (<https://www.coastal-management.eu/measure/example-concept-flood-proof-mooring-marina-ger.html>).
 - c. Sogenannte „Leinenfänger“ an den Heckpfählen. Diese bestehen aus gebogenem, ca. 1 cm dickem Edelstahldraht, in dem sich die Heckleinen verfangen, bevor sie über den Pfahl rutschen.

3. Neben dem erhöhten Wasserstand trug auch eine starke Wellenunruhe in exponierten Häfen zu den dortigen Schäden bei. Ruckartige Belastungen der Festmacher können die Leinen und Beschläge überlasten und so Fahrzeuge zu unkontrolliert treibendem Gefährdungspotential für ihre Nachbarn werden lassen. Ausreichenden Schutz bieten hier entsprechend hoch ausgelegte Hafenschutzbauwerke oder vorgelagerte Flachwasserbereiche, die den Seegang vor Erreichen der Mole brechen. Diese können als lokale Vorspülung ausgeführt sein.
4. Vertäzung der Boote mit über Kreuz gelegten, langen, sogenannten Springleinen kann an festen Stegen akut während großer Schwankungen des Wasserstandes helfen, diese wenigstens teilweise auszugleichen.
5. Ähnlich wie auf Campingplätzen kann zudem ein geeigneter, individueller Notfall- und Evakuierungsplan unterstützen, um rechtzeitig vor einer Sturmflut die Eigentümer der Boote zu informieren und geeignete Zusatzmaßnahmen wie eine zusätzliche sturmsichere Vertäzung der Boote zu gewährleisten.
6. Alle Liegeplatzinhaber sind über das Verhalten im Sturmflutfall in Kenntnis zu setzen.

4.3 Risikovorsorge an Stränden

Auch wenn die Kosten von Sachwerten auf Stränden im Einzelfall eher gering sind, können sich die Schäden leicht zu größeren Summen addieren. Beispielhaft sei eine Strandkorbvermietung genannt. Auch wenn jeder einzelne Strandkorb für sich einen verhältnismäßig geringen Wiederbeschaffungswert darstellt, können auf einen einzelnen Strandabschnitt leicht über 1000 Objekte platziert sein. Da eine Überflutung von Stränden schon bei niedrigeren Sturmfluten wahrscheinlich ist, ist eine umfangreiche Risikoanalyse durch den Betreiber sinnvoll. Im Rahmen von RISC-KIT hat sich Gerull (2015) mit den Risikofaktoren befasst und eine Möglichkeit zur Risikoreduzierung ohne Evakuierung der Objekte über die Art der Belegung des Strandes diskutiert.

Aus dieser Arbeit lässt sich ableiten, dass das Risiko verringert wird, wenn die Belegungsdichte umso höher sein darf, je höher der Strandbereich liegt. Dies hat auch bei einer notwendigen Evakuierung den Vorteil, dass aufgrund kürzerer Evakuierungswege im Ernstfall mehr Objekte in der zur Verfügung stehenden Zeit entfernt werden können.

5 Fazit

Die Ostseesturmflut vom 20./21. Oktober 2023 war ein seltenes Ereignis, dessen Schadensbild zeigt, dass der klassische Sturmflutschutz, der bis auf wenige Ausnahmen durch das Land Schleswig-Holstein erfolgt, für das Hinterland überwiegend gut funktioniert hat. Die wenigen, aber beträchtlichen Schäden hinter Deichen betrafen Gebiete, in denen der Küstenschutz bisher durch die Kommunen zu leisten war und die auf konstruktives Versagen von Bauwerken oder zu niedrige Bemessung zurückgeführt werden können. Beispielhaft sei hier der Schaden in der Gemeinde Arnis genannt. In der Betrachtung der Zahl der individuellen Schadensereignisse wurde die Schadensbilanz von Objekten dominiert, für die ein individueller, privater Schutz seitens der Betreiber der betroffenen Anlagen und der

Eigentümer vorzunehmen ist. Vor allem exponierte Sportboothäfen, aber auch niedriglegene Campingplätze in Ufernähe und die touristisch genutzten Strände sowie kommunale Uferpromenaden waren hier betroffen.

Vergleichbare Schäden waren bereits bei früheren Ereignissen, insbesondere im August 1989, aufgetreten. Daher haben einzelne Einrichtungen, wie die Marina Wendtorf bereits aus diesem Ereignis Konsequenzen für eine Neuausrichtung der Infrastruktur gezogen.

Eine einfache Risikobetrachtung zeigt, dass ein Schadensrisiko für diese Art Schäden vor allem in den Übergangsmonaten März/April und Oktober/November besteht.

Auf Campingplätzen kann durch einen individuellen Evakuierungsplan der überwiegende Teil der aufgetretenen Schäden verhindert werden. Eine Umsetzung ist jederzeit möglich und erfordert wenig Investitionen.

In Marinas können Schäden unter Einsatz von dem Wasserstand folgende Festmacheeinrichtungen (Schwimmstege, geführte Festmachebojen) minimiert werden. Auch hier kann ein Evakuierungsplan unterstützend eingesetzt werden. Den Seegang dämpfende Maßnahmen wie Vorspülungen können an exponierten Stellen mit verfügbaren Sedimenten aus Baggerarbeiten realisiert werden.

In bewirtschafteten Strandbereichen kann das Verlustrisiko durch individuelle Belegungspläne und unterstützende Evakuierungsmaßnahmen minimiert werden.

6 Literaturverzeichnis

Bolle, L.; Müller, K. (2023): Schäden an der Infrastruktur – ist die Saison 2024 in Gefahr? Hg. v. Delius Klasing. Online verfügbar unter <https://www.boote-magazin.de/reise-und-charter/marina/ostsee-sturmflut-riesige-schaden-an-der-infrastruktur/>, zuletzt geprüft am 21.06.2024.

Brock, K. (2024): Sturmhochwasser 20./21.10.2023 – Schadensbilanz Yachthafen Sonderburg, 26.05.2024. E-Mail an G. Seiß. PDF.

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2023): Sturmfluten. Berichte zu Sturmfluten und extremen Wasserständen. Online verfügbar unter https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/sturmfluten_node.html, zuletzt geprüft am 25.04.2024.

Garic, J. (2015): Camping als Lebensgefühl. In: Handelsblatt, 29.08.2015. Online verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/dienstleister/caravan-salon-camping-als-lebensgefuehl/12249440.html>, zuletzt geprüft am 01.11.2024.

Gerull, H. (2015): Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur Durchführung einer Risikoanalyse für einen Strandabschnitt mit touristischer Nutzung am Beispiel der Strandkorbvermietung in deutschen Ostseebädern. Projektarbeit. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg. Institut für Wasserbau.

Karbe, P. (2024): Sturmhochwasser 20./21.10.2023 – Schadensbilanz Marina Olpenitz, 05.07.2024. E-Mail an G. Seiß.

Krasemann, H. (2009): Hochwasser Kieler Förde / Heikendorf November 1995. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=YEvyO9wqw3Y>.

Krüger, T. (2024): Sturmhochwasser 20./21.10.2023 - Schadensbilanz Marina Wendtorf, 23.05.2024. E-Mail an G. Seiß.

NDR (Hg.) (2023): Beschädigte Boote nach Ostsee-Sturmflut: Etwa 100 Totalverluste. Online verfügbar unter <https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Beschae-digte-Boote-nach-Ostsee-Sturmflut-Etwa-100-Totalverluste,bootsversicherung100.html>, zuletzt geprüft am 31.05.2024.

Neemann, V. (1994): Beschreibung des Sommerhochwassers an der westlichen Ostseeküste von Schleswig-Holstein am 28.08.1989 mit Vergleich anderer Hochwasser. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hg.): Gewässerkundliches Jahrbuch 1989, 2–14.

Öchsle, Ch. (2024): Wiederaufbau nach Sturmflut: Viele Häfen in SH sind startklar. Hg. v. Norddeutsche Rundfunk. Online verfügbar unter <https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Wiederaufbau-nach-Sturmflut-Viele-Haefen-in-SH-sind-start-klar,sturmflut2146.html>, zuletzt geprüft am 31.05.2024.

Oelerich, J. (2024): Nachhaltiger Küstenschutz an der Ostsee. Jahrestagung des BWK-Nord. Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau Nord. Kiel, 14.06.2024.

Perlet-Markus, I. (2023): Schweren Sturmflut vom 20. Oktober 2023. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Rostock. Online verfügbar unter https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/_Anlagen/Downloads/Ostsee_Sturmflut_20231020.pdf, zuletzt geprüft am 26.04.2024.

van Dongeren, A.; Ciavola, P.; Martinez, G.; Viavattene, Ch.; Bogaard, T.; Ferreira, O. et al. (2018): Introduction to RISC-KIT: Resilience-increasing strategies for coasts. In: Coastal Engineering 134, 2–9. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2017.10.007.

WNA Nord-Ostsee-Kanal (Hg.) (2024): Start der Nassbagger-Arbeiten an der NOK-Oststrecke. Online verfügbar unter https://www.wna-nord-ostsee-kanal.wsv.de/Webs/WNA/WNA-NOK/DE/4_Presse/2_Pressemitteilungen/DE/20240415_AbO_Nassbagger_PM.html?nn=2943462, zuletzt geprüft am 25.06.2024.

WSA Lübeck (1990): Die Sommersturmflut vom 27./28.08.89 in der südwestl. Ostsee. Untersuchungsbericht des WSA Lübeck. Lübeck. Akte Az.:221.3/45.

Die Ostseesturmflut vom Oktober 2023 an den sandigen Flachküsten und Binnenküsten von Mecklenburg-Vorpommern

Marcus Siewert¹, Anja Klee², Lars Tiepolt² und Frank Weichbrodt³

¹ Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg, Abteilung Küste
marcus.siewert@stalumm.mv-regierung.de

² Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg, Abteilung Küste

³ Ministerium für Klimaschutz, Landwirtschaft, ländliche Räume und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern

Zusammenfassung

Die Sturmflut an der deutschen Ostseeküste im Oktober 2023 war im Bereich von Mecklenburg-Vorpommern eine mittlere (im Westen) bzw. leichte Sturmflut (im Osten). Auf die Beschreibung der Genese der Sturmflut folgt die statistische Einordnung und der Vergleich zu früheren Ereignissen. Die Bilanzierung der Schäden fokussiert auf die vom Land Mecklenburg-Vorpommern unterhaltenen Landesküstenschutzdünen. Strategische Aspekte zur langfristigen Sicherung dieser Hochwasserschutzbauwerke werden erläutert. Die Auswirkungen der Sturmflut an den inneren Küsten des Landes schließen den Artikel ab.

Im Bereich von Landesküstenschutzdünen kam es durch die Kombination von hohen Wasserständen und Seegang lokal zu teilweise erheblichen Sandumlagerungen aus dem Dünenkörper in Richtung Strand und Schorre. Diese Sandumlagerungen waren aber weder überraschend noch mit negativen Auswirkungen für das Schutzniveau an der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern. Die lange Verweilzeit der Sturmflut führte dazu, dass es auch an den inneren Küsten erhebliche Wasserstandserhöhungen gegeben hat. Dies hat zu einer hydraulischen Belastung der Deiche geführt. Entgegen der in den Medien verbreiteten Informationen ist kein Deich gebrochen.

Schlagwörter

Ostsee, Sturmflut, Dünenerosion

Summary

The storm surge at the German Baltic Sea coast in October 2023 ranged in Mecklenburg-Vorpommern from moderate in the west to light in the east. The paper describes the formation of the surge, followed by a statistical classification and comparison to previous events. The damage evaluation focusses on flood protection dunes maintained by the federal state of Mecklenburg-Vorpommern. Strategic aspects for safeguarding these dunes are discussed. The paper ends with a description of the storm surge effects at the inner coast.

In the area of the state's coastal protection dunes, the combination of high water levels and swell led to significant local sand displacement from the dune toward the beach and the shore. Surprisingly, however, This sand displacement was no surprise and had no negative impact on the protection level at the outer coast

of Mecklenburg-Vorpommern. The long duration of the storm surge also led to significant water level increases on the inner coasts. This resulted in hydraulic stress on the dikes. Contrary to the information disseminated in the media, no dike has breached.

Keywords

Baltic Sea, storm surge, dune erosion

1 Einleitung

Am 20./21.10.2023 ereignete sich in der westlichen Ostsee eine schwere Sturmflut. An der deutschen Ostseeküste wurden die höchsten Scheitelwerte in der westlichen Kieler Bucht registriert. Am Pegel Flensburg wurde ein außergewöhnlicher Wasserstand von 2,27 m über Normalmittelwasserstand gemessen (Kategorie „sehr schwere Sturmflut“).

Ursachen des Ereignisses waren ein über der Ostsee liegendes Starkwindfeld mit langanhaltendem Oststurm sowie ein ausgeprägter Füllungsgrad in der Ostsee zwischen 35 und 45 cm. Diese Konstellation führte insbesondere in den westlichen Gebieten der deutschen Ostseeküste zu langen Verweildauern von Wasserständen über 1 m über Normalmittelwasserstand. In Flensburg verweilte das Wasser 53 Stunden über 1 m und 9 Stunden über 2 m über dem Normalmittelwasser.

In Mecklenburg-Vorpommern nahm die Sturmflut im Vergleich zu Schleswig-Holstein einen moderaten Verlauf und erreichte an der Außenküste das Ausmaß einer leichten Sturmflut für die Bereiche östlich von Rügen bis zu einer schweren Sturmflut mit einem statistischen Wiederkehrintervall von 10 Jahren für den Bereich Nordwestmecklenburg. An der windexponierten Ostküste Rügens wurden die hohen Wasserstände von starkem, langanhaltendem Seegang begleitet, welcher lokal zu erheblichen Schäden an kommunalen Infrastrukturen im Uferbereich führte.

Insgesamt verlief die Sturmflut für das Land ohne schwerwiegende Folgen. Die Anlagen des Landesküstenschutzes haben sich bewährt und funktionierten ohne Einschränkung. Die erwartungsgemäß eingetretenen Sedimentumlagerungen im Bereich der Landesküstenschutzdünen überstiegen nicht das übliche Ausmaß vergleichbarer Sturmflutereignisse.

2 Wetterlage

Ein Hochdruckgebiet (1030 hPa) über Skandinavien (Lofoten/Nordschweden) sowie ein ausgedehntes Sturmtief über England (975 hPa, Tief „Viktor“) führten im Verlauf des 20.10.2023 zu einem starken Luftdruckgefälle mit über dem Norden Deutschlands und der Ostsee verlaufender Luftmassengrenze und damit verbundenem hohem Sturmpotential (Abbildung 1).

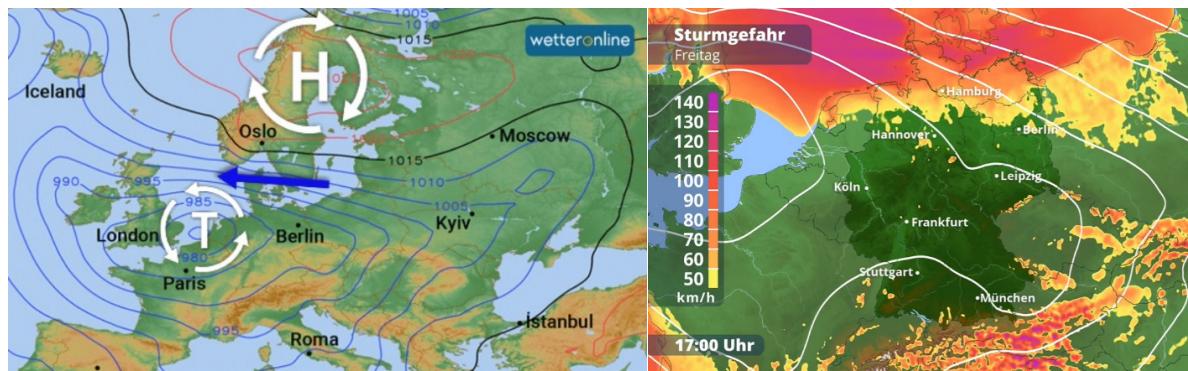


Abbildung 1: Großwetterlage in Europa am 20.10.2023 mit ausgeprägter Ostwindrichtung (blauer Pfeil) (links) sowie Sturmvorhersage für den Norden Deutschlands 20.10.2023/17 h MEZ (rechts). (Quellen: www.wetteronline.de und www.wetter.com).

In der Nördlichen und Zentralen Ostsee wehte anfangs ein Wind aus nördlicher Richtung, dann erfasste eine Ostströmung die gesamte Ostsee. Sowohl über der Ost- als auch der Nordsee entwickelte sich dann ein ausgedehnter und langanhaltender Oststurm (Tabelle 1).

Tabelle 1: Windentwicklung über der Ostsee vom 19. bis 21.10.2023 (Quelle: DWD).

Wind in Bft.	19.10.2023	19.10.2023	20.10.2023	20.10.2023	21.10.2023	21.10.2023
DWD	03:00 Uhr	09:00 Uhr	03:00 Uhr	09:00 Uhr	03:00 Uhr	09:00 Uhr
Nördl. Ostsee	NNE 5	NE 5	E 6	ENE 6	E 6	E 7
Zentr. Ostsee	NNE 4	ENE 4	E 6	E 6	E 7	E 7
SE-Ostsee	E 4	E 5	E 6	E 6	E 7	ESE 7
Südl. Ostsee	E 5	E 6	E 6	E 7	E 6	ESE 5
Westl. Ostsee	E 5	E 6	E 6	E 7	E 5	ESE 4

Die ausgeprägte Ost-West-Ausrichtung des Sturmfeldes bewirkte eine unterschiedliche Wasserstandsentwicklung an den deutschen Küsten. In der Nordsee wurde das Wasser von der deutschen Küste auf die offene See gedrückt (Sturmebbe), für die westliche Ostsee wurde eine landesweite Sturmflut mit unterschiedlichen lokalen Buchteneffekten vorhergesagt.

3 Sturmflutwarnung und Alarmstufen

Durch den Wasserstandsvorhersagedienst des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Rostock erfolgte über die automatische Alarmierung per FACT24, Fax, E-Mail sowie Internet eine Warnung vor einer Sturmflut mittleren bis schweren Ausmaßes für alle Bereiche der deutschen Ostseeküste

(KB – Kieler Bucht, LB – Lübecker Bucht, wR – westlich Rügens und öR – östlich Rügens):

Mi., 17.10.2023 erste Ankündigung einer Sturmflut für den 19.10.2023

Do., 18.10.2023 07:30 Uhr Sturmflutwarnung
Prognose ab 19.10. Mittag: KB 1,00–1,50 m über NHN
Prognose ab 19.10. Nachmittag: LB 1,00–1,40 m; wR 0,80–1,10 m;
öR 0,70–1,10 m über NHN.

Fr., 19.10.2023 07:30 Uhr:
Prognose von 19.10. bis 21.10. Mittag: KB 1,20–1,90 m, Flensburg bis 2,00 m; LB 1,00–1,80 m; wR 0,70–1,50 m, öR 0,70–1,20 m; innere

Küstengewässer (Bodden und Haff) 0,70–1,10 m, Greifswalder Bodden bis 1,50 m über NHN

Sa., 21.10.2023 10:45 Uhr Entwarnung

Die durch das BSH seit Ankündigung der Sturmflut regelmäßig aktualisierten Modellläufe der Wasserstandsprognosen führten bis zum Eintritt der Sturmflut zu insgesamt nach oben korrigierten Scheitelwasserständen. Für die Küste Mecklenburg-Vorpommerns prognostizierten die verschiedenen Wasserstandsmodelle zuletzt Maximalwasserstände von 1,20 m über Normalmittelwasser für die Außenküstenabschnitte östlich von Rügen sowie 1,50 m über Normalmittelwasser für die Außenküstenabschnitte westlich von Rügen und somit lokal variierend den Eintritt einer leichten bis schweren Sturmflut. Für die inneren Küstengewässer wurden Scheitelwasserstände bis 1,10 m über Normalmittelwasser vorhergesagt. Die in Abbildung 2 aufgeführten Modellläufe zeigen die verschiedenen Wasserstandsprognosen für den Pegelstandort Warnemünde am 20.10./21:46 Uhr MEZ kurz vor Erreichen des Sturmflutscheitels.

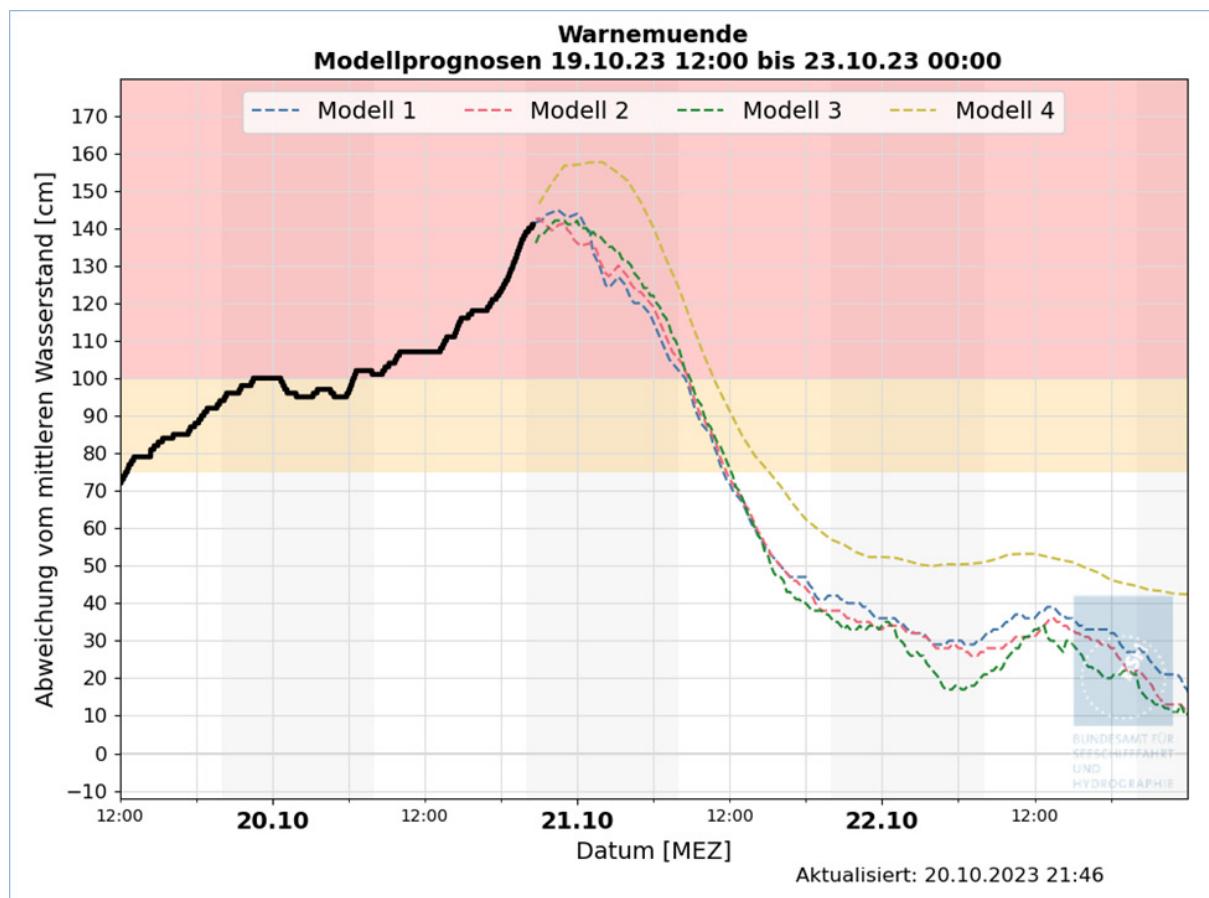


Abbildung 2: Modellprognosen für den Wasserstand (farbige Linien) sowie Messung (schwarze Linie) am Pegel Warnemünde für die Zeit vom 19. bis 23.10.2023. (Quelle: www.bsh.de).

Basierend auf den Wasserstandsprognosen empfahlen die Hochwassermeldezentrden kreisfreien Städten und Landkreisen die Ausrufung der Alarmstufe II. Im Landkreis Nordwestmecklenburg wurde aufgrund der zu erwartenden höheren Wasserstände im Bereich der Wismarbucht die Alarmstufe III ausgelöst. Den Alarmstufen ist grundsätzlich der Beginn folgender Hochwasserdienste mit entsprechenden Zuständigkeiten zugeordnet:

- Alarmstufe I Wasserstandsmeldedienst (Hochwassermeldezentren)
- Alarmstufe II Kontrolldienst (Landrat bzw. Oberbürgermeister; Fachberatung d. StALU)
- Alarmstufe III Wachdienst (Landrat bzw. Oberbürgermeister; Fachberatung StALU)
- Alarmstufe IV Hochwasserabwehr (Landrat/Oberbürgermeister; Fachberatung StALU)

4 Verlauf und statistische Einordnung der Sturmflut

Die Sturmflut vom 20. bis 21.10.2023 ereignete sich wenige Tage nach Beginn der offiziellen Sturmflutsaison am 16.10. Bereits Tage vor dem Ereignis betrug der Füllungsgrad der gesamten Ostsee zwischen 0,35 und 0,45 m über Normalmittelwasserstand. An der deutschen Ostseeküste lagen die Wasserstände in der Kieler Bucht und in der Lübecker Bucht zwischen 0,20 und 0,50 m und im Gebiet östlich Rügens zwischen 0,20 und 0,60 m über dem mittleren Wasserstand. Das beeinflusste in der Folge auch die Maximalwasserstände der Sturmflut.

Die ausgeprägte Ostströmung des Sturmes führte insgesamt zu von Ost nach West ansteigenden Scheitelwasserständen und erreichte am Pegel Flensburg in Schleswig-Holstein den Höchststand von 2,27 m über Normalmittelwasserstand (Abbildung 3). Dies entspricht der Kategorie einer sehr schweren Sturmflut.

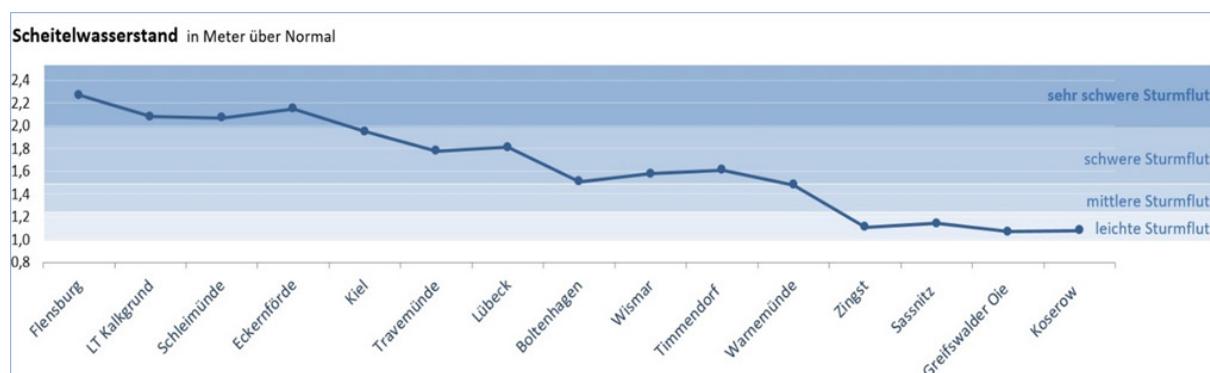


Abbildung 3: Scheitelwasserstände der Sturmflut am 20./21.10.2023 an der deutschen Ostseeküste (Quelle: www.pegelonline.de).

Tabelle 2: Scheitelwasserstände an der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern am 20./21.10. (Quelle: www.pegelonline.de).

Außenküste	Scheitelwasserstand über Normalmittelwasserstand	Uhrzeit	Sturmflutkategorie	Alarmstufe	Statistik
Boltenhagen	1,51 m	20.10., 18:10 Uhr	schwere Sturmflut	III	HW 5
Timmendorf	1,61 m	20.10., 20:36 Uhr	schwere Sturmflut	III	HW 10
Wismar	1,58 m	20.10., 22:20 Uhr	schwere Sturmflut	III	HW 5
Warnemünde	1,48 m	20.10., 22:37 Uhr	mittlere Sturmflut	II	HW 10
Zingst	1,11 m	20.10., 18:15 Uhr	leichte Sturmflut	I	k.A.
Sassnitz	1,14 m	20.10., 22:04 Uhr	leichte Sturmflut	I	HW 5
Koserow	1,08 m	20.10., 19:05 Uhr	leichte Sturmflut	I	< HW 2

In Mecklenburg-Vorpommern erreichte die Sturmflut nur im westlichen Landesteil das Ausmaß einer schweren Sturmflut. Der höchste Scheitelwert wurde hier mit 1,61 m über Normalmittelwasserstand in Timmendorf auf der Insel Poel registriert. Richtung Osten

sanken die Scheitelwasserstände an der Außenküste kontinuierlich ab und erreichten auf der Insel Usedom mit 1,08 m über Normalmittelwasserstand in Koserow nur noch die Intensität einer leichten Sturmflut (Tabelle 2, Abbildung 4). Leichte Sturmfluten weisen eine statistische Häufigkeit von 1 bis 2 Jahren auf, schwere Sturmfluten von 5 bis 20 Jahren.

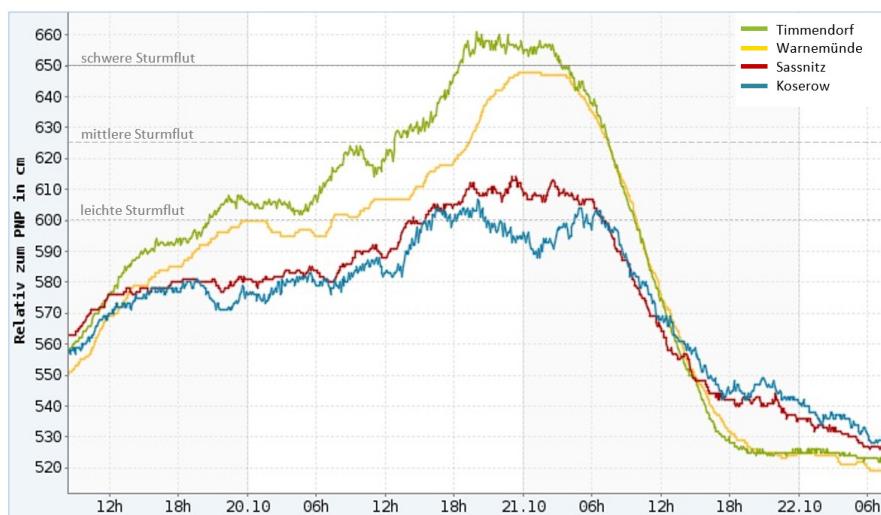


Abbildung 4: Ganglinienvergleich des Wasserstandes vom 19. bis 22.10.2023 für ausgewählte Standorte an der Außenküste. (Quelle: www.pegelonline.de).

An den inneren Küstengewässern sorgte der anhaltende Oststurm für einen erhöhten Wassereinstrom mit boddenseitig entsprechend hohen Wasserstandsanstiegen. Die statistisch höchsten Scheitelwasserstände wurden an den Binnenküsten des Darß (Althagen, Born, Wiek) sowie des Peenestroms (Wolgast) mit dem Ausmaß eines jeweils 20-jährlichen Hochwassereignisses registriert (Tabelle 3, Abbildung 5).

Die Hochwasserstände wiesen vor allem an den westlichen Küstenabschnitten sehr lange Verweildauern auf. Insbesondere im Bereich der Kieler und Mecklenburger Bucht verursachte der langanhaltende Oststurm erhebliche Verweildauern der Sturmflutwasserstände von über 1,00 m über Normalmittelwasserstand. Am längsten hielt das Hochwasser in Flensburg mit 53 Stunden über 1,00 m und 9 Stunden über 2,00 m über Normalmittelwasserstand an.

Tabelle 3: Scheitelwasserstände an der Binnenküste von Mecklenburg-Vorpommern am 20./21.10. (Quelle: www.pegelonline.de).

Binnenküste	Scheitelwasserstand über Normalmittelwasserstand	Uhrzeit	Sturmflut-kategorie	Alarmstufe	Statistik
Rostock UW	1,50 m	20.10., 22:15 Uhr	-	II	HW 5
Althagen	1,00 m	21.10., 13:42 Uhr	-	II	HW 20
Barth	1,09 m	21.10., 05:53 Uhr	-	I	HW 10
Kloster	1,31 m	21.10., 00:44 Uhr	-	-	< HW 10
Stralsund	1,51 m	20.10., 20:56 Uhr	-	III	< HW 20
Greifswald	1,48 m	20.10., 18:53 Uhr	-	II	< HW 10
Wolgast	1,14 m	20.10., 19:35 Uhr	-	-	HW 20
Karnin	1,06 m	20.10., 19:04 Uhr	-	-	< HW 20
Ueckermünde	0,92 m	20.10., 18:44 Uhr	-	I	HW 5

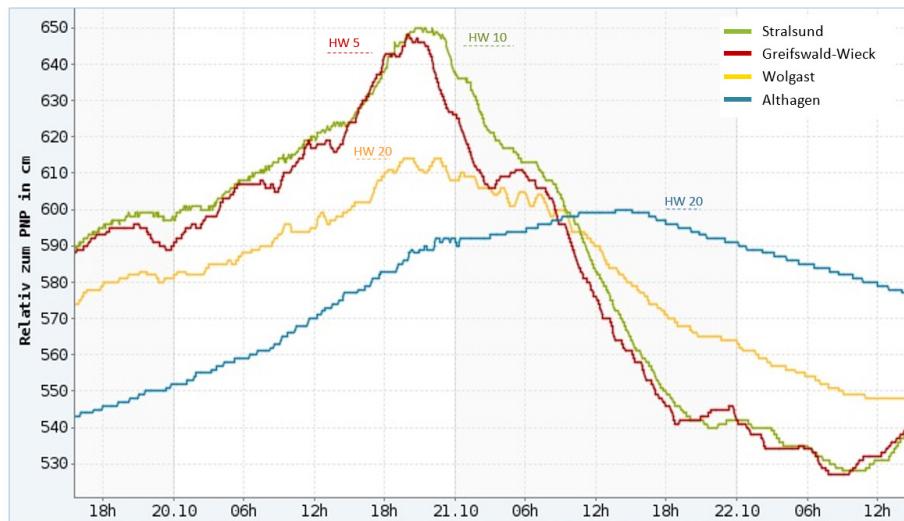


Abbildung 5: Ganglinienvergleich des Wasserstandes vom 19. bis 22.10.2023 für ausgewählte Standorte an der Binnenküste. (Quelle: www.pegelonline.de).

In Mecklenburg-Vorpommern waren Sturmflutwasserstände von über 1,00 m über Normalmittelwasserstand mit 37 Stunden am längsten im Bereich Nordwestmecklenburg (Wismar und Timmendorf/Poel) zu verzeichnen. Wasserstände von über 1,50 m über Normalmittelwasserstand (schwere Sturmflut) hielten hier insgesamt 9 Stunden an. Generell nahm die Verweildauer der Sturmflutwasserstände ähnlich der Höhe der Scheitelwasserstände von West nach Ost ab und erreichte mit ca. 10 Stunden sein Minimum am Standort Koserow auf Usedom (Abbildung 6).

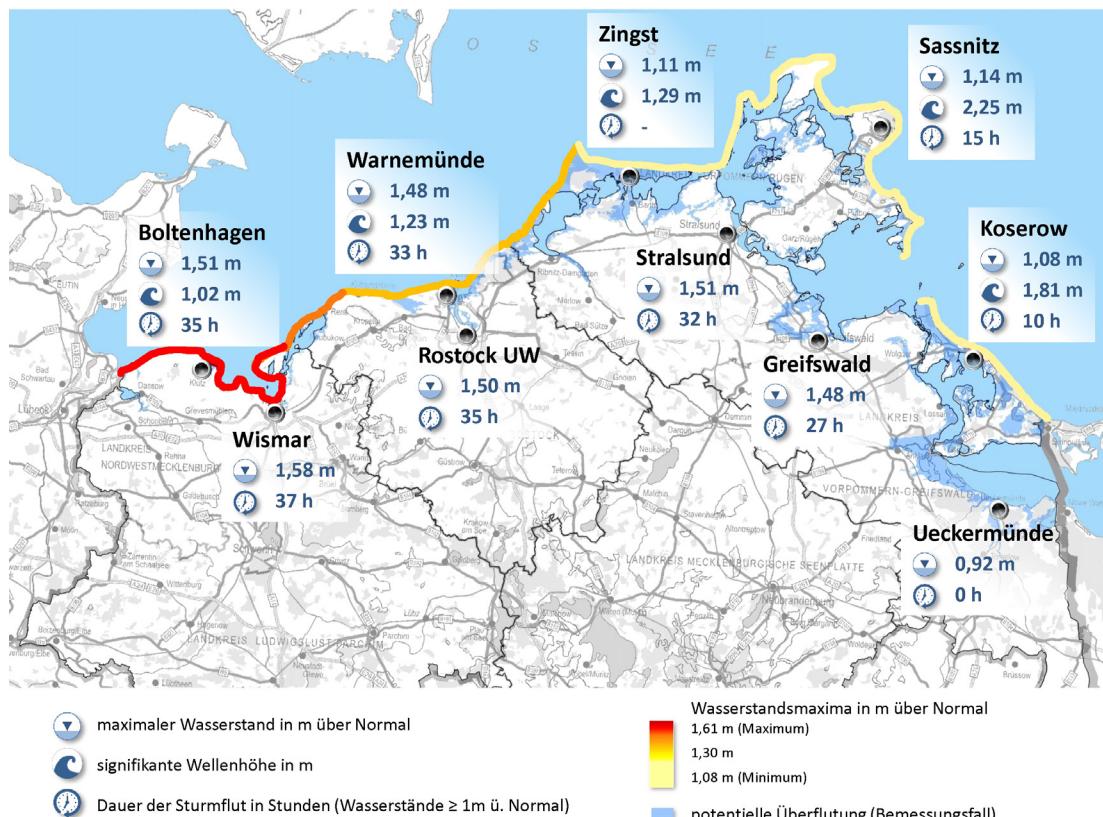


Abbildung 6: Sturmflutkennwerte vom 20./21.10.2023 für ausgewählte Standorte an der Außen- und Binnenküste von Mecklenburg-Vorpommern. (Quelle WSA/Internes Messnetz Küste).

Die hohen Wasserstände wurden lokal z. T. von starkem Seegang begleitet. Die Seegangsbelastung fiel dabei östlich von Rügen mit einer signifikanten Wellenhöhe bis zu 2,25 m (Göhren, Küstennahbereich in 5 m Wassertiefe) deutlich höher aus als an den Küstenabschnitten westlich von Rügen. Hier wurde in der Wismarbucht (Boltenhagen) eine signifikante Wellenhöhe von maximal 1,02 m registriert (Abbildung 7).

Hervorzuheben ist die langanhaltende Seegangsbelastung vor Rügens Ostküste mit bis zu 15 Stunden andauernden Wellenhöhen von über 2 m. Der Seegang erreichte hier eine maximale Wellenhöhe von bis zu 2,91 m.



Abbildung 7: Seegangsverlauf (signifikante Wellenhöhe) während der Sturmflut an der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern. (Quelle: Internes Messnetz Küste).

Abbildung 8 ordnet die Sturmflut vom 20./21.10.2023 in die empirische Zeitreihe aller seit der an der westlichen Ostseeküste höchsten messtechnisch erfassten Sturmflut im Jahre 1872 registrierten Scheitelwasserstände für den Pegelstandort Warnemünde ein. Bezogen auf den Warnemünder Pegel ereigneten sich schwere Sturmfluten (Scheitelwasserstände ab 1,50 m über Normalmittelwasserstand) seitdem insgesamt 12 Mal. Die Sturmflut vom Oktober 2023 lag für den Pegel Warnemünde mit 1,48 m über Normalmittelwasserstand im oberen Bereich einer mittleren Sturmflut (Scheitelwasserstände zwischen 1,25 bis 1,50 m über Normalmittelwasserstand).

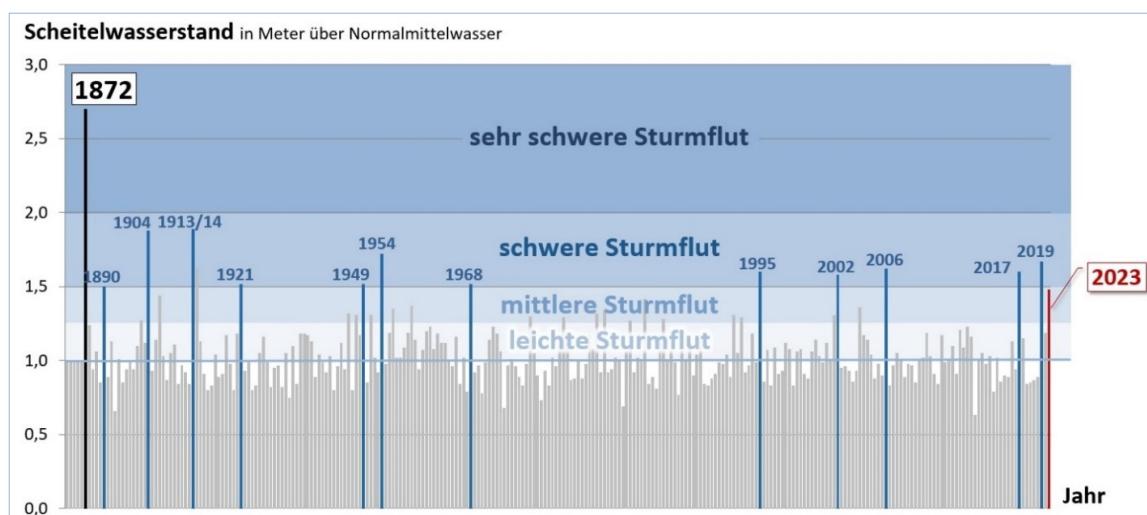


Abbildung 8: Einordnung der Sturmflut am 20./21.10.2023 in die Zeitreihe 1872 bis 2023 für den Pegel Warnemünde.

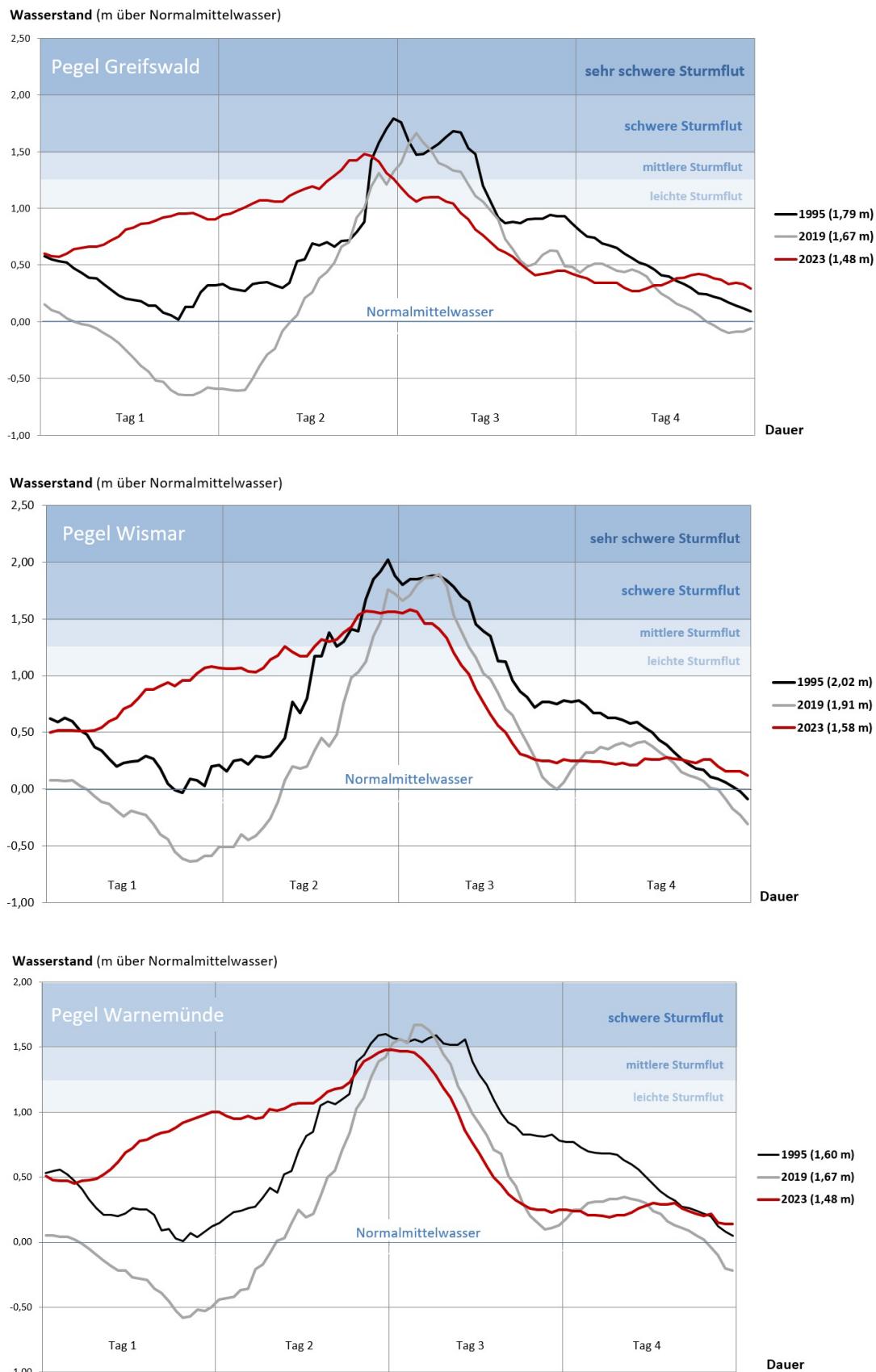


Abbildung 9: Ganglinienvergleich der Sturmfluten 1995, 2019 und 2023 für ausgewählte Standorte in Mecklenburg-Vorpommern. (Quelle: Professur Geotechnik & Küstenwasserbau Universität Rostock).

Trotz der im Vergleich mit den letzten schweren Sturmfluten niedriger eingetretenen Scheitelwerte ist die Sturmflut vom 20./21.10.2023 insgesamt dennoch als schweres Hochwasserereignis zu werten. Die im Vorfeld der Sturmflut ausgeprägte Vorfüllung der Küstengewässer sowie die lokal zum Teil erheblichen Verweildauern hoher Wasserstände führten zu insgesamt großen Sturmflutfüllen (Fülle = Flächenintegral der Wasserstandsganglinie). Die Füllen der Sturmflut vom Oktober 2023 sind im Ganglinienvergleich der letzten schweren Sturmfluten in etwa mit der Sturmflut von 2019 vergleichbar (Abbildung 9).

5 Sturmflutschäden und Schadensbilanzierung

5.1 Vorbereitende Maßnahmen des Landes und der Kommunen

Die Hochwassermeldezentren der Staatlichen Ämter für Landwirtschaft und Umwelt waren während des Hochwasserereignisses bis zum Ende der Sturmflut dauerhaft besetzt. Den kreisfreien Städten und Landkreisen an der Küste wurde durch die Hochwassermeldezentren die Ausrufung der Alarmstufe II (Kontrolldienst) empfohlen. Im Landkreis Nordwestmecklenburg wurde aufgrund der höher prognostizierten Wasserstände im Bereich der Wismarbucht und der Lübecker Bucht die Alarmstufe III (Wachdienst) ausgelöst. Mit der Ausrufung der Alarmstufen war die besondere Überwachung der Hochwasserschutzanlagen insbesondere in den relevanten Abschnitten verbunden. Die mit den Alarmstufen verbundenen vorbereitenden und abwehrenden Maßnahmen zur Hochwasserbekämpfung lagen in der Zuständigkeit der Landkreise und kreisfreien Städte.

Die in der Zuständigkeit der Landesverwaltung befindlichen Sperrwerke (Greifswald, Conventer Niederung, Tarnewitz, Klütz u. a.) wurden vorschriftsmäßig geschlossen. Ebenso wurden alle im Bereich von Landesküstenschutzanlagen vorhandenen Mobilverschlüsse wasserstandsbezogen geschlossen (Sturmflutschutztore, Dammbalkenverschlüsse, Schieber). Die Strände an den Außenküsten des Landes waren bis auf wenige Ausnahmen von baulichen Anlagen und Gegenständen beräumt. Dies wurde im Vorfeld der Sturmflut durch Vorortkontrollen in allen Küstengemeinden überprüft. Vereinzelt festgestellte verbliebene Gegenstände, wie Strandkörbe, Wege- und Fundamentplatten, wurden gegenüber den zuständigen Kommunalverwaltungen gemeldet und bei technischer Erreichbarkeit ebenfalls unverzüglich beräumt. Verbliebene Einzelgegenstände stellten unter Berücksichtigung der Wasserstandsprognose keine ernsthafte Gefahr für die Funktionsfähigkeit der Küstenschutzanlagen dar.

5.2 Schadenskartierung und -bilanzierung

Die unmittelbar im Anschluss an das Sturmflutereignis von den für den Landesküstenschutz zuständigen Staatlichen Ämtern für Landwirtschaft und Umwelt (StÄLU) vorgenommene Schadenskartierung der Küste ergab, dass es zu keinem Versagen von Landesküstenschutzanlagen kam. Die Systeme des Landesküstenschutzes funktionierten ohne Einschränkung. Alle operativen Maßnahmen des Küstenschutzes liefen reibungslos ab. Es traten keine Überflutungen oder gravierenden Küstenrückgänge in durch Landesküstenschutzanlagen geschützten Bereichen auf. Die erwartungsgemäß eingetretenen Sedimentumlagerungen im Düne-Strand-Schorre-System der Landesküstenschutzdünen gingen

nicht über das übliche Maß hinaus und führten zu keiner Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit der Anlagen.

Im Hinblick auf die gerade erst begonnene Sturmflutsaison ergab die erste Schadensbilanzierung, dass das Schutzniveau der Küste durch die Sturmflut nicht beeinträchtigt wurde und die Küstenschutzanlagen auch ein nachfolgendes Sturmflutereignis sicher kehren können.

An den stark seegangsbelasteten Küstenabschnitten der besonders exponierten Ostküste von Rügen sowie in Bereichen Ostvorpommerns kam es lokal zu baulichen Schäden an kommunalen Infrastrukturen, wie Hafenanlagen und touristischen Einrichtungen. Zudem führte die Überströmung eines landwirtschaftlichen Deiches zu einer lokal begrenzten Überflutung des Hinterlandes, jedoch ohne Gefährdung von Zusammenhangsbauung.

An ungesicherten Steilufern traten stellenweise Rückgänge und Versteilungen auf. In Abstimmung mit den zuständigen Gemeinden und kreisfreien Städten erfolgte lokal die Ausweisung und Sicherung von sturmflutbedingten Gefahrenquellen.

6 Funktionelle Bewertung der Leistungsfähigkeit der Landesküstenschutzdünen

Im Bereich von Landesküstenschutzdünen kam es durch die Kombination von hohen Wasserständen und Seegang lokal zu teilweise erheblichen Sandumlagerungen aus dem Dünenkörper in Richtung Strand und Schorre. Dies stellt jedoch keinen Schaden dar, sondern ist Teil des Wirkprinzips von Dünen. Küstenschutzdünen sind „Verschleißbauwerke“, deren Sanddepot im Laufe einer Sturmflut erodieren und über den Prozess des Sedimentquertransportes in den Strand- und Schorrebereich umgelagert werden soll.

Durch die Sandumlagerungen sind in einigen Küstenabschnitten zum Teil mehrere Meter hohe Dünenkliffs entstanden, welche zur Minimierung des Gefahrenpotentials im Rahmen der Bauwerksunterhaltung zeitnah abgeböscht wurden. Landesweit wurde geschätzt, dass circa 500.000 m³ Sand umgelagert wurden.

Für die genaue Einschätzung der Leistungsfähigkeit der Landesküstenschutzdünen wurden unmittelbar nach der Sturmflut terrestrische Vermessungen für Landesküstenschutzdünen mit bekanntem bzw. erwartetem sturmflutbedingtem Sedimentdefizit veranlasst. Die Messkampagne lieferte für 12 Dünenabschnitte insgesamt 74 Profilaufnahmen auf rund 16,5 km Küstenlänge. Der aufgenommene Profilbereich umfasste jeweils den Dünen- und Strandbereich. Auswertbare Messergebnisse lagen eine Woche nach dem Sturmflutereignis vor. Die Auswertung erfolgte anhand von Soll-Ist-Vergleichen des Düne-Strand-Profils auf Basis des Teilautomatisierten Dünenkatasters (TADK) mit Dünenprofilen einer Airborne-Laserscanning-Aufnahme vom September/Oktobe 2022 als Differenzmodell (Abbildung 10).

Die Auswertung der Profilvergleiche ergab, dass grundsätzlich alle Landesküstenschutzdünen über ein Verschleißteil von mindestens 50 % verfügen, so dass ein unmittelbar eintretendes HW₂₀₀-Ereignis schadlos gekehrt werden kann. Es bestand somit kein akuter Handlungsbedarf (Aufspülerfordernis). Kurzfristig und/oder wiederholt eintretende Hochwässer (auch mit Eintrittswahrscheinlichkeiten < HW₂₀₀) könnten jedoch zu einer zunehmenden Schwächung der Leistungsfähigkeit der Dünen führen und in der Folge zu einem kurzfristigen bzw. akutem Handlungsbedarf führen.



Abbildung 10: Profilvergleich für die Düne Ahrenshoop (KKM F180.235) vor und nach der Sturmflut am 20./21.11.2023. (Quelle: TADK).

Da die Funktionstüchtigkeit einer Küstenschutzdüne auf einen mit ausreichend Sand ausgestatteten Strand- und Schorrebereich angewiesen ist, waren bereits vor dem Sturmflutereignis für 2 der insgesamt 27 Küstenschutzdünen des Landes Wiederholungsaufspülungen zum Ausgleich von Materialdefiziten und zur Wiederherstellung des geforderten Strand-Schorre-Profils vorgesehen, deren Rahmenbedingungen nach der Sturmflut überprüft und die Projektdaten entsprechend angepasst werden mussten:

- Küstenabschnitt Prerow-Zingst:

Im Rahmen einer bereits Anfang Oktober 2023 begonnenen Aufspülung sollten bis Ende Dezember 2023 mehr als 700.000 m³ Sand auf einer Küstenlänge von 10,3 km aufgespült werden. Die infolge der Sturmflut entstandenen Materialverluste führen zu einem Mehrbedarf von ca. 15 % Aufspülsand.

- Küstenabschnitt Neuhaus-Dierhagen:

Eine für den Winter 2023/24 geplante Aufspülmaßnahme mit einer Spülmenge von rund 300.000 m³ auf 1,7 km Küstenlänge wurde nach der Sturmflut überprüft und ein Mehrbedarf von 10 % Aufspülsand ermittelt.

7 Strategische Aspekte von Sandaufspülungen

Die Sandumlagerungen an den Landesküstenschutzdünen während der Sturmflut im Oktober 2023 waren weder überraschend noch mit negativen Auswirkungen für das Schutzniveau an der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern. Entsprechend den in Kapitel 6 beschriebenen Wirkungsmechanismen ist die Düne ein Verschleißbauwerk, das eine definierte Anzahl an Sturmflutereignissen kehren kann bis es aufgezehrt ist. Vorteil dieser Küsten- und Hochwasserschutzstrategie ist der Erhalt der natürlichen Sedimentdynamik und die Vermeidung von harten Bauwerken zur Ufersicherung.

Der Prozess der Dünenentwicklung wird durch jährliche Laserscans und ereignisbezogene Vermessungen aufgenommen und begutachtet. Tritt keine besonders schwere Sturmflut auf, müssen die Dünen im zeitlichen Abstand von etwa 5 bis 10 Jahren (ohne Buhnen) bzw. 12 bis 15 Jahren (mit Buhnen) durch eine Wiederholungsaufspülung instandgesetzt werden. Der mittlere jährliche Sedimentbedarf für die Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern beträgt aktuell etwa 500.000 m³. Dieser Bedarf kann durch Sturmflutereignisse deutlich steigen. Zum Erhalt der Schutzfunktion der Dünen sind demnach regelmäßig größere Mengen an Sediment erforderlich. Für eine nachhaltige Nutzung der vorhandenen Sandressourcen ist lokales und regionales Management erforderlich.

Die aktuellen Planungen zum Sedimentmanagement gehen bis in das Jahr 2036 (Abbildung 11). Die Ostseesturmflut 2023 hat diesen Plan nicht substantiell beeinflusst. Der Vergleich des aktuellen jährlichen Sedimentbedarfes mit den bergrechtlich genehmigten und erkundeten Sedimentvorräten zeigt, dass bei unveränderten Bemessungsansätzen dieses Konzept des Hochwasserschutzes noch für viele Dekaden durchführbar ist. Vor dem Hintergrund des sich beschleunigenden Meeresspiegelanstiegs ist aber mit einem Anstieg der Entnahmemengen zu rechnen. Die Quantifizierung dieses Mehrbedarfes ist Gegenstand aktueller Forschungen. Langfristig wird mit einer Anpassung der Aufspülstrategie zu rechnen sein.

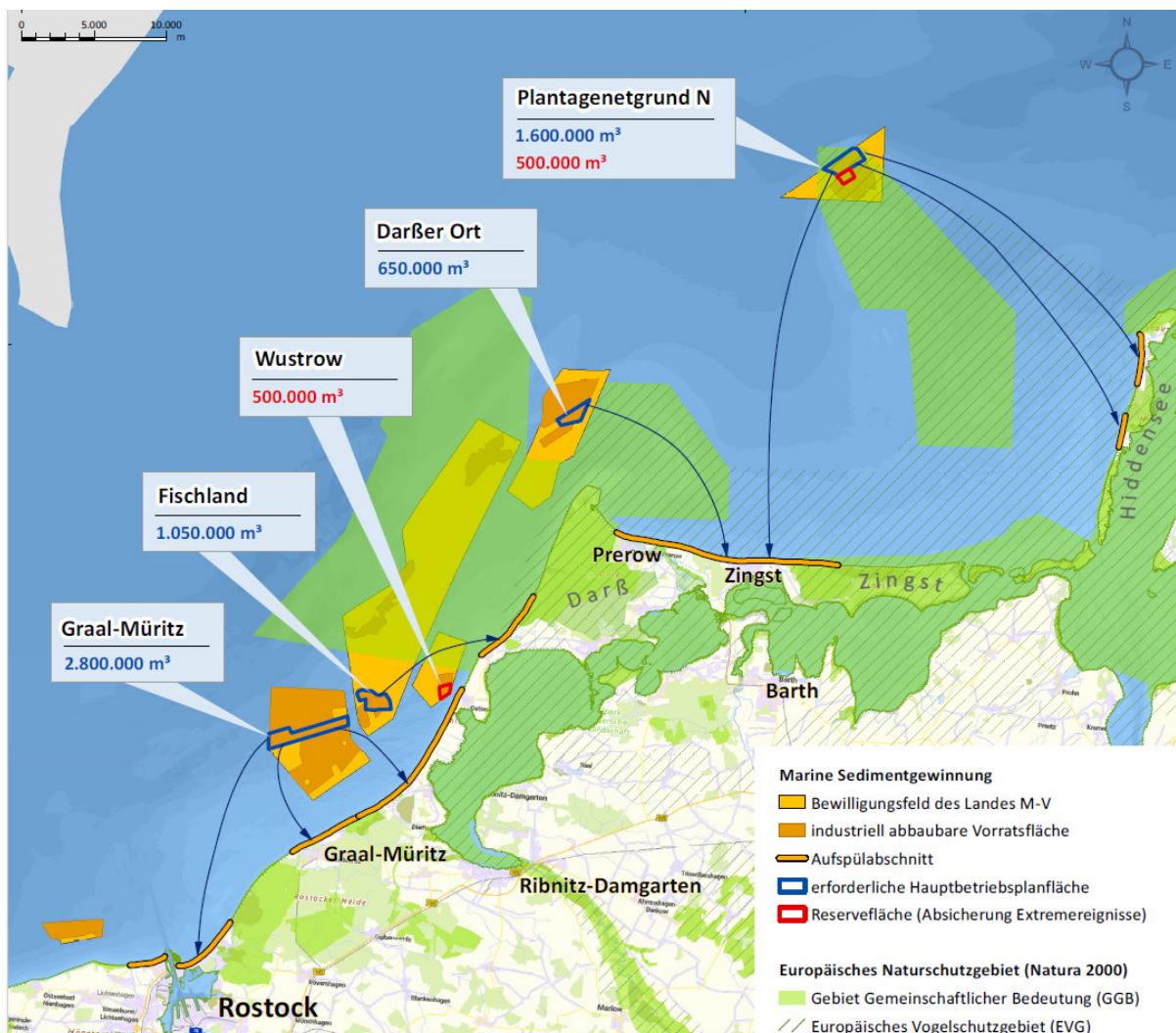


Abbildung 11: Abbauregime auf den Sandentnahmeflächen des Landes Mecklenburg-Vorpommern im Bereich Fischland-Darß-Zingst.

8 Schutz der inneren Küsten

Die lange Verweilzeit der Sturmflut führte dazu, dass es auch an den inneren Küsten erhebliche Wasserstandserhöhungen gegeben hat (Abbildung 5). Dies hat zu einer hydraulischen Belastung der Deiche an den inneren Küsten geführt. Entgegen der in den Medien verbreiteten Informationen ist kein Deich gebrochen. Im Verlauf der Sturmflut gab es eine temporäre Überströmung eines Deiches, der zum Schutz landwirtschaftlicher Nutzflächen

errichtet wurde. Aufgrund dieses Schutzzieles hat der Deich eine geringere Ausbauhöhe als neu errichtete Deiche zum Schutz im Zusammenhang bebauter Gebiete. Zu keinem Zeitpunkt gab es eine Gefährdung von Wohngebäuden und Menschenleben.

Der Fokus der Landesküstenschutzverwaltung von Mecklenburg-Vorpommern lag in den vergangenen Jahrzehnten vor allem auf den Außenküsten. Dies lag unter anderem an dem starken Befall der Buhnen durch die Bohrmuschel *Teredo Navalis* und die damit verbundenen Zerstörungen sowie der Schaffung eines einheitlichen Ausbauzustandes der Hochwasserschutzdünen in Kombination mit Buhnenneubau. Der Schutz der Außenküste gegen Durchbruch im Sturmflutfall ist auch gleichzeitig unerlässlich für den Schutz der inneren Küsten. Nur wenn die äußere Schutzhlinie gehalten wird, bleiben die Einstromquerschnitte in die Bodden und Haffe unverändert. Das gesamte Schutzkonzept entlang der inneren Küsten basiert auf dieser Annahme.

Der nun erreichte gute Ausbauzustand der Schutzanlagen an der Außenküste eröffnet seit einigen Jahren Raum für die Verbesserung des Schutzniveaus an den inneren Küsten von Mecklenburg-Vorpommern. Einige Großprojekte sind bereits in der Umsetzung. Vielerorts werden Maßnahmen geplant und vorbereitet. Die Planungsprozesse entlang der inneren Küsten sind durch die Überlagerung einer Vielzahl von Nutzungen langwierig und komplex. Auch hier wird es letztendlich mit Blick auf die unterschiedlichen flächenbezogenen Interessen und Anforderungen aus Sicht von Naturschutz, Moorschutz, Landwirtschaft, Tourismus und Bebauung Kompromisse und einen zukunftsorientierten, abwägenden Küsten- und Hochwasserschutz geben müssen.

9 Schlussfolgerungen

Die grundsätzliche Strategie des Küsten- und Hochwasserschutzes in Mecklenburg-Vorpommern hat sich während der Sturmflut vom Oktober 2023 bewährt.

Im Bereich von Landesküstenschutzdünen kam es durch die Kombination von hohen Wasserständen und Seegang lokal zu teilweise erheblichen Sandumlagerungen aus dem Dünenkörper in Richtung Strand und Schorre. Basierend auf der Annahme, dass die Düne als Verschleißbauwerk bemessen ist, waren diese weder überraschend noch mit negativen Auswirkungen für das Schutzniveau an der Außenküste.

Langfristig müssen die daraus resultierenden Sedimentdefizite durch Wiederholungsaufspülungen kompensiert werden. Vor dem Hintergrund des steigenden Meeresspiegels ist davon auszugehen, dass sich die zeitlichen Abstände zwischen den Wiederholungsaufspülungen verkürzen werden. In Summe wird also der Bedarf an Sediment steigen. Ob die bisherigen Bemessungsansätze für sturmflutbedingte Dünenerosion auch zukünftig Bestand haben, ist Gegenstand aktueller Forschungen. Auch hier ist mit einem möglichen Mehrbedarf an Sediment zu rechnen. Diese Bedarfe langfristig zu decken ist nur möglich, wenn die Küstenschutzverwaltung die marine Sandengewinnung gegenüber konkurrierenden Nutzungen auch zukünftig durchsetzen kann.

Die lange Verweilzeit der Sturmflut führte dazu, dass es auch an den inneren Küsten erhebliche Wasserstandserhöhungen gegeben hat. Diese sind in ihrem Ausmaß durch die natürlichen Zustromquerschnitte von der offenen See in die inneren Küstengewässer begrenzt. Der steigende Meeresspiegel wird zu einer Zunahme der eingeströmten Wassermenge führen. Dies wird sich auf die Sturmflutganglinien an den inneren Küsten

auswirken. Für die Planung neuer Hochwasserschutzanlagen sind demnach neue Sturmflutganglinien und Bemessungswasserstände abzuleiten. Darüber hinaus sind morphologische Untersuchungen zur Entwicklung der Einstromgebiete erforderlich. So lassen sich bathymetrische Veränderungen erkennen und für die Ableitung neuer Sturmflutkennwerte berücksichtigen.

Capabilities of satellite radar measurements to map large-scale flooding [Satellite flood mapping]

Henriette Sudhans¹

¹ Karlsruhe Institute of Technology, Geophysical Institute, henriette.sudhans@kit.edu

Summary

In October 2023 the German coasts of the Baltic Sea experienced a rare storm flood event. Significant infrastructure damages have been caused directly at the coast and further inland. Furthermore, some of the coastal protection infrastructure did not withstand the water pressure and/or duration of the flood everywhere and failed in parts. As a consequence, some protected low-elevation areas got flooded. There the retreat of water is hampered and they remained flooded even after the Baltic Sea water levels returned to normal. In terms of risk these areas require a different attention than places directly at the coastline, because flooding may be less frequent but of longer duration.

While locally the extent of the flooding has been witnessed and recorded in detail, assembling the big picture in a timely fashion across the landscape is difficult. Space-borne remote sensing can be of service here. In this study I demonstrate the potential of detecting and mapping the flooding of land surface with space-borne synthetic aperture radar images and methods of change detection as well as image segmentation. While for the October 2023 flood, space-borne radar images have only been recorded 18 to 20 hours after the peak of the flood and when the open sea water level had already returned to normal, a large area evidently remained flooded and could be mapped. Among them are several large flooded areas along the shores of the Schlei estuary up-river to the town of Schleswig and much further east between the mainland and the Darß peninsula. Notable is as well that even 12 days later, on November 2, a not negligible part remained flooded.

In this study, I augment the detections of flooding with complementary and open spatial data that provide information on elevation and infrastructure. The methods presented are not new, but show a general applicability and large potential if exploited. With rising sea levels, storm floods will likely occur more often with such severity. At the same time we may expect the means of satellite observations to improve in the future.

Keywords

Storm flood, space-borne Synthetic Aperture Radar, SAR, change detection

Zusammenfassung

Im Oktober 2023 fand eine seltene Sturmflut an der deutschen Ostseeküste statt. Dabei wurden nicht nur direkt an der Küste, sondern auch recht weit im Landesinneren signifikante Schäden verursacht. Einige Schutzdeiche hielten dem Wasserdruk und/oder Dauer des hohen Wasserstandes nicht stand und brachen, weshalb auch tiefliegende Bereiche hinter den Deichen geflutet wurden. In diesen Bereichen hielt die

Überflutung zudem länger an als die Sturmflut selbst, weil der Rückzug des Wassers hier erschwert war. In Bezug auf das Risiko benötigen diese Bereiche daher eine andere Berücksichtigung als die exponierten Gebiete direkt an der Küste.

Die Ausmaße dieser Sturmflut wurden mancherorts direkt beobachtet und detailliert aufgenommen. Eine rasche großräumige Zusammenstellung aller überfluteten Bereiche und der gesamten Überflutungsfläche ist jedoch schwierig. Satellitengestützte Fernerkundung kann hier gute Dienste leisten. In dieser Fallstudie demonstriere ich welches Potential die Detektion und das Kartieren von Überflutungen mit Aufnahmen von synthetischem Apertur Radar (SAR) in Kombination mit Methoden der Veränderungsdetektion und Bildsegmentierung haben. Für die Ostseesturmflut im Oktober 2023 wurden satellitengestützte SAR Aufnahmen erst 18 bis 20 Stunden nach dem Höchststand der Flut gemacht, zu einer Zeit, als der Wasserstand der Ostsee schon auf sein normales Level zurückgefallen war. Trotzdem konnten große Flächen identifiziert werden, die weiterhin überflutet waren. Darunter sind einige Gebiete entlang der Schlei bis hin zur Stadt Schleswig, aber auch weit östlich davon, zwischen der Halbinsel Darß und dem Festland. Bemerkenswert ist weiterhin, dass auch bis 12 Tage danach, am 2. November 2023 und später, viele Bereiche noch überflutet blieben.

In meiner Fallstudie kombiniere ich die Detektionen von Überflutungen mit ergänzenden und frei zugänglichen Raumdaten, zum Beispiel mit hochauflösten Höhenmodellen und Infrastrukturdaten. Die hier präsentierten Methoden sind nicht neu, jedoch gekennzeichnet durch eine allgemeine Anwendbarkeit und ein großes Entwicklungspotential. Letzteres ist auch dadurch gegeben, dass wir mit zunehmenden Möglichkeiten der Satellitenbeobachtung in der Zukunft rechnen können.

Schlagwörter

Sturmflut, satellitengestütztes Synthetische Apertur Radar (SAR), Veränderungsdetektion

1 Introduction

The storm flood of October 2023 arrived on top of an already days-lasting high water level in the Baltic Sea of a few tens of centimeters above average according to a report by the Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH 2023) on the storm flood on October 20, 2023 (Figure 1). At the German Baltic Sea coast this elevated water level ranged between 20 cm and 50 cm. The storm flood started on October 19 with wind directions turning to north-east and east in the central Baltic Sea according to the BSH (2023), which caused the water level to increase by another 130 cm in Kiel till 19:00 UTC (9 pm local time) on October 20. About three hours later another 10 cm higher water levels had been measured in Flensburg. At the coast of Mecklenburg-Western Pomerania the sea level increase reached not much higher than 150 m (Kiesel et al. 2024). Between 20:00 UTC and 23:00 UTC water levels dropped fast all along the German Baltic Sea coast, by about 200 cm within 21 hours at the western coast in Schleswig Holstein and 120 cm at the coast in Mecklenburg-Western Pomerania.

During the October 2023 flood, infrastructures that are naturally exposed to the coast and sea water like harbours have been heavily affected (NDRa 2023). Furthermore also some low-elevation and in principle protected areas were flooded because dykes failed, for instance near Arnis in Schleswig-Holstein (NDRb 2023) and near Wieck a. Darß in Mecklenburg-Western Pomerania (Nordkurier 2023). Special areas are the Geltinger Birk, a historical site of claimed and with dykes protected land, and the wide, lake-like estuary of the

river Schlei in Schleswig-Holstein (Figure 1), which has a narrow entry to the sea near Maasholm. Here, any water in- and outflow may be slowed down. During the October 2023 storm flood the water levels increased similarly fast in Schleswig at the river Schlei compared to measurements at the open water coast, but decreased much slower (NDRc 2023, Figure 1b). In Schleswig, the high water level peaked later at 2.33 m, remained longer and a normal water level was only restored almost a day later than elsewhere (Figure 1b).

For several other low-elevation areas protection dykes had been insufficient and/or failed (NDRa 2023, NDRc 2023, Nordkurier 2023). Also in these cases a high water level remained long after the sea level had dropped back to normal, because either the land surface behind the protection dykes is very low compared to sea level and/or because the outflow is hampered and slow. Mapping these areas efficiently on a large scale helps to assess damages and to organize immediate and long-term mitigation measures.

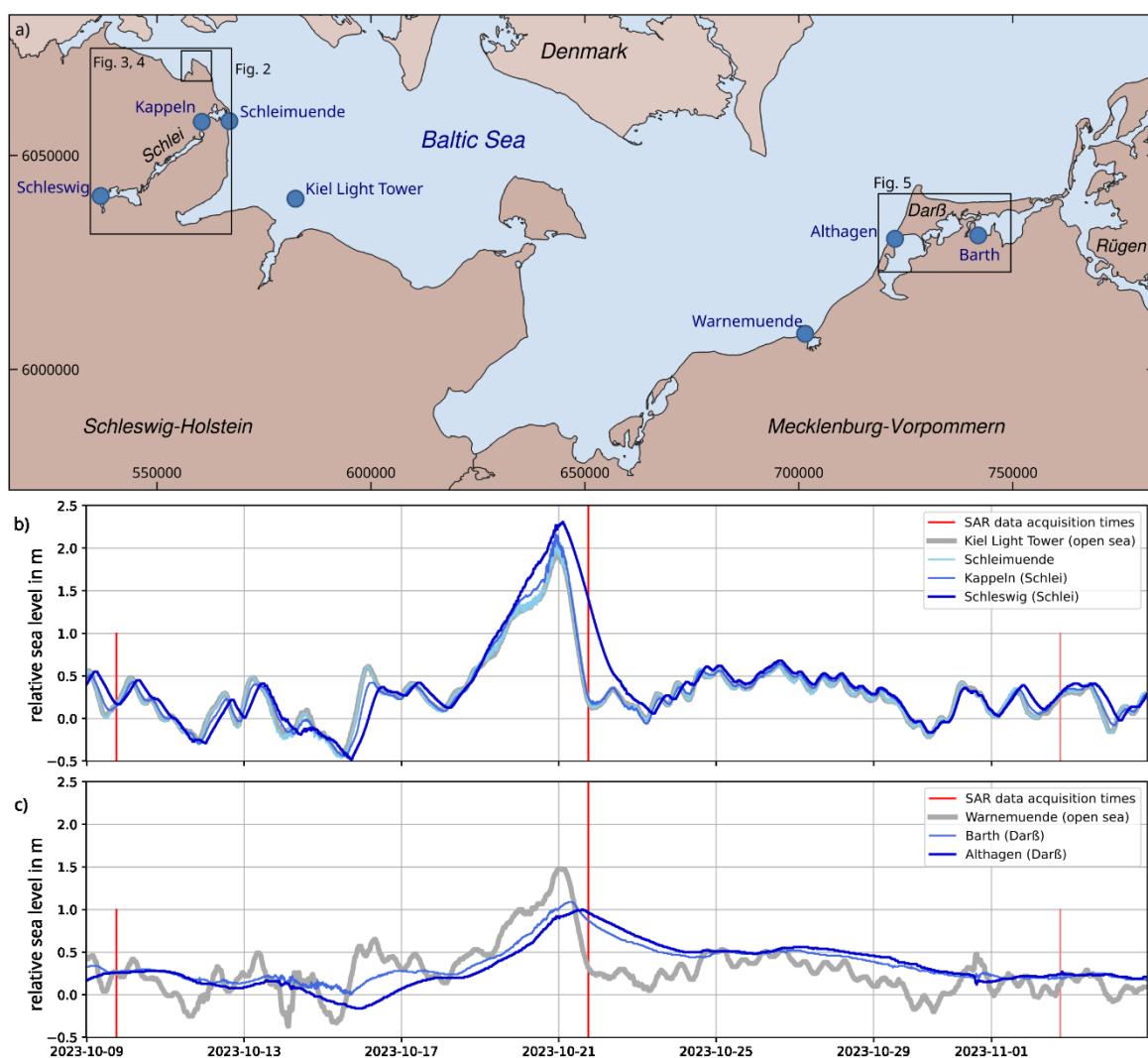


Figure 1: a) Map of the German flood affected coastal areas, b and c) 26 days of water level data before and after the flood (reported by the Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung Germany, WSV) for the coast in (b) Schleswig-Holstein and (c) in Mecklenburg-Western Pomerania. Red vertical lines mark the acquisition dates and times of the used satellite data. Map coordinates are in UTM, zone 32.

Mapping flood affected areas based on remote sensing data has been done since data have been available from satellites (e.g. Choudhury 1989), with an ever increasing spatial resolution. In this study I use data from the Sentinel-1 radar satellite operated by the European Space Agency (ESA) and apply change detection methods to map flooding. Radar waves are not absorbed by the atmosphere nor by cloud cover, which is very relevant for imaging the Earth's surface during all-weather conditions, in particular storms. Sentinel-1 satellites emit pulsed radar waves in C-band (radar wavelength $\lambda=5.6$ cm) and record wave energy that is backscattered from the Earth's surface.

A natural land surface is rough compared to the radar wavelength based on the Rayleigh criterion (Peake and Oliver 1971) and scatters considerable wave energy back to the satellite. Inland areas covered by water generally form smooth surfaces that mostly reflect radar energy away from the satellite and scatter much less back to the satellite. Therefore, over water surfaces, a generally lower backscatter amplitude is observed compared to land surfaces (Figure 2). This contrast in backscatter energy is spatially more stable in cross-polarized images (Tran et al. 2022). These images provide only recordings of backscattered waves that have a 90 degree polarization angle compared to the vertically polarized emitted signals. Only rough surfaces produce significant scattering with polarization changes. In vertically co-polarized images partially flooded areas may lead to an increased backscatter amplitude that makes the interpretation more complex (Manjusree et al, 2012; Tran et al. 2022). I exploit the cross-polarized amplitude difference in images acquired before, during and after the flood to map flooded areas (Figure 2).

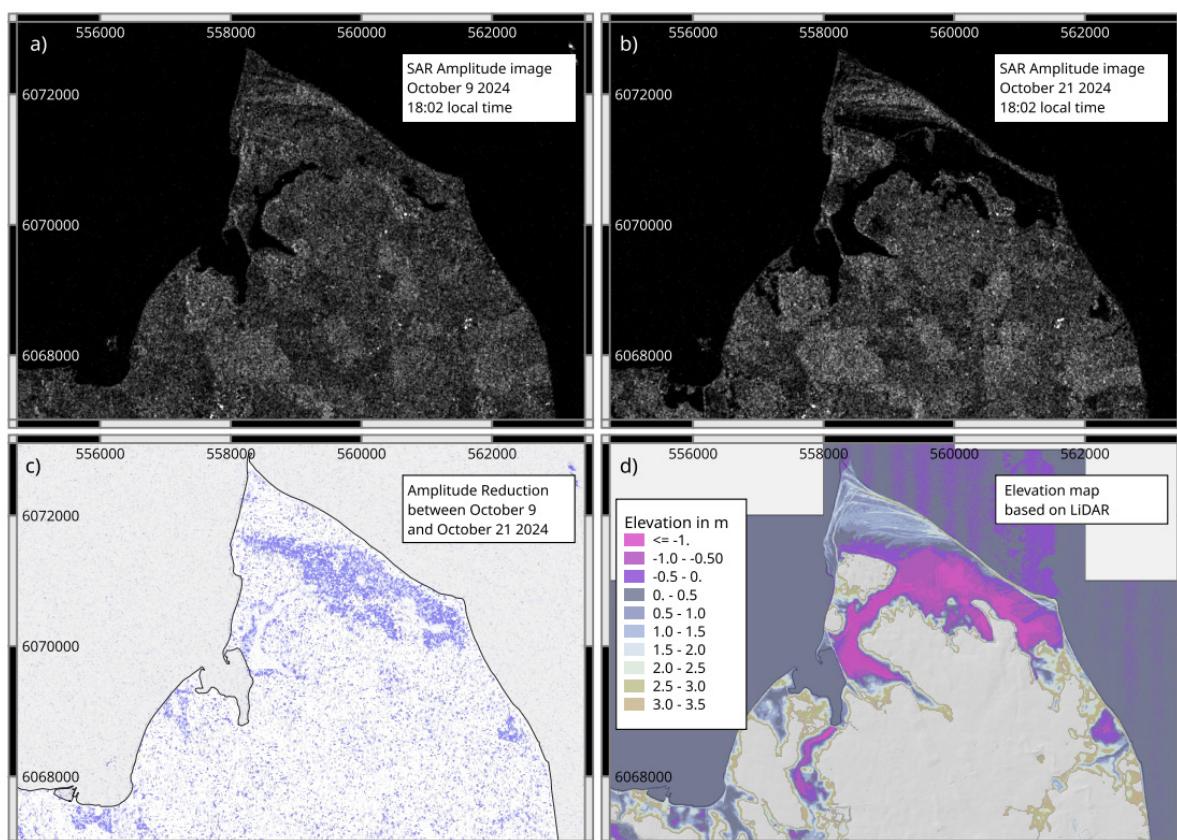


Figure 2: Principle of flood mapping shown for the Geltinger Birk (see Figure 1a). SAR amplitude images shown are acquired a) on October 9 and b) on October 21. c) Amplitude reduction of 30 % and more is shown in blue. d) High-resolution DGM1m elevation map of Schleswig-Holstein. Map coordinates are in UTM, zone 32.

Not always are flooded areas forming smooth water surfaces and not always are temporary water-covered surfaces caused by flooding, but also by rain. In this study I use Digital Elevation models for support in classifying detected change. Furthermore, at the time of the October 2023 storm flood the Sentinel-1 mission was short of one of two satellites, doubling the so-called revisit time between acquisitions of the same viewing geometry to only every 12 days. As an effect, only for a single satellite track suitable acquisitions during the flood event are available. This acquisition took place on Saturday (October 21) between 17:01 UTC and 17:02 UTC (7:01 pm local time), about 21 hours after the peak of the flood on Friday night (October 20) around 20:00 UTC (10 pm local time). At this time, the sea level near the coast had already dropped to a normal water level (Figure 1b and c). Along the Schlei and the water area enclosed by the Darß peninsula and the mainland the water level was still high during this image acquisition. Measured water levels above normal were 1.33 m in Schleswig at the Schlei river, 0.95 m in Althagen on Darß and 0.85 m in Barth (Figure 1). Therefore many areas with remaining flooding could be detected in the SAR images.

2 Data and Methods

I use the Sentinel-1 Level-1 georeferenced (“GRD”) products with a spatial resolution of 8 m in east and 15 m in north direction, provided by ESA via ESA’s Copernicus EO browser. As additional data I use the high-resolution digital elevation models and Open-streetmap & Contributors (OSM) data. The digital elevation models are based on airborne LiDAR (Light Detection and Ranging) and have a 1 m spatial resolution. They are provided by the federal states of Schleswig-Holstein and Mecklenburg-Vorpommern as open geo-data.

To map reduction of backscatter energy caused by flooding I calculate the two differences in the SAR amplitude images for the acquisitions 10 days before the flood (October 9) with the image hours after flood peak time (October 21, 17:02 UTC) and with the image 12 days after the flood event (November 2) (Figure 2). I normalize these two amplitude differences by the amplitudes of the pre-flood image of October 9 2023. Positive differences mark amplitude reductions for the later acquisitions, with an unlikely maximum value of 1, which would mean the backscatter amplitude has been reduced to a perfect zero. Negative values (amplitude increase) are discarded as random or other effects. I also discard small positive values below 0.3, which correspond to an amplitude reduction of only 30 % that could likely be caused by random effects. I found that below this threshold many pixels would be counted in that are situated in open sea areas and show clear random intensity changes. Increasing the threshold reduces the density of flood detections in reportedly flooded areas. Figure 2c shows this intermediate result for the Geltinger Birk. Prominent is a high density of amplitude-reduced pixels in the low elevation areas of the Geltinger Birk (Figure 2d). There are spurious randomly distributed amplitude reductions, spanning one or few pixels over land and over water surfaces. I consider these as spatial noise in the amplitude due to random changes of the backscatter characteristics of the surface and instrument noise at the radar antenna. To reduce this noise I apply a Gaussian-weighted spatial average with the window length of 10 pixels using the Python numpy library (Harris et al. 2020). As a consequence, I loose resolution and may miss very small-scale flooding, but I achieve a much clearer imaging.

In a next step I remove amplitude reductions or flooding detections that occurred on land with an elevation higher than the maximum level observed by tide gauges, which were at a 2.33 m in Schleswig and 1 m for the Bodden area at Darß peninsula (Figure 1). Any detections from an elevation of 2.33 m and higher can be regarded as rain water-covered meadows and/or farmland or alternatively been altered by a farming procedure to a significantly smoother surface between the radar image acquisitions. I remove spurious detections over normally water-covered areas as well. For these steps I apply standard tools of the open-source QGIS project and skimage python toolbox (Van der Walt 2014).

To map the land areas still flooded 12 days after the flood peak, I repeat the same steps of image processing described before with the SAR images acquired on October 21 and November, with one difference. Areas that were flooded during the image acquisition on October 21 and which remain flooded till the next image acquisition on November 2 show a similarly low backscatter intensity in both images. Areas that dried in between the acquisitions show an intensity increase of backscatter. Therefore the detection runs on positive change values.

Since flooding of areas within settlements or otherwise developed areas with valuable infrastructure is of particular interest, I augment the flood detections with elevation data and open spatial data, in particular OSM data. Combining both these data sets, I can determine how much of a residential neighbourhood or otherwise build-up area or forest covered land is situated at low elevation and therefore possibly exposed to flooding, but not easily detected as such by using change detection in SAR images. Additionally, if flooding is detected near a build-up area that is situated below the previously determined water level, streets are likely flooded as well, while not detected as explained above. Therefore, I mark low-elevation areas simply by clipping the digital elevation data at the determined water level and the shoreline. Then I apply the image segmentation method of water-leveling to separate and mark low-elevation areas that are spatially connected. For both techniques I employ tools of the Python skimage toolbox. To determine which low-elevation areas are actually connected the high resolution of the elevation models is required. This is because these areas are often protected with a network or cascade of dykes, build to prevent large scale flooding. If flooding is detected within such a connected low-elevation, it very likely affects the entire depression. Possible blind spots of the detection method are discovered in this way. Here, I restrict the marking of connected low-ground areas to areas with significant coverage of at least 10000 m² (the area of about 90 connected pixels and more) for clarity in the illustration.

3 Detected flooded areas

The flood detections based on SAR images reveal all heavily affected areas covered in media reports. Furthermore, based on the flood detections and the elevation models, I can visually estimate the water level for the Schlei estuary at 17:02 o'clock UTC on October 21 to be still about 1.2 m higher than normal. Tide gauge data in Schleswig measured a water level of 1.33 m above normal for that time, while closer to the open sea, in Kappeln, the data show already a close to normal water level (Figure 1b). As a consequence, areas with a lower elevation and not protected by dykes remained flooded, also 20 hours after the flood peak (Figure 3a). There is extended flooding along the Schlei river. Mostly, the flooding affects meadows and farmland. Settlements most often are situated at high enough

elevation to not be affected by storm floods of the 2023 category. Still, significant flooding is detected near the towns Arnis and Schleswig (Figure 3b, c), which reaches very close to buildings. On November 2 2023, 13 days after the peak of the flood, some areas are still flooded, including the protected low-elevation area on the Geltinger Birk as well as close to Arnis (Figure 4a).

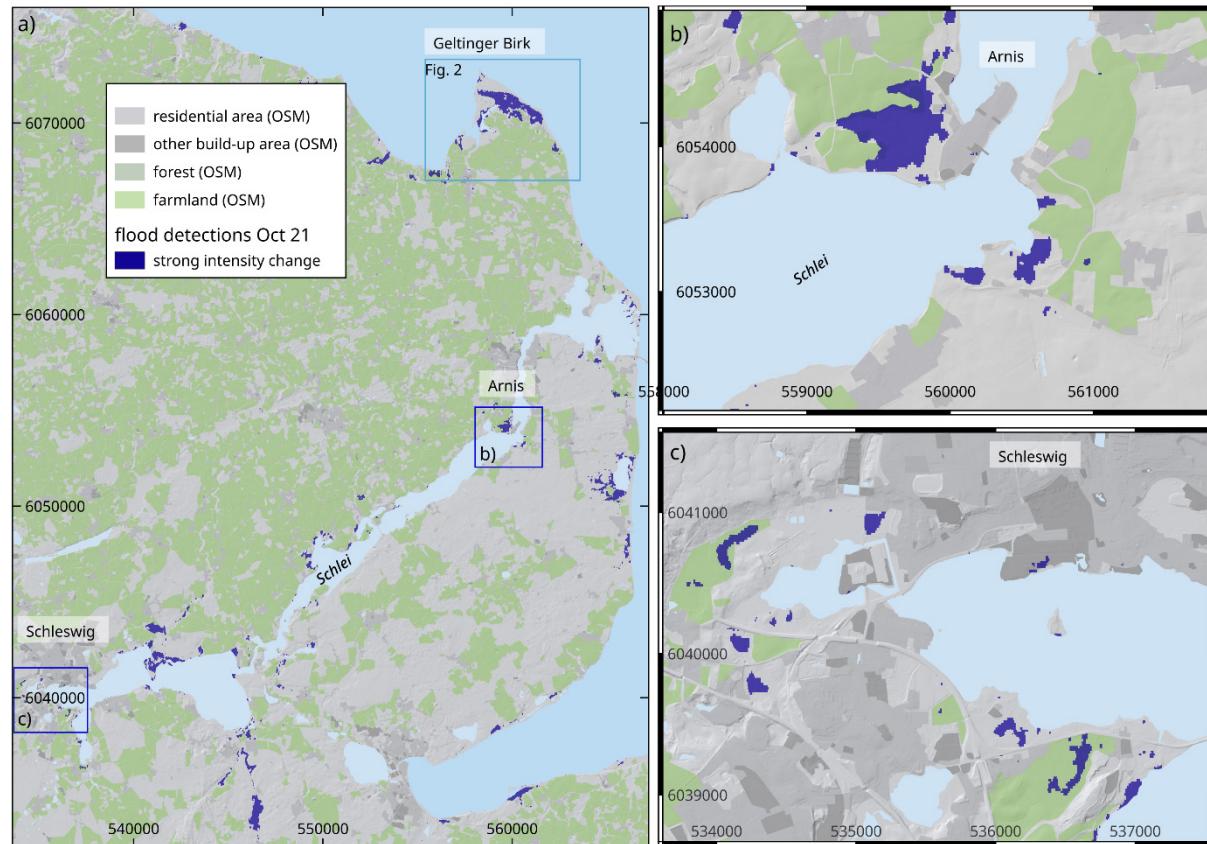


Figure 3: a) Flood detections at the river Schlei on October 21 in 2023 at 17:01 UTC, with a focus on the towns of b) Arnis and c) Schleswig where detected flooding is threateningly close to buildings. a) The light blue box marks the location of the Geltinger Birk shown in Figure 2 and the dark blue boxes mark the regional location of b) Arnis and c) Schleswig. Map coordinates are in UTM, zone 32.

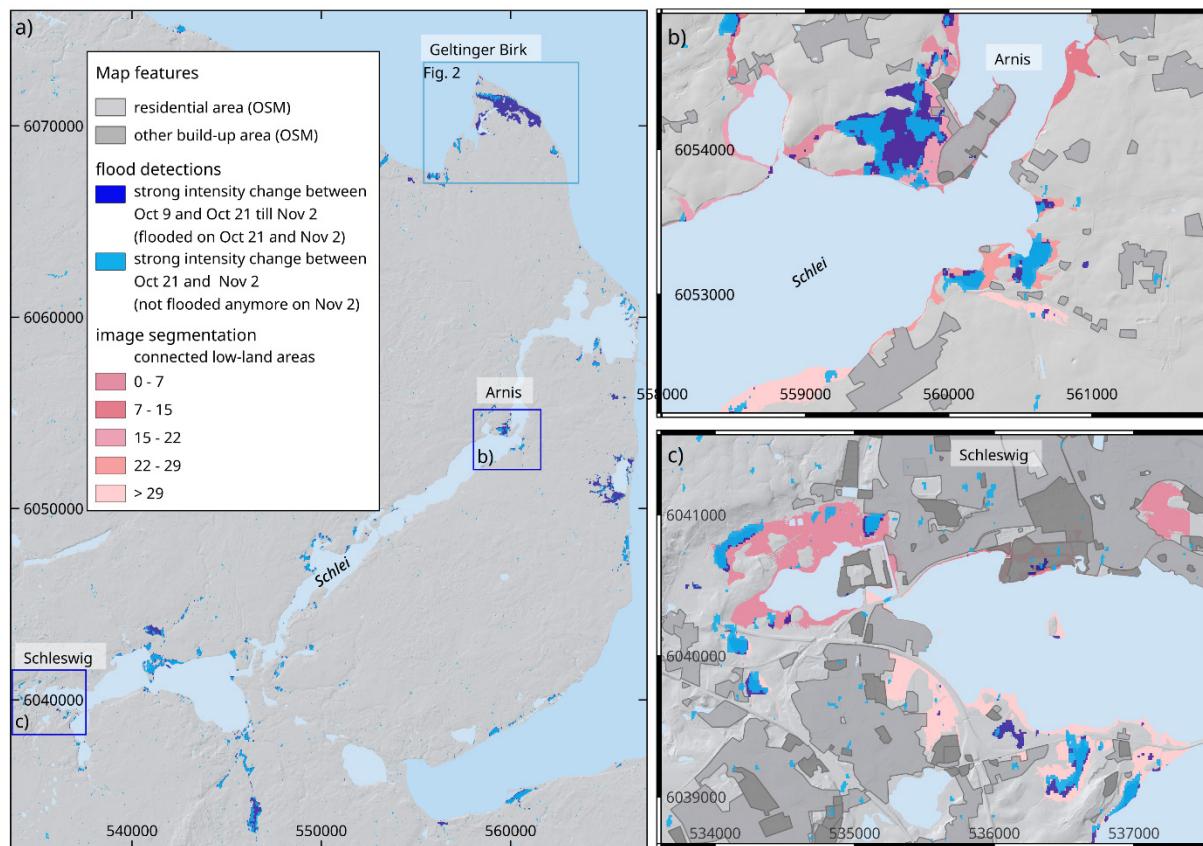


Figure 4: a) Flood detections including November 2 2023 17:01 UTC at the river Schlei, light blue colors depict flooded areas where water withdrew till November 2. b) and c) show close-ups and the results of image segmentation in light red colors near b) Arnis and c) Schleswig. Different light red colors mark individual connected low-elevation areas. Map coordinates are in UTM, zone 32.

At the Darß peninsula the water level between the peninsula and the mainland, the rather confined Bodden area, still reached a 0.9 m level above normal at the observation time 17:01 UTC, which is shown in tide gauge data (Figure 1c). Also here severe flooding is detected (Figure 5a). High water level threatened the village Wieck a. Darß (Figure 5b), where a dyke failed to protect the low land in one place because of a dyke breach and in another place due to overflowing (Nordkurier 2023). Furthermore, the wetland Große Kirr was entirely submerged at the observation time and in the western part of the Darß peninsula only a narrow dam remained above water connecting the peninsula to the mainland (Figure 5a). These flooding observations are consistent with the measured maximum water level and the water level at image acquisition time.

In Arnis, in Schleswig and in Wieck a. Darß residential buildings have been threatened by the storm flood. Based on the mapping made here, flooding of residential areas is very likely in Arnis and Schleswig. I demonstrate this by finding connected low-elevation areas. A large detected flooded area west of Arnis is situated in a larger vegetated depression below an elevation of 1.2 m, the estimated water level at observation time, into which some of the residential area is reaching (Figure 4b). Similarly, two patches of detected flooded area west of Schleswig are situated in the same, partly forested depression between the Tiergarten north of it and the Burgsee to the south (Figure 3c, Figure 4c). Likely, this depression was entirely flooded, but the radar backscatter remained high where the vegetation stands higher than the water level. A western, near-shore residential area of Schleswig is reaching into this depression, making a flooding of these parts of the town, based on this

method, very likely, too. Indeed, for Arnis and Schleswig flooding had been reported for the described areas during the peak time of the flood (NDRd 2023, NDRe 2023). Based on the detections here, it is likely that the water was still covering build-up ground at these two locations on the evening of October 21.

On Darß, near the western end of the village of Wieck a. Darß, a dyke failed to protect farmland from flooding due to one dyke breach and one part overflowing (Nordkurier 2023, NDR 2023). This flooding is well detected with the SAR change detection. The residential area does not reach below 0.9 m of estimated water level at the time of the observation and no damage in the village Wieck was reported. However, the detected area of flooding at this location is very likely strongly underestimated because the flooded farmland is bordered by an equally low-lying forested ground (Figure 5a, b). It is notable that the high resolution elevation model shows for the main dyke near Wieck tens of decimeter height undulations of the dyke crest, which appear to remain below 1 m in many parts and to get as low as 80 cm at the position of overflowing that is visible in media coverage (e.g. NDR 2023). The farmland flooding close to Wieck a. Darß withdrew till November 2 almost entirely. In contrast to that a similarly dyke-protected farmland area south of Wieck remains flooded till that day and likely longer.

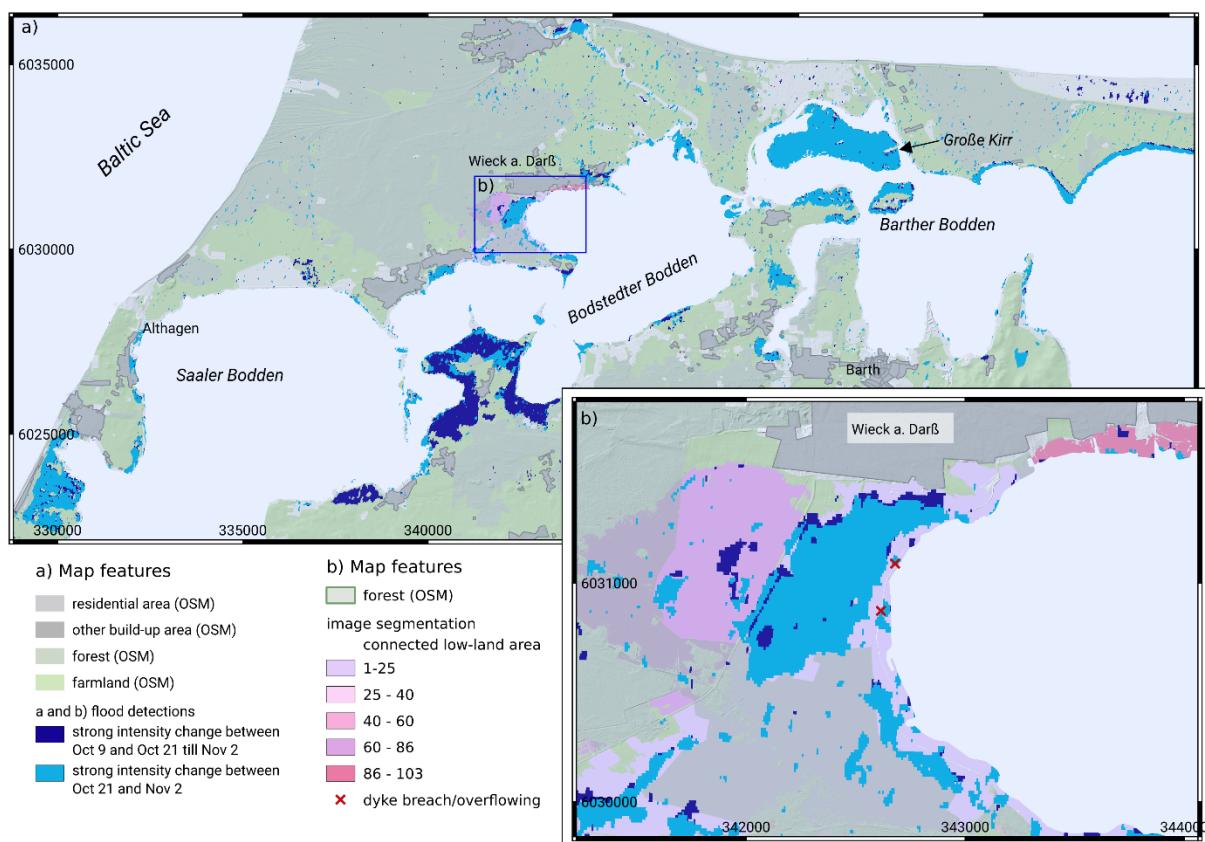


Figure 5: a) Flood detections on the Darß peninsula with a focus on b) the village of Wieck a. Darß. For location see blue box in a). b) shows the results of image segmentation in light red colors near Wieck. Different colors mark individual connected low-elevation areas. Map coordinates are in UTM, zone 33.

4 Discussion and Conclusion

Most critical for the here demonstrated assessment of damage through flooding are the restrictions in timing of the openly available SAR observations. The acquisition times are relatively sparse and can rarely be influenced in reaction to emergencies. The Sentinel-1 mission is a multi-purpose mission and mostly follows a strict space mission schedule for reliability. Further requirements that decrease flexibility in schedule stem from the satellite mission requirements of a sun-synchronous, low-earth orbit that realizes a global coverage. As a result, the acquisition times are mostly not optimal and revisit frequency is low for very dynamic processes as floods. It is only by chance therefore, that an acquisition takes place during or close to the peak time of a flood. For the October 2023 storm flood, a change detection based on SAR images became only possible 18 to 20 hours after the peak of the flood. This rather late observation was still timely compared to an effective revisit frequency of 3 days and therefore a rather lucky event. However, mapping lasting flooding is of importance, because damage is found to increase with long-term exposure to (salt) water for infrastructure and farmland (e.g. Kreibich & Dimitrova, 2010; Lazzarin et al., 2022). Additionally, these flood detections allow for the estimation of local water levels, where no direct measurements have been made.

The number of missions with space-borne SAR imaging has vastly increased in the last decade. One may hope for the trend towards an open-data policy by space agencies to continue. For instance the US Space Agency NASA plans launching an open-data SAR mission already in 2025, the NISAR mission, and ESA has just replaced the broken Sentinel-1B satellite in December 2024 by Sentinel-1C. Since 2025, the nominal revisit period of Sentinel-1 over Europe is therefore back to 6 days compared to the 12 days revisit in October 2023. Also very relevant in the context of emergency response are satellite data of the increasing number of missions with restricted data and commercial missions. For both, data are regularly made available, and acquisitions are even tasked in support of emergency response.

A further limitation of the presented flood detection method is that it fails for some surface coverage, e.g. for forests and build-up areas, as demonstrated. The presented very direct approach of change detection in radar image amplitudes may fail to show even significant flooding when not all objects on the ground become completely submerged. Then the required smooth surface is not realized (Amitrano et al. 2024). For example, in flooded forests trees will still be mostly above ground and the negative effect on the radar wave backscatter could be negligible. Similarly in settlements and build-up areas, where the associated risk of a flood is particularly high, the change in backscatter may be small. In these cases the described method has blind spots and false negatives in detection will occur (Amitrano et al. 2024). False positive detections can occur as well. In the days and weeks before the October 2023 Baltic Sea storm flood, high precipitation put several fields under water. False positives in flood detection can be discovered as such by taking into account complementary data, first of all elevation models. For instance, elevation models reveal whether a detection shows flooding for relatively high elevation, which points to rain-inflicted flooding. In a more detailed analysis than presented here, the additional processing of the co-polarized VV backscatter component of Sentinel-1 data could be used, which may allow to identify partially flooded land through an increase of backscatter due to effective double-bounce effect (Manjusree et al 2012, Tran et al. 2022).

Augmenting the change detections with complementary data helps to mitigate the amount of missing detections. Therefore, the presented flood detection method based on space-borne SAR imagery has a high potential to gain a large-scale spatial overview over flood-affected areas. The method is in principle easy and easy to implement, not least of all because the data sets used here are open data. Many analyses, like the image segmentation I presented, can be done beforehand and stored to be directly used in a fast and high-quality response to an emergency.

5 References

- Amitrano, D.; Di Martino, G.; Di Simone, A.; Imperatore, P.: Flood detection with SAR: A review of techniques and datasets. In: *Remote Sensing*, 16, 4, 2024.
- Bundesamt für Schifffahrt und Hydrographie: Report on the storm flood on October 20, 2023, by the Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/_Anlagen/Downloads/Ostsee_Sturmflut_20231020.pdf?__blob=publicationFile&v=2 accessed 2025-05-26.
- Choudhury, B. J.: Monitoring global land surface using Nimbus-7 37 GHz data Theory and examples. In: *International Journal of Remote Sensing*, 10(10), 1579–1605, <https://doi.org/10.1080/01431168908903993>, 1989.
- ESA Copernicus EO browser: <https://browser.dataspace.copernicus.eu>.
- Flanders Marine Institute Report: Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC): Sea level station monitoring facility, <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org> accessed 2024-09-25, <https://doi.org/10.14284/482>, 2024.
- Geodaten DGM1 of Mecklenburg-Vorpommern: <https://laiv.geodaten-mv.de/afgvk/Geotopographie/Download?produkt=DGM1>, accessed in 2024.
- Geodaten DGM1 of Schleswig Holstein: <https://geodaten.schleswig-holstein.de/gaialight-sh>, accessed in 2023.
- Harris, C. R.; Millman, K. J.; van der Walt, S. J. et al.: Array programming with NumPy. In: *Nature* 585, 357–362, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>, 2020.
- Kreibich, H.; Dimitrova, B.: Assessment of damages caused by different flood types. In: *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 133, 3-11, <https://doi.org/10.2495/FRIAR100011>, 2010.
- Lazzarin, T.; Viero, D. P.; Molinari, D.; Ballio, F.; Defina, A.: A new framework for flood damage assessment considering the within-event time evolution of hazard, exposure, and vulnerability. In: *Journal of Hydrology*, 615, 128687, 2022.
- Manjusree, P.; Prasanna Kumar, L.; Bhatt, C. M.; Rao, G. S.; Bhanumurthy, V.: Optimization of threshold ranges for rapid flood inundation mapping by evaluating backscatter profiles of high incidence angle SAR images. In: *International Journal of Disaster Risk Science*, 3, 113-122, <https://doi.org/10.1007/s13753-012-0011-5>, 2012.

NDRa: Bilder von der Ostsee-Sturmflut: So sieht es am Sonnabend aus, https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/sturmflut1790_backId-sturmflut-helper100.html#content accessed 2025-05-26.

NDRb: Nach Sturmflut an Ostseeküste: Große Schäden, Aufräumarbeiten laufen accessed at <https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Nach-Sturmflut-an-Ostseeku-este-Grosse-Schaeden-Aufraeumarbeiten-starten,sturmflutostsee106.html>, accessed 2025-05-26.

NDRc: Ostsee-Sturmflut: Geltinger Birk noch immer unter Wasser, accessed at <https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Ostsee-Sturmflut-Geltinger-Birk-noch-immer-unter-Wasser,geltingerbirk148.html>, accessed 2025-05-26.

NDRd: Ostsee-Sturmflut: Aufräumen in Arnis, accessed at https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/arnis202_backId-arnis198.html#content, accessed 26-05-26.

NDRe: Bilder von der Ostsee-Sturmflut: So sah es in Schleswig-Holstein aus, accessed at <https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Ostsee-Sturmflut-So-sieht-es-in-Schleswig-Holstein-aus,sturmflut1588.html>, accessed 2025-05-26.

Nordkurier: Deichbruch auf dem Darß – Wasser bedroht 75 Wohnhäuser, accessed at <https://www.nordkurier.de/regional/mecklenburg-vorpommern/deichbruch-auf-dem-darss-wasser-bedroht-wohnhaeuser-1993420>, accessed 2025-05-26.

Openstreetmap, © OpenStreetMap contributors.

Peake, W. H.; Oliver, T. L.: The response of terrestrial surfaces at microwave frequencies, Defense Technical Information Center, 1971.

QGIS Development Team (2024). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.

Tran, K. H.; Menenti, M.; Jia, L.: Surface water mapping and flood monitoring in the Mekong Delta using sentinel-1 SAR time series and Otsu threshold, In: Remote Sensing, 14(22), 5721, <https://doi.org/10.3390/rs14225721>, 2022.

Van der Walt, S.; Schönberger, J. L.; Nunez-Iglesias, J.; Boulogne, F.; Warner, J. D.; Yager, N.; Yu, T.: scikit-image: image processing in Python. In: PeerJ, 2, e453, <https://doi.org/10.7717/peerj.453>, 2014.

WSA: short message on the storm flood on October 20, 2023: https://www.wsa-ostsee.wsv.de/Webs/WSA/Ostsee/DE/SharedDocs/Kurzmeldungen/2023_11_28_Sturmflut_Oktober_2023.html.

Seismic monitoring of the October 2023 storm surge along the coast of the Baltic Sea

Lars Wiesenber¹, Christian Weidle², Knut Krämer², Christoph Pilger³, Christian Winter² and Thomas Meier²

¹ Institute of Geoscience, Christian-Albrechts-University Kiel, Kiel, Germany;
lars.wiesenber@ifg.uni-kiel.de

² Institute of Geoscience, Christian-Albrechts-University Kiel, Kiel,

³ Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Hanover, Germany

Summary

The coupling between ocean and seismic waves – often referred to as (oceanic) microseism – is a well-established concept since the 1950's. Ocean and seismic waves are correlating not only on seasonal to annual, but also on daily timescales, in particular during extreme weather events. The most prominent microseism signals have periods below ten seconds and originate from interfering water waves. They are called secondary microseism and can be related to marine storm activity. While some secondary microseism may arrive from far-away coastal regions, a strong contribution also results from nearby coastal wave activity. This paper shows that measurements of microseism from our recently expended seismic network in northern Germany are well suited to monitor wave propagation processes in coastal areas during extreme weather events like the October 2023 storm surge. We utilize three component seismic data from seven stations along the German Baltic Sea coastline and infrasound data from the local array Kühlungsborn (IKUDE) to investigate secondary microseism and atmospheric pressure variations during the storm surge. Spectral investigations over time show distinct local differences in secondary microseism of the Baltic Sea at three different near coastal sites which correlate with half the peak wave period in each respective area. Infrasound measurements reveal additional noise sources, such as nearby wind parks, anthropogenic sources or microbaroms in the North Atlantic and probably the North Sea which are transferred through the atmosphere and absent in seismic data and vice versa. Therefore, sources of our seismic measurements during the October 2023 storm surge are related rather to ocean generated microseism, transferred through the solid Earth than to atmospheric pressure sources. As amplitudes related to secondary microseism of the Baltic Sea decrease with increasing distance of the station to the coast, this allows for an estimation of a sensitivity range along the Baltic Sea coastline. For seismic monitoring of coastal areas, seismic stations are needed to be within 25–30 km distance to the coastline to precisely detect locally generated microseism.

Keywords

storm surge, Baltic Sea, seismic monitoring, ocean generated microseism, infrasound

Zusammenfassung

Seismische Wellen, die durch die Interaktion von Ozeanwellen mit dem Meeresboden erzeugt werden, bezeichnet man als Meeresmikroseismik. Erste Untersuchungen gehen auf die 1950er Jahre zurück. Ozeanwellen und seismische Wellen korrelieren nicht nur auf saisonaler oder jährlicher Skala, sondern auch auf täglichen Zeitskalen, insbesondere während Extremwetterereignissen. Die stärksten Signale werden bei Perioden kleiner als zehn Sekunden erzeugt und entstehen durch turbulente Wellenbewegung. Sie werden als sekundäre Meeresmikroseismik bezeichnet und häufig mit maritimer Sturmaktivität in Verbindung gebracht. Sekundäre Meeresmikroseismik kann im offenen Ozean durch interferierende Wellen oder in Küstennähe entstehen. In dieser Arbeit zeigen wir, dass unser erweitertes Netzwerk an seismischen Stationen in Norddeutschland geeignet ist, um lokale Wasserwellenbewegung in Küstennähe während Extremwetterereignissen, wie z. B. der Ostseesturmflut im Oktober 2023 mittels Meeresmikroseismik zu überwachen. Dazu benutzen wir Daten von sieben 3-Komponenten Breitbandseismometern an verschiedenen Standorten der deutschen Ostseeküste, sowie Daten von Infraschallstationen in Kühlungsborn (IKUDE) um sekundäre Meeresmikroseismik und atmosphärische Druckschwankungen während der Sturmflut zu untersuchen. Die seismischen Daten zeigen deutliche Unterschiede bei Signalen im Periodenbereich sekundärer Meeresmikroseismik an drei küstennahen Standorten entlang der Ostseeküste. Diese korrelieren mit der halben maximalen Wellenperiode, die lokal an den jeweiligen Standorten in unmittelbarer Küstennähe gemessen wurde. Die Infraschall-Daten zeigen zusätzliche Rauschquellen, wie z. B. durch nahegelegene Windparks, anthropogene Einflüsse oder Mikrobarome aus dem Nordatlantik und möglicherweise aus der Nordsee, die über die Atmosphäre übertragen und nicht in den seismischen Daten erkennbar sind und umgekehrt. Dementsprechend können wir die seismischen Signale, die während der Ostseesturmflut im Oktober 2023 gemessen wurden auf Meeresmikroseismik, die über die feste Erde und nicht über die Atmosphäre übertragen wurden, zurückführen. Die gemessenen Amplituden sekundärer Meeresmikroseismik der Ostsee nimmt zudem mit zunehmender Entfernung zur Küste ab. Diese Abnahme können wir nutzen, um einen Einflussbereich zu bestimmen, in welchem lokal generierte Meeresmikroseismik erzeugt wird. Um eine seismische Überwachung von Küstengebieten in der Ostsee zu gewährleisten und Meeresmikroseismik zu messen, sollten Seismometer keine größere Entfernung als 25 bis 30 km zur Küste besitzen.

Schlagwörter

Sturmflut, Ostsee, Seismische Überwachung, Meeresmikroseismik, Infraschall

1 Introduction

From 19th to 21st October, 2023, an exceptional storm surge in the western Baltic Sea affected many parts of the German and Danish coastal areas. The storm was driven by easterly winds resulting from the difference in air pressure between a high-pressure system over Scandinavia and a low-pressure system over the British Isles. While the water was pushed away from the coasts of the North Sea, a severe storm surge affected the western Baltic Sea coast lines. Maximum (sustained) wind speeds of 33 m/s (10 Bft) were measured in Flensburg. Already on the day before the actual storm surge, high wind speeds of 9–10 Bft were measured at the sites of Kiel and Kap Arkona/Rügen (Figure 1a). Both measuring stations stopped operating due to the storm surge in the evening of 20th October (Figure 1a). The storm surge affected mostly the coastal areas of Schleswig Holstein and southern Denmark, where it led to flooding in major cities like Flensburg, Schleswig and Eckernförde.

Peak sea levels of 2.27 m above average were reached in Flensburg, whereas maximum values of 1.95 m above average were measured in the Bay of Kiel and 1.63 m above average in the Bay of Mecklenburg (Figure 1b) (BSH 2024). The water levels in the Bays of Kiel and Lübeck were already up to 50 cm above average sea level days before the storm surge (BSH 2024).

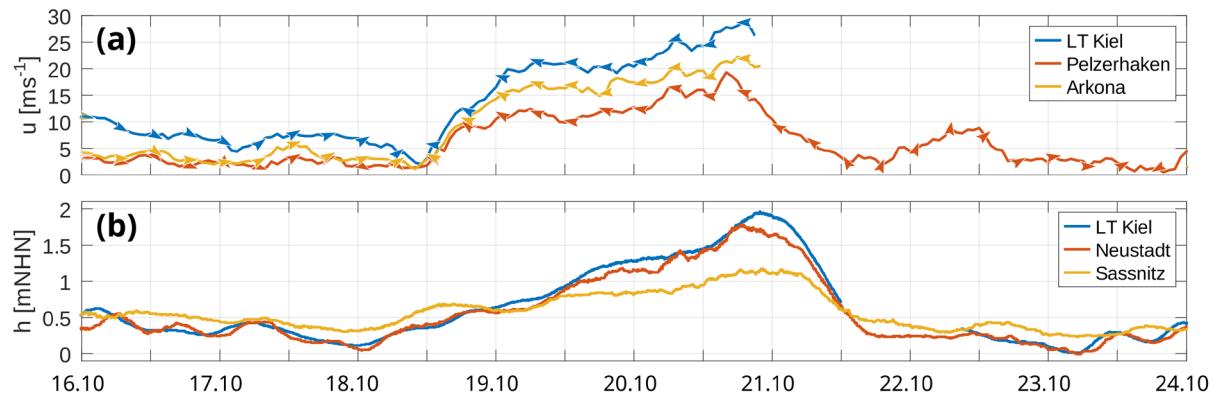


Figure 1: Wind speed and -direction (a) and sea level elevation (b) during the time of the October 2023 storm surge at the lighthouse Kiel (LT Kiel), Pelzerhaken and Neustadt in the Bay of Lübeck and on the island of Rügen (Arkona, Sassnitz). Datasets are obtained from the Federal Waterways and Shipping Agency (WSV) and the German Weather Service (DWD). For more information see data availability statement.

Due to enhanced wind speeds and ocean wave parameters such as significant wave height and peak wave period, the October 2023 storm surge provides an opportunity to investigate seismic waves that are locally generated in the Baltic Sea and vary along the German coast lines. These seismic waves are called ocean generated microseism. In this contribution, we introduce the recently expanded permanent seismic network in Schleswig Holstein and Mecklenburg-Western Pomerania and demonstrate its potential for local microseism monitoring. Continuous seismic data from stations in coastal regions will be analyzed for spectral variations over time. By covering a broad period range, our findings are not limited to microseism in the Baltic Sea, but will also show imprints from other seas and oceans, such as the North Sea and the North Atlantic. We validate the robustness of our seismic observations by comparing them with measurements of acoustic waves in the atmosphere – so called infrasound and demonstrate the advantages and benefits of the permanent seismic network along the German coastal area of the Baltic Sea.

1.1 Microseism

The spectrum of global ambient seismic noise is dominated by two peaks at periods between 1–30 s. In general, they originate from the interaction of sea surface waves with the solid Earth at the sea floor and are referred to as ocean generated microseism. The first peak, called primary microseism, has its maximum at periods of 14–16 s, which is the same period as surface gravity waves in the North Atlantic. The second peak is typically larger in amplitude than the first one and is centred at a period of around 7–10 s which is half the period of surface gravity waves and therefore called secondary microseism. Ocean microseism was already observed more than 100 years ago (e.g. Bertelli 1872, Omori 1899, Wiechert 1904). However, while a general connection between storm activity and ocean

generated microseism was quickly established (Wiechert 1904, Zöppritz 1908) and seismic recordings were even used to forecast the arrival of storm systems in the North Atlantic (Deacon 1947) or the Indian Ocean (Davy et al. 2014), the details of microseism generation (e.g. sea surface wave fields, water currents, wind speed, bathymetry or lithology) are still not completely understood. Contemporary investigations of microseism range from global scale in ocean basins (Essen et al. 2003, Ardhuin et al. 2011, Ardhuin et al. 2012, Ardhuin et al. 2016) to local scales in marginal seas, such as the North Sea and Baltic Sea (Becker et al. 2020, Lepore and Grad 2018), investigations of local storm events, e.g. in the Mediterranean Sea (e.g. Ferretti et al. 2018, Cutroneo et al. 2021) or source locations of ocean generated microseism (Moschella et al. 2020).

Primary microseism is caused by shoaling of ocean waves (Ardhuin et al. 2015) and its generation region is therefore usually in near coastal areas or shallow water regions. The amplitudes are distinctly smaller than those of secondary microseism. However, due to their large wavelength, they are globally measurable. Secondary microseism is caused by superposition of ocean waves of nearly opposing directions and equal frequency (e.g. Longuet-Higgins 1950, Ardhuin et al. 2015) which causes pressure fluctuations in the water column. Source regions of secondary microseism are near coastal regions due to reflections of incoming ocean waves at the shore (e.g. Bromirski and Duennebier 2002) and in open (deep) water locations (Longuet-Higgins 1950). Due to their different generation mechanisms, primary microseism has a larger horizontal component of displacement, whereas secondary microseism is dominant on the vertical component (Juretzek and Hadzioannou 2016). Ocean wave periods are mainly controlled by wind speed and the fetch length, the length of uniform wind direction, not limited by land masses (Bretschneider 1959, Pierson Jr and Moskowitz 1964). Periods are generally lower in marginal seas like the North Sea or Baltic Sea due to their lower fetch length. Reference values of dominant periods for the North Sea are 8–10 s for primary microseism and 4–5 s for secondary microseism (e.g. Becker et al. 2020). In the Baltic Sea, dominant periods of microseism are even lower, ranging between 5–6 s for primary and < 3 s for secondary microseism (e.g. Lepore and Grad 2018). Moreover, microseism generation varies spatially on local scale in coastal regions, depending on different source mechanisms or structural influences (e.g. Juretzek and Hadzioannou 2016).

1.2 Network and Datasets

Northern Germany is in general a rather weak seismicity region with low level of exposure to seismic hazard. Therefore, seismic monitoring had low priorities in the past. However, low to moderate magnitude earthquakes occasionally occur in the North German Basin. The main reasons for natural seismic events are post glacial relaxation, salt tectonics and NE-SW directed compressional stresses in the vicinity of the Trans-European-Suture-Zone (e.g. Leydecker 2011). In cooperation with the Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), the Geological Survey of Schleswig-Holstein (LfU SH), the Geological Survey of Mecklenburg Western Pomerania (LUNG M-V) and the German Research Centre for Geosciences (GFZ), the number of permanent broadband stations in the North German Federal States of Schleswig Holstein and Mecklenburg Western Pomerania was increased from formerly four stations in 2013 to currently 16 (Figure 2a; e.g. Stammler et al. 2021). The regional network is supplemented by dense local seismic networks in focus

areas, such as the salt dome in Bad Segeberg (Figure 2c) or in marginal seas on the islands of Heligoland (Figure 2b) and Rügen (Figure 2e). In total, continuous seismic waveform data are collected in realtime from currently 35 seismic stations. Besides natural seismicity, other local seismic events relate to explosions (e.g. Navy exercises, cleaning of unexploded ordnance or the explosion of the Nord Stream pipelines in 2022), as well as subrosion and rockfall events in coastal areas (e.g. Leydecker 2011). Continuous passive seismic measurements can be used not only for event monitoring, but also for monitoring of ocean generated microseism or long period seismic noise (> 20 s periods), often referred to as infragravity waves (e.g. Webb 1998, Webb and Crawford 2010). Investigations of ocean generated microseism and infragravity waves are supported by offshore monitoring of surface gravity waves and ocean currents in the North Sea and Baltic Sea via buoys and platforms. They are operated by the Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH, blue dots in Figure 2a) in German waters. Moreover, a local infrasound Array in Kühlungsborn (IKUDE, Figure 2d), operated by the BGR since July 2021, provides complementary information on atmospheric pressure variations. It consists of four individual infrasound sites, each one equipped with one MB3d microbarometer and a wind reduction system (WNRS). The WNRS consists of 24 equally-long hoses with an air inlet port on each end in a circled area of 12 m diameter. The IKUDE infrasound array is collocated with a broadband seismic station (KBON, Figure 2d). Information on the access to all used datasets are written in the data availability statement.

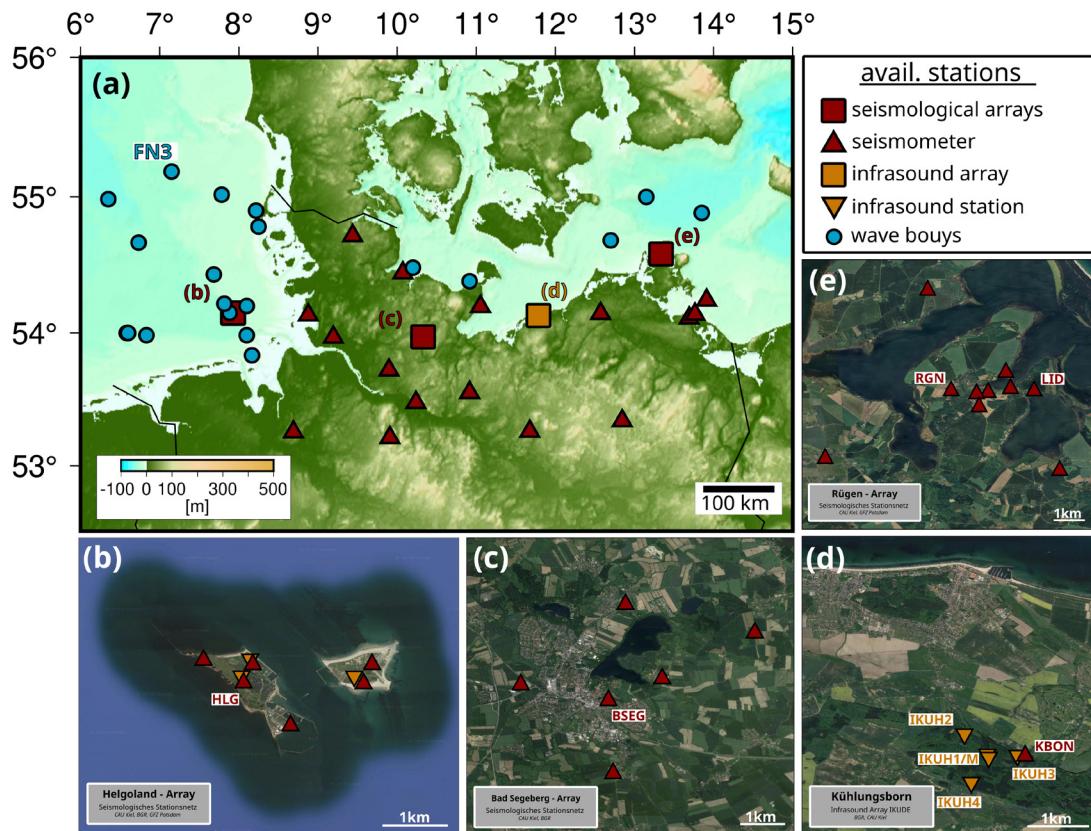


Figure 2: Multidisciplinary network in the German coastal areas of the North Sea and Baltic Sea (a). Red triangles indicate the location of the permanent seismic broadband stations, whereas orange triangles show the location of infrasound stations. Offshore buoys are marked as blue dots. Local seismic and infrasound arrays are shown as red/orange squares, with close-ups of the Heligoland seismic array (b), the Bad Segeberg seismic array (c), the infrasound array IKUDE in Kühlungsborn (d) and the Rügen seismic array (e).

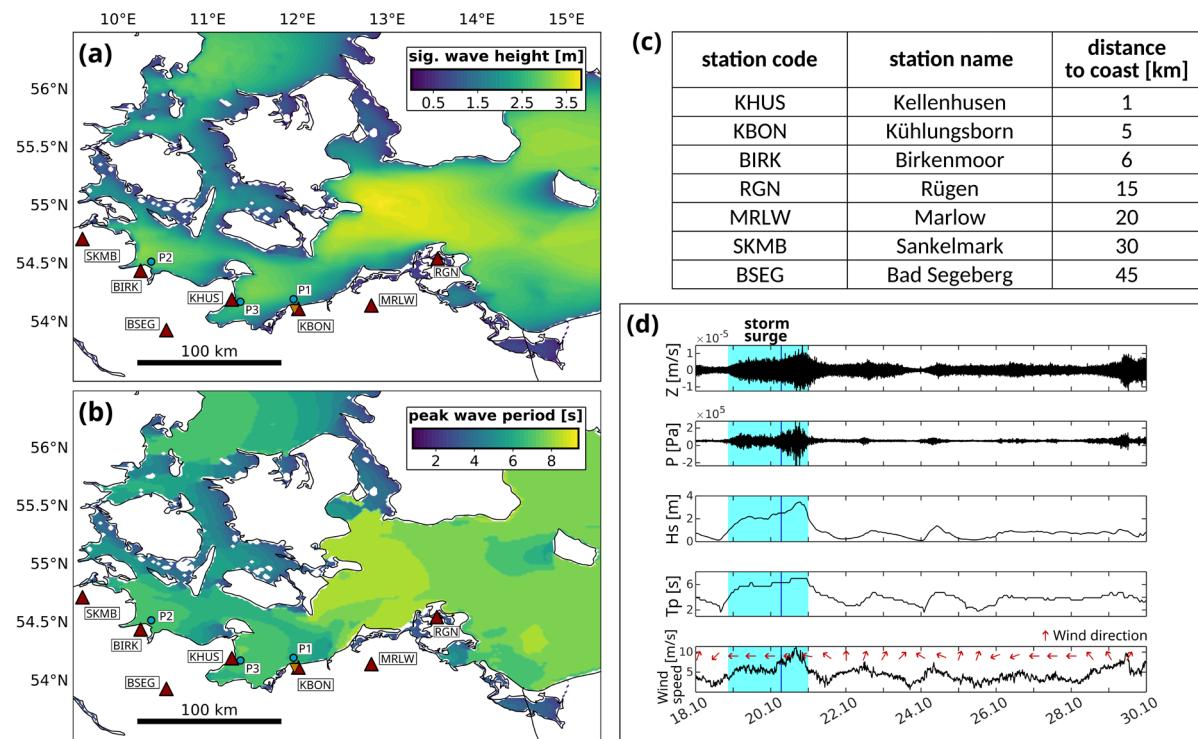


Figure 3: Overview of the used datasets. Model data of significant wave height and peak wave period on 20th October 2023, 06:00 CET, during the storm surge are shown in (a) and (b), respectively. Seismic stations used in this study are shown as red triangles. Their distances to the coast are summarized in (c). An overview of the entire dataset is exemplary shown for the local array of Kühlungsborn (d). From top to bottom it shows the vertical component seismic data (Z), atmospheric pressure data from the infrasound station IKUH1 (P), significant wave height (H_s) and peak wave period (T_p) at P1 and wind speed and -direction of the nearby weather station in Bastorf-Kägendorf (orange triangle in (a) and (b)), operated by the German Weather Service (DWD). The time of the storm surge is highlighted in light blue.

For the seismic investigation of the October 2023 storm surge, we utilize three component continuous data from seven sites with variable distances to the German Baltic Sea coastline from 18th to 29th of October (Figure 3a, b, c). Sea surface gravity wave data is provided as numerical model results of the Baltic Sea model by the Norwegian Meteorological Institute via the Copernicus Marine Service (see data availability statement for access information). The model output has a spatial resolution of 3x3 km and a temporal resolution of one hour, exemplary shown in Figure 3 for the 20th of October, 06:00 CET during the storm surge with significant wave height (H_s) as well as peak wave period (T_p). For comparing local seismic variations at near coastal stations and variations in surface gravity waves, three locations (P1-P3 in Figure 3a and b) are selected. In addition, surface gravity wave data from the FINO3 platform in the North Sea (FN3 in Figure 2a) is utilized. Figure 3d shows a compilation of the multidisciplinary dataset in Kühlungsborn. Raw infrasound data is shown exemplary from IKUH1 (for exact location see Figure 2d). Significant wave height and peak wave period are obtained from P1. Wind speed and -direction, with a temporal resolution of ten minutes are obtained from the nearby weather station of the German Weather Service (DWD) in Bastorf-Kägendorf (orange triangle in Figure 3a and b; see data availability statement for access information). All parameters show increasing amplitudes during the storm surge, while the wind direction was overall from the East. After the storm surge, wind direction changed to southerly directions until the 25th October. During that

time, amplitude variations in peak wave period and significant wave height are accompanied by similar variations in amplitude of the vertical seismic component and Infrasound.

2 Seismic observations during the storm surge

Raw continuous three component seismic data was utilized to evaluate the variation of spectral content over time and to compare our measurements to the varying ocean generated microseism. Waveforms are cut into segments of 15 min and amplitude spectra calculated for each segment and each component in a period range of 0.125–250 s. The horizontal component (H) is calculated using the Euclidean norm of the amplitude spectra of the North (N) and East (E) component: $H = \sqrt{N^2 + E^2}$. Figure 4a shows a histogram representation of the vertical component spectra over all 15 min segments and all days at the site of Kühlungsborn. Ocean generated microseism is dominant at periods of ≈ 1 –30 s, where the ambient seismic noise field has the largest amplitudes. This is valid for all stations used in this study (Figure S1 in the supplemental material).

When displayed over time, the vertical component spectrogram (Figure 4b) reveals a large number of distinct signals at different periods. Occasionally occurring strong amplitudes at periods larger than 10 s relate to large earthquakes, whereas amplitude variations at lowest periods can be associated with anthropogenic noise (day-night-rhythm). These observations are consistent at every station (Figure 5) and of no further relevance in this work.

During the October 2023 storm surge, maximum amplitudes in the spectrum are measured at the site of Kühlungsborn (Figure 4b) and the largest spectral variations over time occur at periods between 1 and 3 s. These variations correlate with half the peak wave period of ocean waves at location P1 (white dashed line; for exact location see Figure 3a). Following the definition of primary and secondary microseism (section 1), we therefore associate these amplitude variations with secondary microseism of the Baltic Sea. The spectra at stations Birkenmoor and Kellenhusen (Figure 5a and b), which are of similar or closer distance to the coast as the site of Kühlungsborn (see Figure 3c) show similarly amplitude variations that fit with the half peak wave period in close distance offshore their respective coast (P2 and P3 in Figure 3a and b). A strong visual correlation between the three stations and half peak wave period at all three local points remains even few days after the storm surge ceased. During the 22nd and 23rd October, small seismic amplitudes in the spectrogram of Birkenmoor correlate with small peak wave periods at P2. At the same time, large seismic amplitudes are observable at Kellenhusen and Kühlungsborn which correlate with increased half peak wave periods. At the sites in Marlow (MRLW, Figure 5c) and on the island of Rügen (RGN, Figure 5d), which are 15 to 20 km from the coast, seismic amplitudes are significantly smaller than at near coastal stations, e.g., Kühlungsborn, but still observable over the entire time. At Sankelmark (SKMB, Figure 5e), secondary microseism of the Baltic Sea between 1–3 s period is only observable during the storm surge and on 27th October. Bad Segeberg (BSEG, Figure 5f), which has the largest distance to the Baltic Sea coast of about 50 km, shows no secondary microseism of the Baltic Sea. This indicates that seismic waves of ocean generated microseism in a period range of 1–3 s are locally generated by surface gravity waves in coastal areas of the Baltic Sea. The decrease of seismic amplitudes of secondary microseism of the Baltic Sea with increasing distance to the coast will be further discussed in the next section.

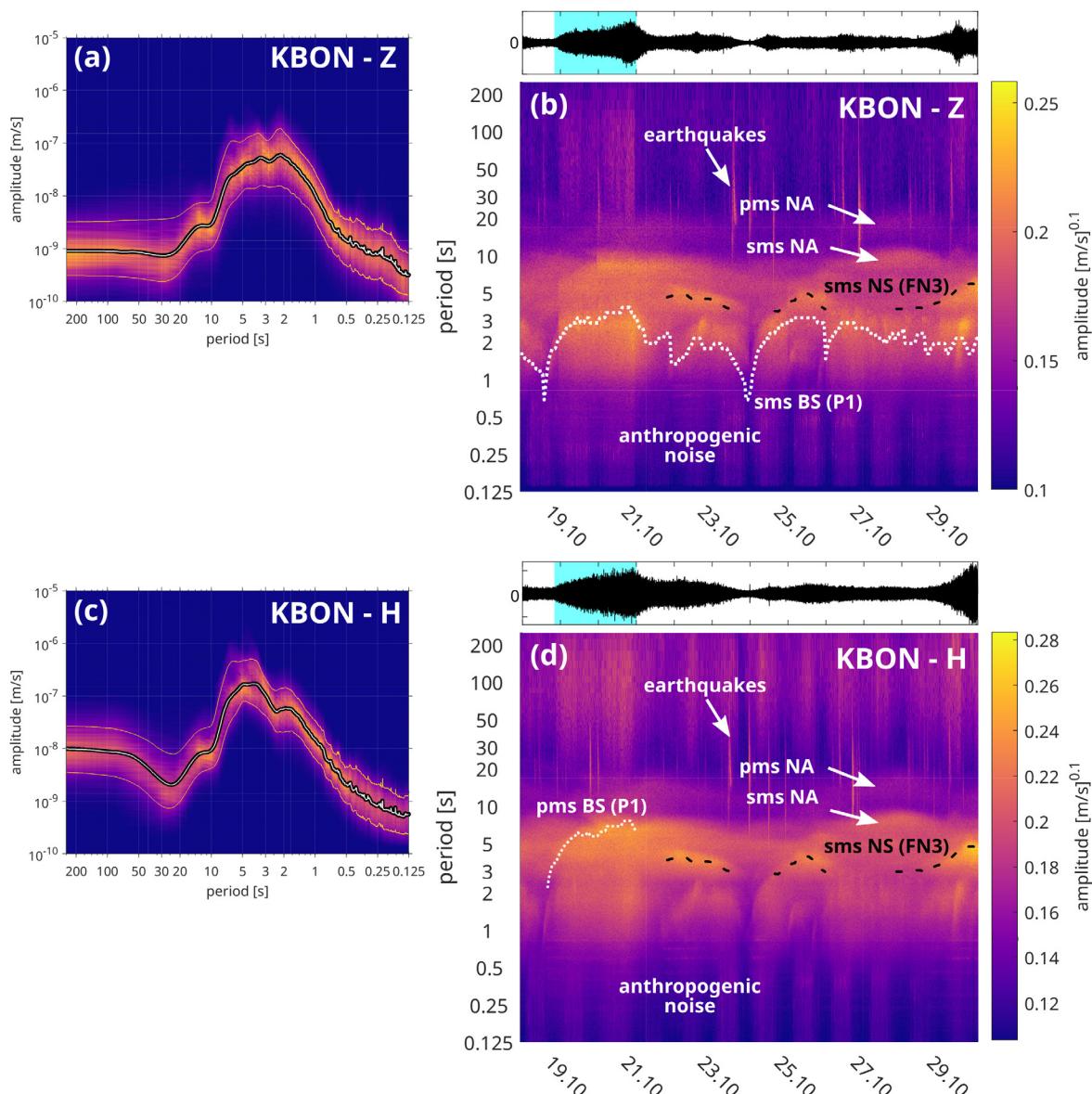


Figure 4: Spectral content of the seismic vertical (a, b) and horizontal (c, d) component at the site of Kühlungsborn. A histogram representation of 15 min spectral amplitude as a function of period is shown in (a) and (c). The median amplitude (white line) and the 10 and 90 percent percentiles (yellow lines) are highlighted. The spectral variations over time (spectrogram) and its raw waveform, filtered between 0.125 and 250 s are shown in (b) and (d). The white dashed line indicates the half peak wave period at location P1 (for exact locations see Figure 3a, b) while the black dashed line shows the half peak wave period measured at the FINO3 platform in the North Sea (for location see Figure 2a). Primary and secondary microseism of the North Atlantic, as well as earthquakes and anthropogenic noise are highlighted. BS: Baltic Sea, NS: North Sea, NA: North Atlantic.

At larger periods (≈ 5 s), seismic amplitudes at all stations used in this study fit to the half peak wave period measured at the FINO3 platform in the North Sea (black dashed lines in Figure 4b and Figure 5) and therefore can be related to secondary microseism in that region. Largest seismic amplitudes are observed in Sankelmark, the closest station to the North Sea coast. Primary and secondary microseism of the North Atlantic are also visible in all spectrograms (Figure 4b and Figure 5) as well as in the histograms (Figure 4a and Figure S1 in the supplemental material) as they are globally measurable at around 14–16 s and 7–8 s period, respectively.

The horizontal seismic component at Kühlungsborn (Figure 4c and d) shows overall a very similar spectral content compared to the vertical. In detail, larger amplitudes can be observed especially during the storm surge at $\approx 3\text{--}6$ s periods both in the histogram as well as the spectrogram. They might reveal primary microseism in the Baltic Sea, which has a larger excitation of the horizontal seismic component. In addition, periods longer than 30 s show higher amplitudes in the horizontal than vertical component over the entire observation interval.

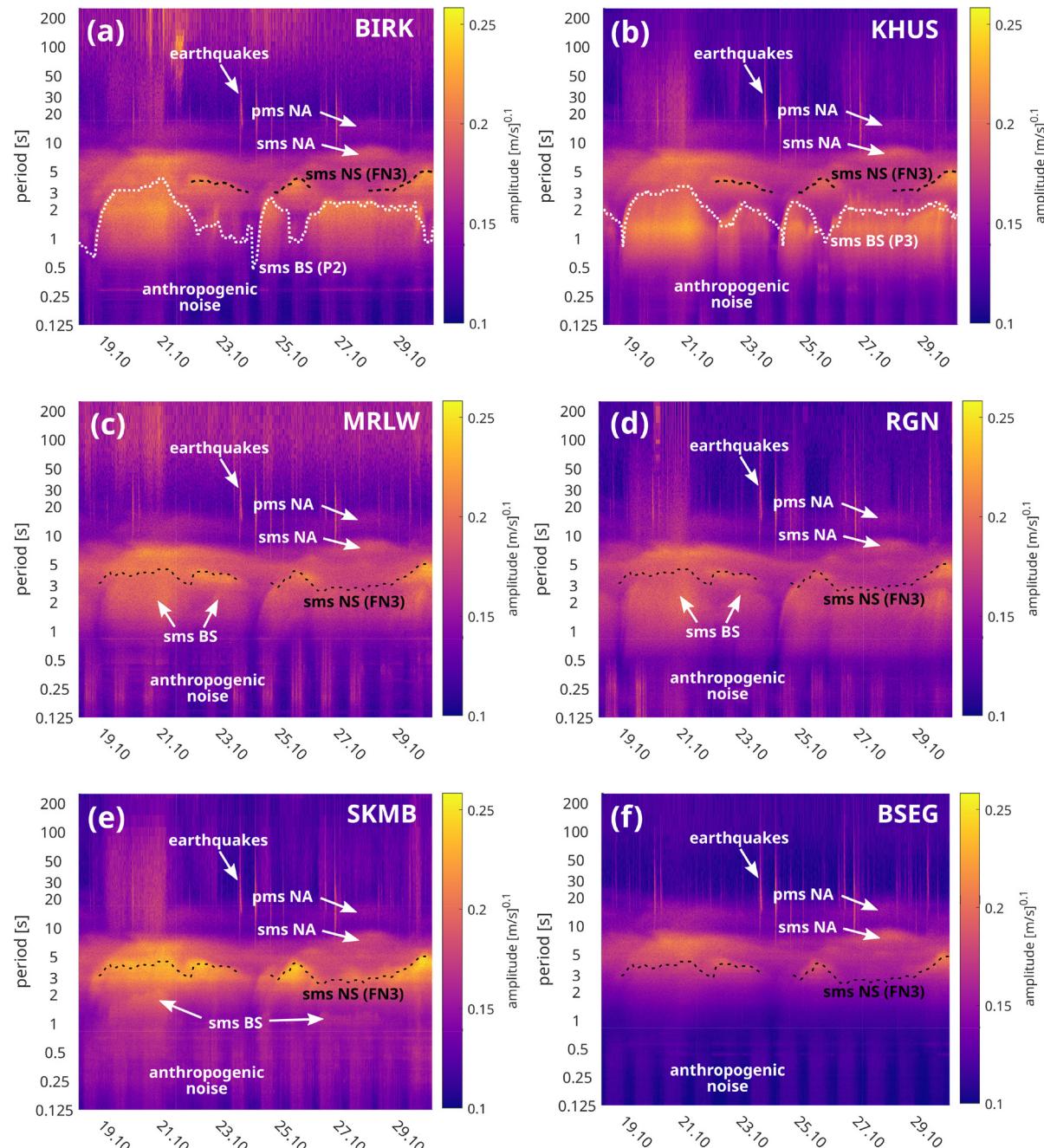


Figure 5: Vertical component seismic spectrograms of stations Birkenmoor (BIRK, (a)), Kellenhusen (KHUS, (b)), Marlow (MRLW, (c)), Rügen (RGN, (d)), Sankelmark (SKMB, (e)) and Bad Segeberg (BSEG, (f)). The white dashed lines in (a) and (b) indicate the half peak wave period at locations P2 and P3 (for exact locations see Figure 3a, b). The black dashed lines show the half peak wave period at the FINO3 platform in the North Sea (for exact location see Figure 2a). BS: Baltic Sea, NS: North Sea, NA: North Atlantic.

2.1 Comparison of infrasound and seismic measurements

At large periods, acoustic waves in the atmosphere can travel long distances of up to several thousands of kilometres (e.g. De Groot-Hedlin et al. 2010). Infrasound describes the pressure fluctuations in a range between the acoustic cutoff frequency (3-10 mHz) and the lower human hearing frequency threshold of sound (generally 20 Hz). Infrasound enables us to investigate atmospheric noise during the October 2023 storm surge and its possible influence on the seismic data. It will provide indications that the sources of our seismic observations are transferred via the solid Earth or the atmosphere on a local scale. Continuous raw differential pressure data is processed the same way as the seismic data to investigate its spectral variations over time. Amplitude spectra are calculated over 15 min segments in a period range of 0.125–250 s and presented as spectrograms (Figure 6a and Figure S2 in the supplemental material). Further signal information can be derived using array processing on the different infrasound sensors of a station, here by applying the Progressive Multi-Channel Correlation (PMCC) method after Cansi (1995). This algorithm utilizes cross correlation functions to identify coherent infrasound events and their originating azimuth direction in several distinct period bands within 0.125–250 s. The IKUDE array processing features overall 8751 coherent detections between 18th and 29th October 2023, illustrated as a function of azimuth and number of detections (Figure 6b) or time (Figure S3), colour coded by their mean period, respectively.

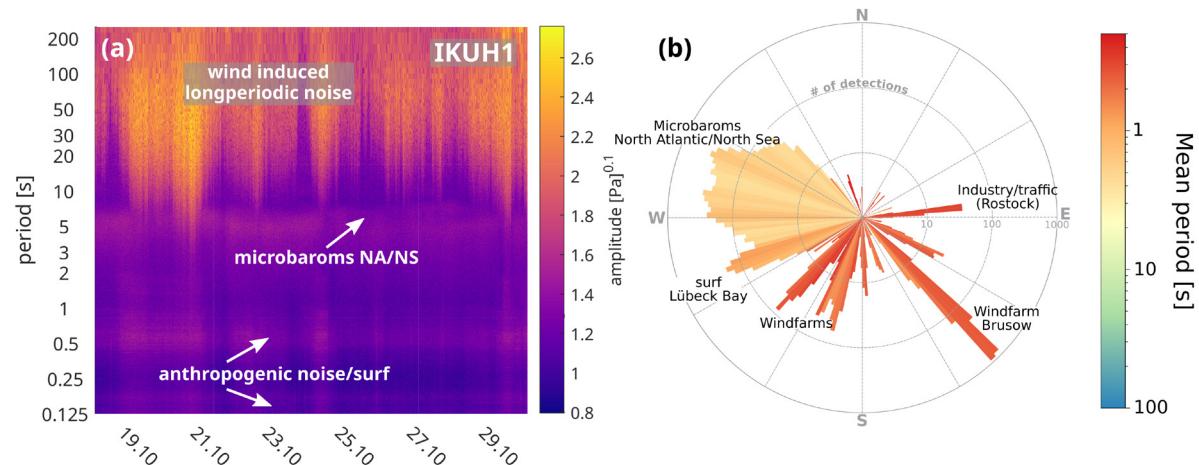


Figure 6: Infrasound measurements in Kühlungsborn during the storm surge event. The spectrogram of the infrasound station IKUH1 is shown on the left (a). The polar histogram (b) reveals the direction and number of infrasound detections during the same timeframe, colour coded by their mean period using the IKUDE infrasound network (for exact location see Figure 2d). NS: North Sea, NA: North Atlantic.

The spectrograms of all stations show highly similar results. They are dominated by large amplitudes at long periods of > 10 s on average. This long period noise is often related to large wind speeds (e.g. Matoza et al. 2009). During the October 2023 storm surge, large amplitudes are observed down to 5 s periods. However, no PMCC detection was registered for this period range which might be related to diffuse turbulences caused by varying wind speeds, generating only incoherent signals for which the array processing cannot derive consistent back azimuth directions. They show some similarities to long period seismic noise on the horizontal seismic component (Figure 4d) which needs further investigation. At around 5 s period, all infrasound spectrograms show a consistent band of increased

amplitudes over the entire time of investigation. They are related to microbaroms in the North Atlantic and probably the North Sea (Hupe et al. 2022, Kristoffersen et al. 2022). The polar-histogram confirms the source direction (Figure 6b). Detections with a mean period of around 5 s are originating from W-NW directions. Meanwhile, local microbaroms in the Baltic Sea are not observed. They might either be overprinted by the strong microbaroms from the North Atlantic and North Sea or subject to unfavourable propagation conditions. Infrasound propagation over long distances is generally dominated by ducting through semi-annually reversing stratospheric winds at around 50 kilometres altitude (Drob et al. 2003), which favour signals from western directions in winter months and from eastern directions during summer. The clear detectability of microbaroms from the west during the October 2023 storm surge may therefore explain reduced detection capabilities from E-NE directions (Baltic Sea), unless the sources were close (a few ten kilometres) and strong enough for detections following direct near-surface sound propagation.

Low period signals (< 1 s) are often related to anthropogenic sources, typically from sources at close distances. At periods < 2 s, there are several detections pointing in distinct directions from SE to SW. Most detections are measured during the October 2023 storm surge and later times (24th and 28th October) where the wind speed reaches maximum values, and can be attributed to local windfarms (Figure S3, e.g. Marcillo et al. 2015, Pilger and Ceranna 2017) at 3–13 km distance from the infrasound array. Easterly detections at the same periods might be related to traffic and industry in the nearby Port of Rostock. One cluster of detections is pointing in SW directions ($\approx 240^\circ$ – 250°) with a mean period of ≈ 1 s. This might be due to surf (Le Pichon et al. 2010) in the Bay of Lübeck. The detections only occur at times of increasing wind speeds. However, they might be overprinted by the strong signals from the wind farms during other times (Figure S3). Comparison of seismic and infrasound data show very little correlation overall. Local secondary microseism of the Baltic Sea, measured in the period range of 1–3 s is not present in the infrasound data at comparable periods. Low period detections due to anthropogenic noise in the infrasound are not observed in the seismic spectrograms. Especially for the wind farms, the seismometers might be too distant to observe these low period signals. Possible reasons for that will be discussed in the next section. Potential surf related infrasound detections are also not observed in the seismic data. It might be difficult to distinguish them from secondary microseism of the Baltic Sea since they share a similar period range. Therefore, we conclude that ocean generated seismic waves rather propagate via the solid Earth than the atmosphere on a local scale.

3 Seismic monitoring of coastal regions

In the previous section, we observed a distinct decrease in secondary microseism amplitude of the Baltic Sea with increasing distance to the coast, whereas primary and secondary microseism amplitudes of the North Sea and North Atlantic are largely constant across all stations. In addition, we have shown that observations of ocean microseism are not contaminated by waves propagating through the atmosphere. To exploit seismic observations as a tool for monitoring of (near) coastal processes and suggest observational requirements for a potential seismic monitoring system in the Baltic Sea, we need to quantify this amplitude decrease. We calculate the mean seismic amplitude for each 15 min time window at periods between 1–3 s for each station (Figure 7a). Relative amplitudes (Figure 7b) are

estimated using the amplitudes of Kellenhusen as reference values, since it is closest to the coast. Distances for each station are given by their shortest distance to the coast (table in Figure 3c), from where we add the mean distance of the offshore local points P1, P2 and P3 to the coast line which is ≈ 5 km. The decrease in amplitude between the stations is especially distinct during the storm surge. Already at distances of ≈ 10 km, at near coastal sites, waveforms are damped by 20–40% but amplitudes also vary strongly over time. At larger distances of 25–40 km, amplitudes are at only 25–35% of the reference amplitudes from Kellenhusen.

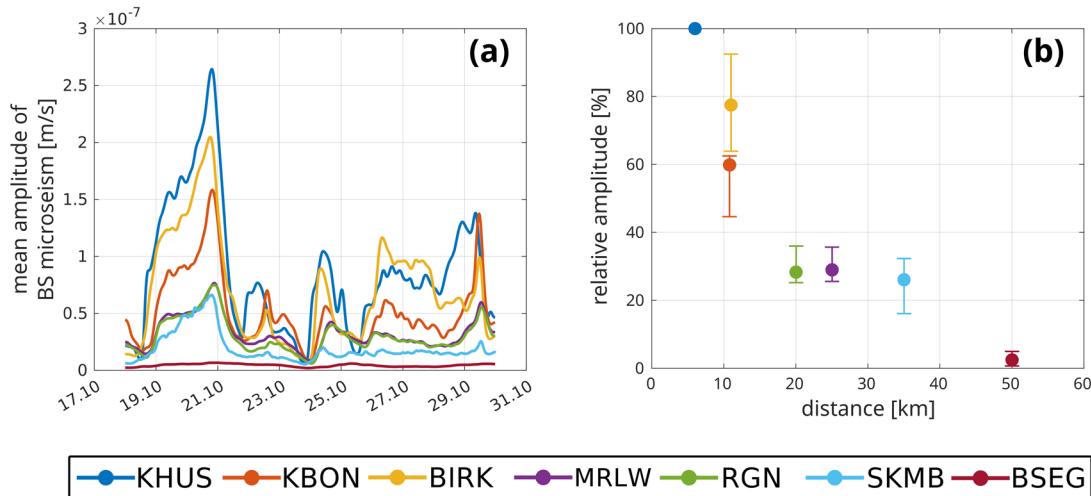


Figure 7: Mean amplitude of secondary microseism of the Baltic Sea of all stations along the Baltic Sea coast, extracted in a period range of 1–3 s (a). Their relative amplitude (b) is calculated using KHUS as reference station during the time of the storm surge. The coloured dots highlight the difference at the maximum amplitude of the October 2023 storm surge.

To derive a theoretical model of distance and period dependant damping of surface waves at the Baltic Sea coastal area, we use a relation for the amplitude of seismic surface waves, assuming the stationary phase approximation (after Dahlen and Tromp 1999):

$$A = \omega(cC)^{-1} (8\pi k |\sin(\Delta)|)^{-\frac{1}{2}} [\hat{r}U - i\hat{k}V + i(\hat{r}x\hat{k})W] x R(\Phi) e^{i(s-1)\frac{\pi}{2}} e^{-\frac{\omega\Delta}{2CQ}} \quad (1)$$

where Δ is amplitude, c is phase velocity, C is group velocity, k represents the wave number, Q is the quality factor, $R(\Phi)$ indicates the radiation pattern, Δ is the distance, s is the wave group arrival index and ω is the angular frequency. The term $|\sin(\Delta)|^{-1/2}$ represents the geometrical spreading, whereas $\hat{r}U - i\hat{k}V + i(\hat{r}x\hat{k})W$ defines the polarisation vector of a seismic surface wave. While the majority of the factors are not easily determined, the final one, $e^{-\frac{\omega\Delta}{2CQ}}$ is the anelastic damping, which we utilize to determine the amplitude damping of secondary microseism of the Baltic Sea as a function of distance to the coast and period. This reduces Eq. 1 to:

$$A = A_0 e^{-\frac{\omega\Delta}{2CQ}} \quad (2)$$

with A_0 as a reference amplitude, which we set to 1. We adapt a local model from the global compilation CRUST1.0 (Laske et al. 2013) with crustal seismic velocities and quality factors and modify it with a fast lower crustal layer and a crustal thickness of 30 km to comply with the general tectonic setting in Northern Germany (Figure 8a, Krawczyk et al. 2008). For

the uppermost crust, we use P-wave velocities from local borehole profiles provided by the Geological Survey Schleswig Holstein. As the quality factor decreases strongly in sedimentary layers compared to the crystalline crust, with values far below 100 (De Martin et al. 2021), we accordingly reduce Q_μ in the uppermost layers of the model. We use this model to calculate synthetic group velocity dispersion curves and quality factors as a function of period for Rayleigh and Love waves (Figure 8b), from which we derive the amplitude damping (Q) for Rayleigh (Figure 8c) and Love waves (Figure 8d) as a function of period and distance. Rayleigh waves are stronger damped at smallest periods compared to Love waves, whereas it is vice versa at large distances and longer periods. Surface waves of periods smaller than 3 s are already affected by damping at 10 km distance and are likely not detectable at distances larger than 40 km where their amplitude has decreased to < 50%, in line with our measurements. A precise detection of secondary microseism of the Baltic Sea is therefore starting to get difficult at stations which are more than ≈ 35 km from the coast. However, our estimations apply only for the time of the storm surge where amplitudes are amplified by large significant wave heights and maximum peak wave periods. Local detection capabilities might decrease to a maximum distance of < 25–30 km at times when there is no extreme weather event across the Baltic Sea. At the same time, seismic surface waves of periods > 8 s are almost unaffected by anelastic damping and can be therefore constantly measured over hundreds of kilometres, such as primary and secondary microseism from the North Atlantic and North Sea. The results also show that local wind parks in 3–3 km distance, which were detected by our infrasound measurements at periods < 1 s are also damped and therefore not measured by our seismometers.

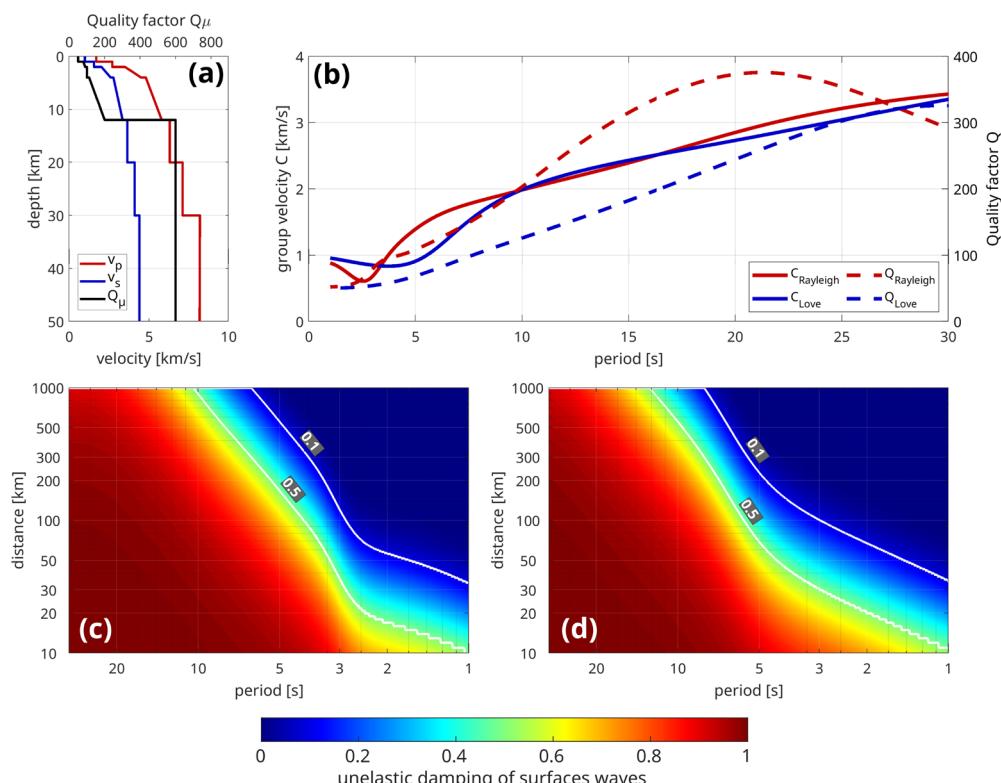


Figure 8: Modelling of anelastic damping of seismic surface waves using a local 1D model for P-wave velocity (v_p), S-wave velocity (v_s) and quality factor Q_μ of the subsurface (a). The 1D model is used to estimate synthetic group velocities (C) and quality factors (Q) as a function of period for Rayleigh and Love waves (b). This results in anelastic damping as function of distance and period for Rayleigh (c) and Love (d) waves.

4 Conclusion

We showed that seismic monitoring in coastal areas of the Baltic Sea, based on the expanded seismic network in northern Germany allows to investigate the effects of local weather and marine phenomena, such as the October 2023 storm surge on continuous seismic data. Seismic measurements show local variations at different sites along and with increasing distance to the Baltic Sea coast line. Near coastal stations in Kühlungsborn, Birkenmoor and Kellenhusen reveal locally variable secondary microseism of the Baltic Sea which correlate with the half peak wave periods of ocean surface gravity waves at nearby offshore locations. Infrasound measurements in Kühlungsborn reveal additional insight on noise sources and atmospheric wave propagation. Low period signals are related to wind farms and occasionally surf which were detected during the October 2023 storm surge event and correspond in general to increased wind speeds. However, we find that infrasound and seismic data do not generally correlate. This indicates that the observed seismic signals are most likely not directly related to atmospheric sources, but propagate through the solid Earth when induced by ocean generated microseism. Finally, our seismic measurements enable us to estimate a sensitivity range for local microseism in coastal areas of the Baltic Sea using a synthetic approach for anelastic damping as a function of period and distance to the coast. As a result, seismic monitoring of locally generated ocean microseism in coastal areas along the Baltic Sea would be possible within 25–30 km distance to coast.

4.1 Data availability statement

Seismic waveform and infrasound data from the German Regional Seismic Network (GR; <https://doi.org/10.25928/mbx6-hr74>), GEOFON (GE; <https://doi.org/10.14470/TR560404>) and Kiel University Earthquake Monitoring (KQ; <https://doi.org/10.7914/SN/KQ>) can be obtained from the GEOFON data centre of the German Research Centre for Geoscience (GFZ; <https://geofon.gfz-potsdam.de/>). Sea state data of the FINO3 platform used in this study can be obtained from the Sea State portal of the Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH; <https://seastate.bsh.de/rave/index.jsf?content=seegang>). Water level data can be obtained from the ITZBund and the Federal Waterways and Shipping Administration (WSV, pegelonline.wsv.de). Modelled Sea state data of the Baltic Sea is provided by the Norwegian Meteorological Institute (MET) and can be obtained from the Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS; <https://doi.org/10.48670/moi-00002>). Weather data is used from the Open Data Server of the German Meteorological Service (DWD; https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/10_minutes/wind/recent/).

5 References

- Ardhuin, F.; Stutzmann, E.; Schimmel, M.; Mangeney, A.: Ocean wave sources of seismic noise. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116 (C9), 2011.
- Ardhuin, F.; Balanche, A.; Stutzmann, E.; Obrebski, M.: From seismic noise to oceanwave parameters: General methods and validation. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117 (C5), 2012.

- Ardhuin, F.; Gualtieri, L.; Stutzmann, E.: How ocean waves rock the earth: Two mechanisms explain microseisms with periods 3 to 300 s. In: *Geophysical Research Letters*, 42(3), 765–772, 2015.
- Ardhuin, F.; Sutherland, P.; Doble, M.; Wadhams, P.: Ocean waves across the arctic: Attenuation due to dissipation dominates over scattering for periods longer than 19 s. In: *Geophysical Research Letters*, 43(11), 5775–5783, 2016.
- Becker, D.; Cristiano, L.; Peikert, J.; Kruse, T.; Dethof, F.; Hadzioannou, C.; Meier, T.: Temporal modulation of the local microseism in the North Sea. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(10), e2020JB019770, 2020.
- Bertelli, T.: Osservazioni sui piccoli movimenti dei pendoli in relazione ad alcuni fenomeni meteorologici del pd timoteo bertelli barnabita. Tip. delle scienze matematiche e fisiche, 1872.
- Bretschneider, C. L.: Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves (No. 118). The Board, 1959.
- Bromirski, P. D.; Duennebier, F. K.: The near-coastal microseism spectrum: Spatial and temporal wave climate relationships. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B8), ESE–5, 2002.
- BSH: Schweres Sturmflut vom 20. Oktober 2023. Retrieved 22.07.2024, from https://www.bsh.de/DE/THemen/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten_Anlagen/Downloads/Ostsee_Sturmflut_20231020.pdf?__blob=publicationFile&v=3, 2024.
- Cansi, Y.: An automatic seismic event processing for detection and location: The pmcc method. In: *Geophysical research letters*, 22(9), 1021–1024, 1995.
- Cutroneo, L.; Ferretti, G.; Barani, S.; Scafidi, D.; De Leo, F.; Besio, G.; Capello, M.: Near real-time monitoring of significant sea wave height through microseism recordings: Analysis of an exceptional sea storm event. In: *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3), 319, 2021.
- Davy, C.; Barruol, G.; Fontaine, F. R.; Sigloch, K.; Stutzmann, E.: Tracking major storms from microseismic and hydroacoustic observations on the seafloor. In: *Geophysical Research Letters*, 41(24), 8825–8831, 2014.
- Dahlen, F. A.; Tromp, J.: Theoretical Global Seismology. In: *Physics Today*, 52, 418–419. DOI: 10.1063/1.882788, 1999.
- Deacon, G. E. R.: Relations between sea waves and microseisms. In: *Nature*, 160(4065), 419–421, 1947.
- De Groot-Hedlin, C. D.; Hedlin, M. A.; Drob, D. P.: Atmospheric variability and infrasound monitoring. Infrasound monitoring for atmospheric studies, 475–507, 2009.
- De Martin, F.; Chaljub, E.; Thierry, P.; Sochala, P.; Dupros, F.; Maufroy, E.; Hadri, B.; Benaichouche, A.; Hollender, F.: Influential parameters on 3-d synthetic ground motions in a sedimentary basin derived from global sensitivity analysis. In: *Geophysical Journal International*, 227(3), 1795–1817, 2021.
- Drob, D. P.; Picone, J. M.; Garce's, M. A.: Global morphology of infrasound propagation. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D21), 2003.

- Essen, H.-H.; Krüger, F.; Dahm, T.; Grevemeyer, I.: On the generation of secondary microseisms observed in northern and central europe. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B10), 2003.
- Ferretti, G.; Barani, S.; Scafidi, D.; Capello, M.; Cutroneo, L.; Vagge, G.; Besio, G.: Near real-time monitoring of significant sea wave height through microseism recordings: An application in the Ligurian Sea (Italy). In: *Ocean & Coastal Management*, 165, 185-194, 2018.
- Hupe, P.; Ceranna, L.; Le Pichon, A.; Matoza, R. S.; Mialle, P.: International monitoring system infrasound data products for atmospheric studies and civilian applications. In: *Earth System Science Data Discussions*, 1–40, 2022.
- Iafolla, L.; Fiorenza, E.; Chiappini, M.; Carmisciano, C.; Iafolla, V. A.: Sea wave data reconstruction using micro-seismic measurements and machine learning methods. In: *Frontiers in Marine Science*, 9, 798167, 2022.
- Juretzek, C.; Hadzioannou, C.: Where do ocean microseisms come from? a study of love-to-rayleigh wave ratios. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(9), 6741–6756, 2016.
- Juretzek, C.; Hadzioannou, C.: Linking source region and ocean wave parameters with the observed primary microseismic noise. In: *Geophysical Journal International*, 211(3), 1640-1654, 2017.
- Krawczyk, C.; Rabbel, W.; Willert, S.; Hese, F.; Götze, H.-J.; Gajewski, D.; et al.: Crustal structures and properties in the cefs from geophysical evidence. In: *Dynamics of complex intracontinental basins: The central european basin system*, 67–95, 2008.
- Kristoffersen, S. K.; Le Pichon, A.; Hupe, P.; Matoza, R. S.: Updated global reference models of broadband coherent infrasound signals for atmospheric studies and civilian applications. In: *Earth and Space Science*, 9(7), e2022EA002222, 2022.
- Laske, G.; Masters, G.; Ma, Z.; Pasyanos, M.: Update on crust1. 0—a 1-degree global model of earth’s crust. In: *Geophysical research abstracts*, 15, 2658, 2013.
- Le Pichon, A.; Matoza, R.; Brachet, N.; Cansi, Y.: Recent enhancements of the pmcc infrasound signal detector. In: *Inframatics*, 26, 5–8, 2010.
- Lepore, S.; Grad, M.: Analysis of the primary and secondary microseisms in the wavefield of the ambient noise recorded in northern poland. In: *Acta Geophysica*, 66, 915–929, 2018.
- Leydecker, G.: Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 bis 2008, 2011.
- Longuet-Higgins, M. S.: A theory of the origin of microseisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. In: *Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 243(857), 1–35, 1950.
- Marcillo, O.; Arrowsmith, S.; Blom, P.; Jones, K.: On infrasound generated by wind farms and its propagation in low-altitude tropospheric waveguides. In: *Journal of geophysical research: Atmospheres*, 120(19), 9855–9868, 2015.
- Matoza, R. S.; Garcés, M. A.; Chouet, B. A.; D’Auria, L.; Hedlin, M. A.; De Groot-Hedlin, C.; Waite, G. P.: The source of infrasound associated with long-period events at mount st. helens. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B4), 2009.

Moschella, S.; Cannata, A.; Cannavò, F.; Di Grazia, G.; Nardone, G.; Orasi, A.; Picone, M.; Ferla, M.; Gresta, S.: Insights into microseism sources by array and machine learning techniques: Ionian and Tyrrhenian Sea case of study. In: *Frontiers in Earth Science*, 8, 114, 2020.

Omori, F.: Horizontal pendulums for the mechanical registration of seismic and other earth movements. In: *The journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo, Japan*, 11(3), 121–145, 1899.

Pierson Jr, W. J.; Moskowitz, L.: A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of sa kitaigorodskii. In: *Journal of geophysical research*, 69(24), 5181–5190, 1964.

Pilger, C.; Ceranna, L.: The influence of periodic wind turbine noise on infrasound array measurements. In: *Journal of Sound and Vibration*, 388, 188–200, 2017.

Stammler, K.; Bischoff, M.; Brüstle, A.; Ceranna, L.; Donner, S.; Fischer, K.; Gaebler, P.; Friederich, W.; Funke, S.; Hartmann, G.; Homuth, B.; Knapmeyer-Endrun, B.; Korn, M.; Megies, T.; Pilger, P.; Plenfisch, T.; Pustal, I.; Rappsilber, I.; Schmidt, B.; Sonnabend, L.; Stange, S.; Wasserman, J.; Wegler, U.: German seismic and infrasound networks contributing to the European integrated data archive (EIDA). In: *Seismological Research Letters*, 92(3), 1854-1875, 2021.

Webb, S. C.: Broadband seismology and noise under the ocean. In: *Reviews of Geophysics*, 36(1), 105-142, 1998.

Webb, S. C.; Crawford, W. C.: Shallow-water broadband OBS seismology. In: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(4), 1770-1778, 2010.

Wiechert, E.: Verhandlungen der zweiten internationalen seismologischen konferenz. In: *Gerlands Beitr. Geophys*, 2, 41–43, 1904.

Zöppritz, K.: Seismische registrierungen in göttingen im jahre 1906. In: *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1908, 129–190, 1908.

6 Supplemental Material

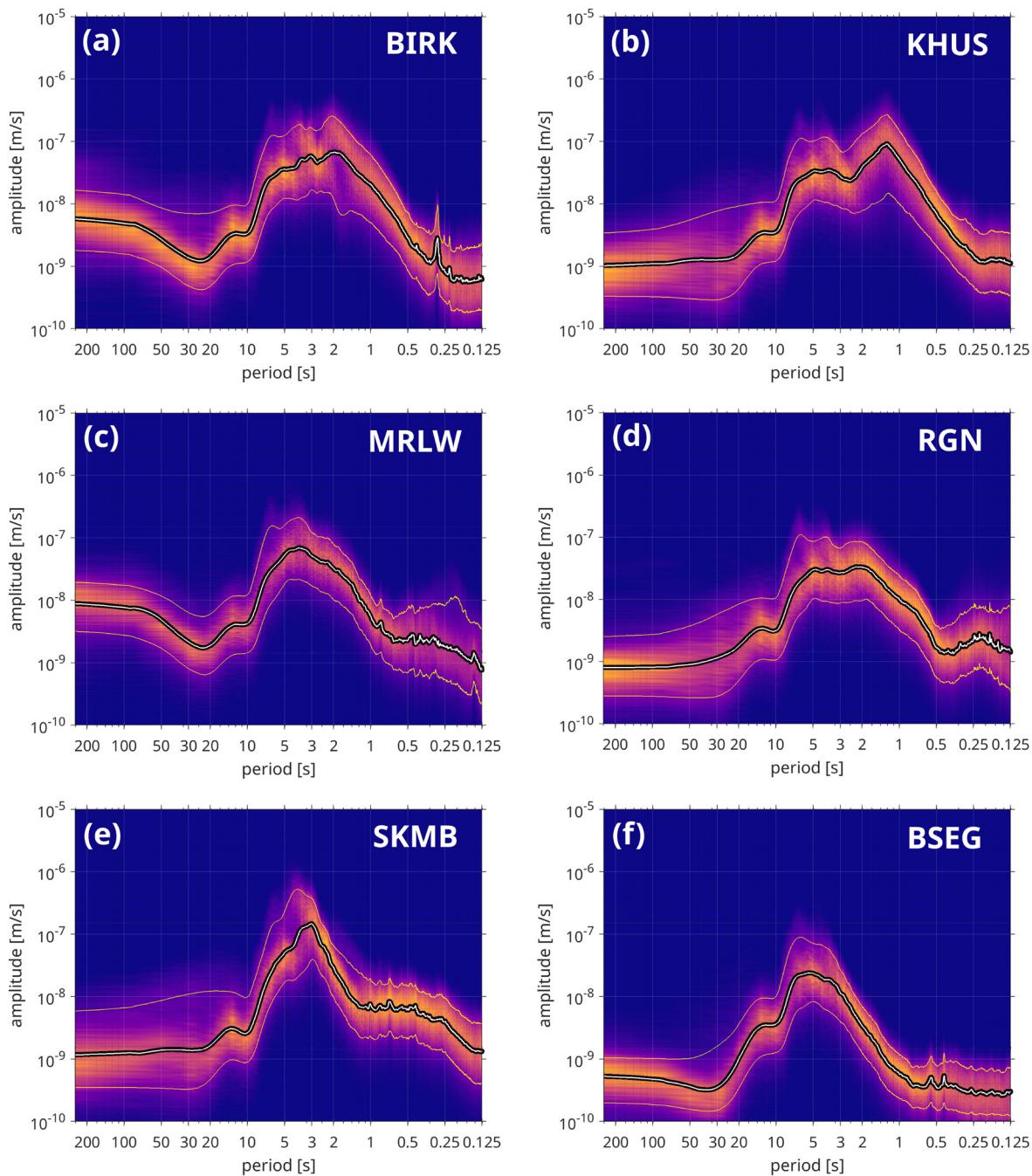


Figure S1: Histograms of vertical component amplitude spectra for the seismic stations Birkenmoor (a), Kellenhusen (b), Marlow (c), Rügen (d), Sankelmark (e) and Bad Segeberg (f) in a period band of 0.125 to 250 s. The median amplitude (white line) and the 10 and 90 percentiles (yellow lines) are highlighted.

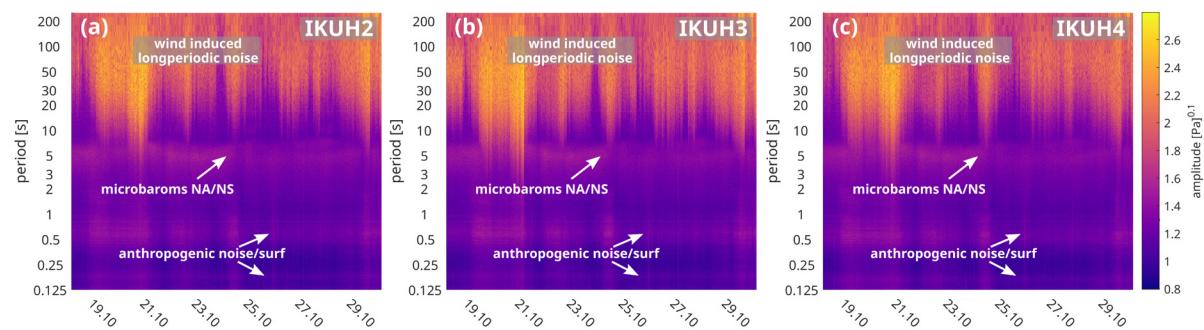


Figure S2: Spectrograms of infrasound data from stations IKUH2 (a), IKUH3 (b) and IKUH4 (c).
NS: North Sea, NA: North Atlantic.

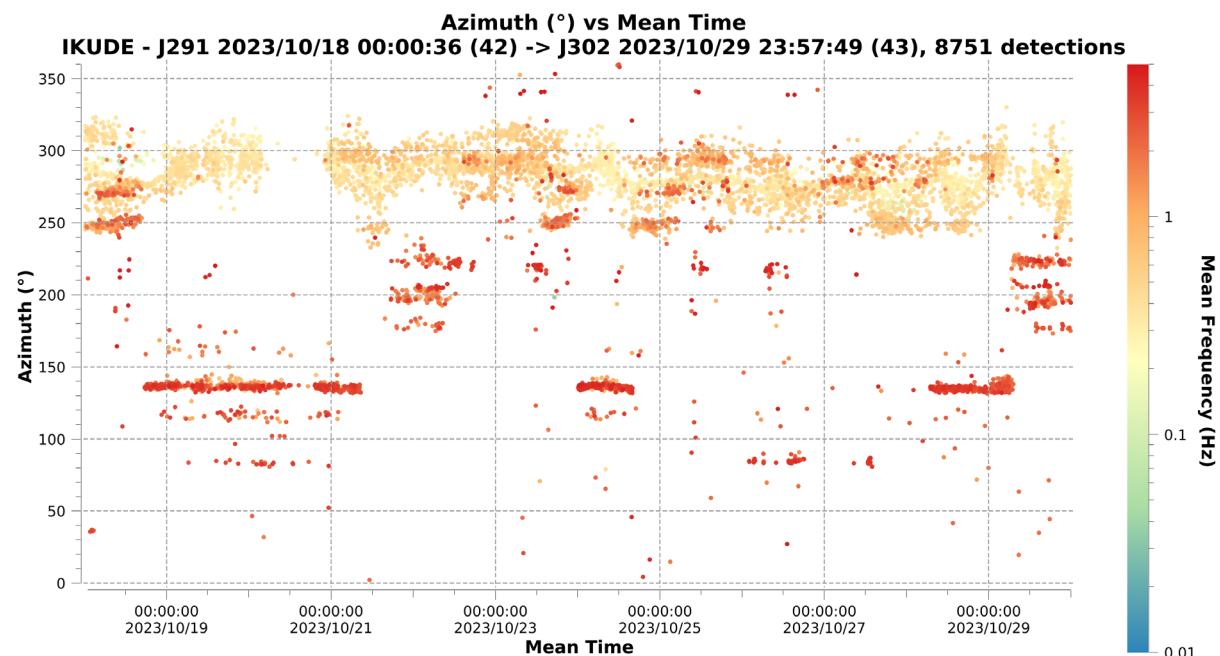
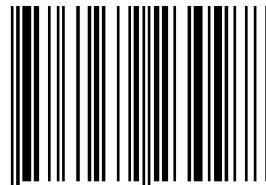


Figure S3: Infrasound detections as function of azimuth from 18th to 29th October. The 8751 detections are colour-coded by mean frequency in a range between 0.01 and 4 Hz.



ISBN 978-3-939230-97-7



9 783939 230977



Kuratorium für Forschung
im Küstingenieurwesen