

Die Ostseesturmflut Oktober 2023 in Schleswig-Holstein

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

¹ Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein; thomas.hirschhaeuser@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.

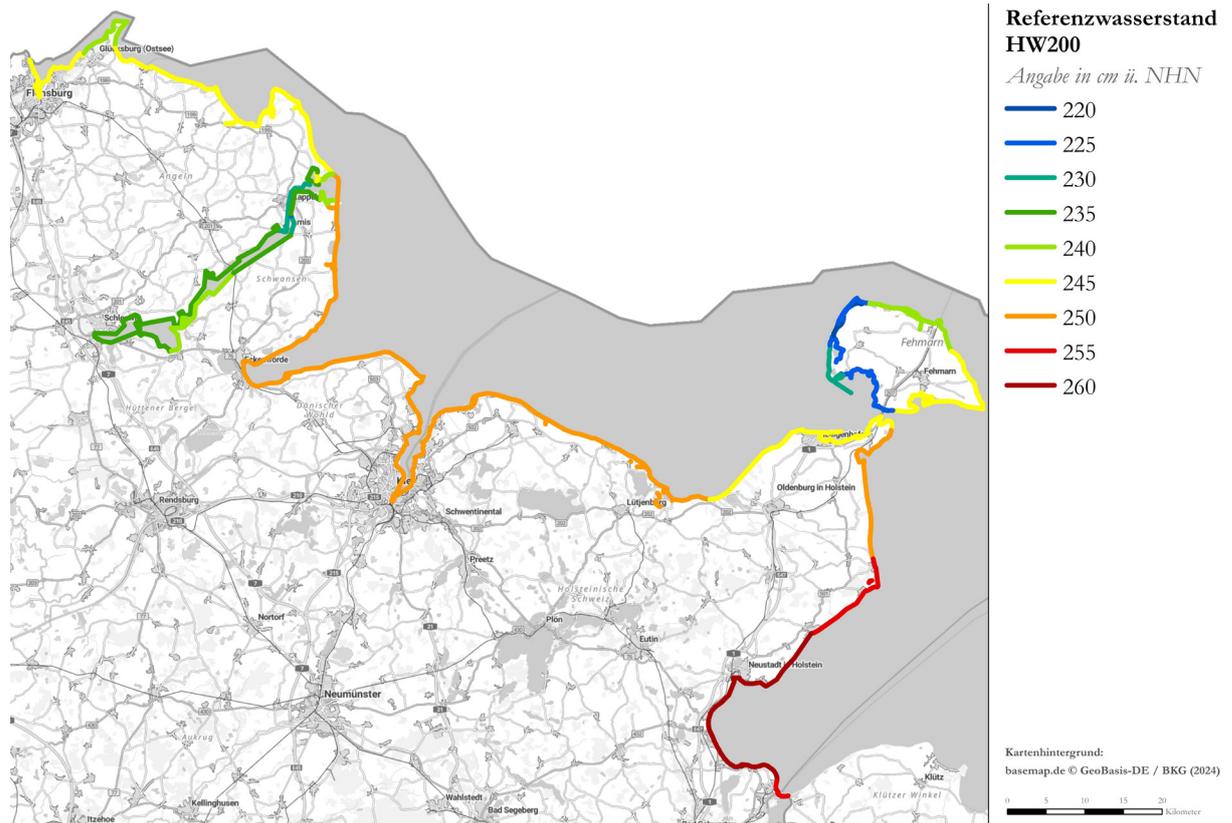


Abbildung 1: Referenzwasserstand HW_{200,2030}.

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 Extremszenario (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)

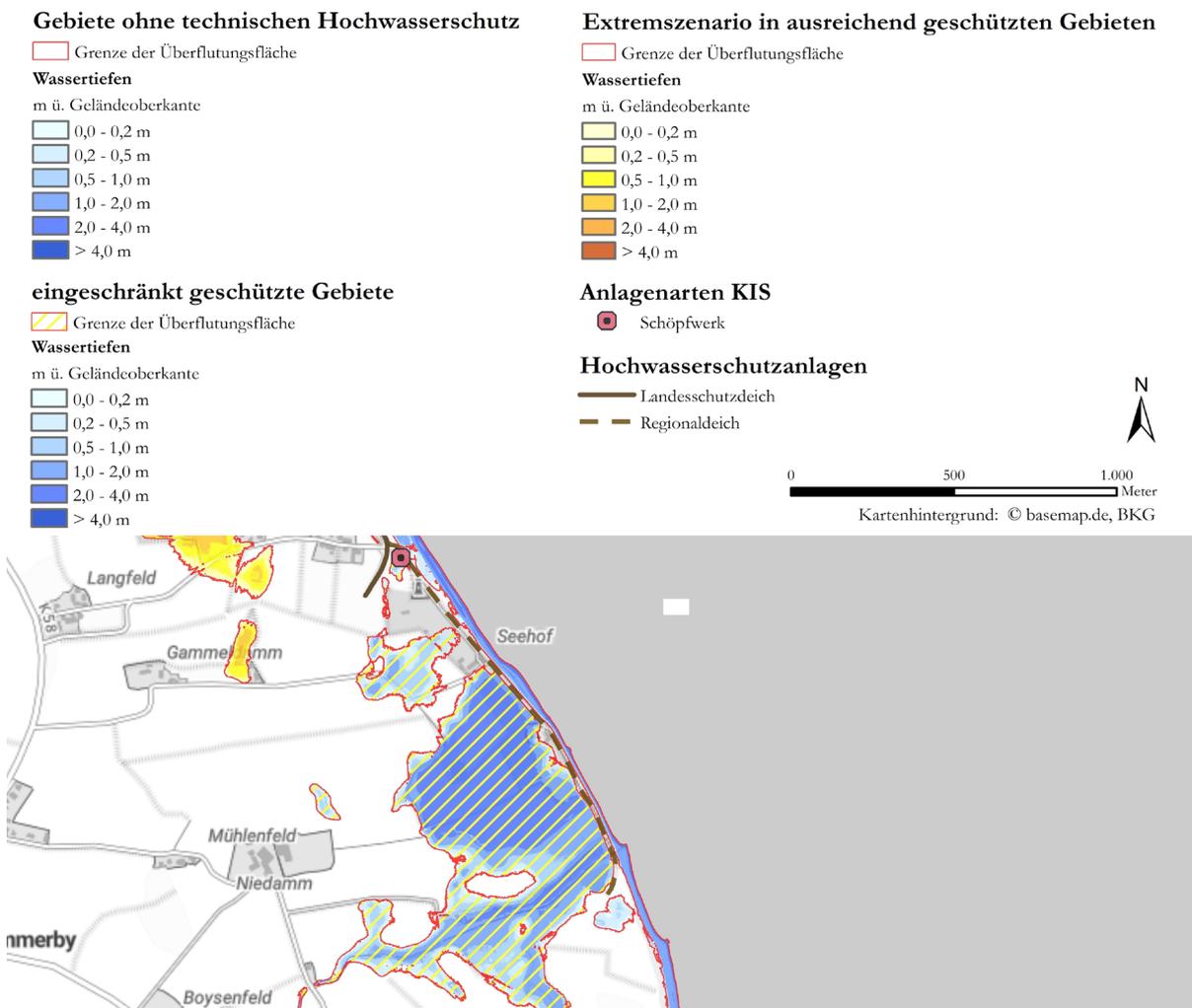


Abbildung 2: Beispiel einer Hochwassergefahrenkarte.

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 Auspiegelung 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
Weißenhau	-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 Sturmeebbe.

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

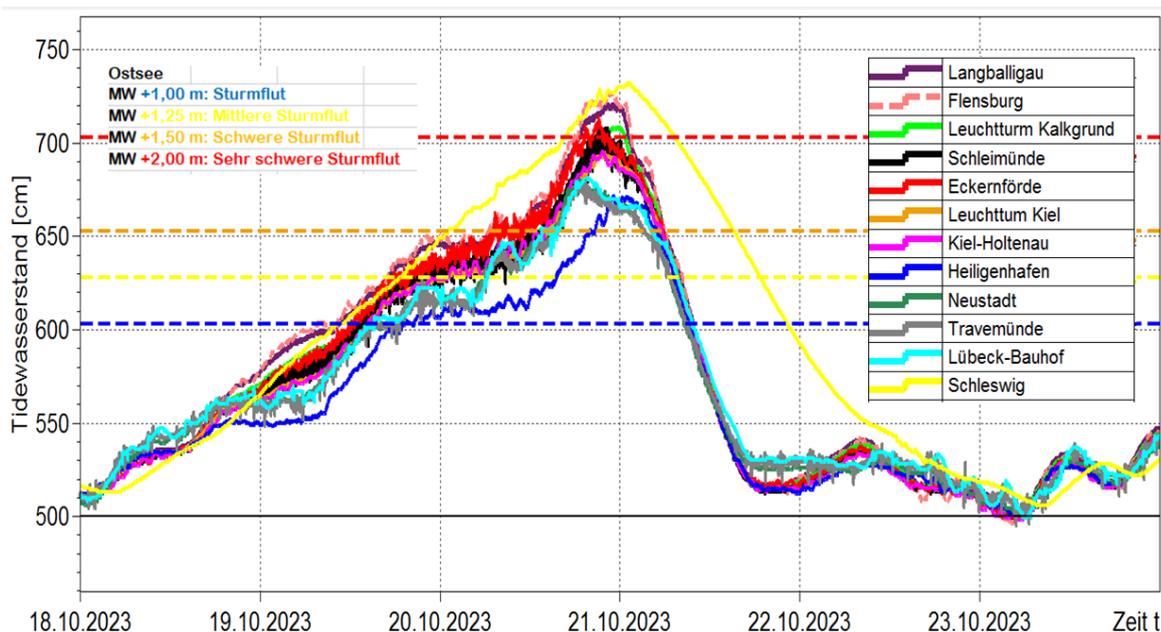


Abbildung 3: Wasserstandsganglinien an Pegeln der schleswig-holsteinischen Ostseeküste.

Tabelle 2: Überschreitungsdauer relevanter Wasserstände.

Pegel	Überschreitungsdauer [h]					
	1,00 m NHN	1,25 m NHN	1,5 m NHN	1,75 m NHN	2,00 m NHN	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	-	-
Weißenhau	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	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
	[cmNHN]	[cmNHN]	[cmNHN]	[cmNHN]	[cmNHN]	[cmNHN]	[cmNHN]							
Lübeck	280	290	338	222	197	206	208	143	187	199	178	179	177	179
Trave- münde	280		330	218	187	200	202	137	181	186	173	171	173	177
Neustadt			282	203			185	134	178	176	173	175	174	178
Marien- leuchte				187	137	183	160			189	163	157	164	166
Heiligen- hafen							174	135	154	185		162	170	172
Kiel			297	225	183	190	180	168	190	199	166	162	159	195
Eckern- förde			315	212	162		175	163	183	198	167	170	164	215
Schlei- münde			321	211			160	151		182	163	164	158	207
Schles- wig			325			182	170			148		124	105	229
Lang- balligau							170	157	182	185	170	170	162	220
Flens- burg		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.

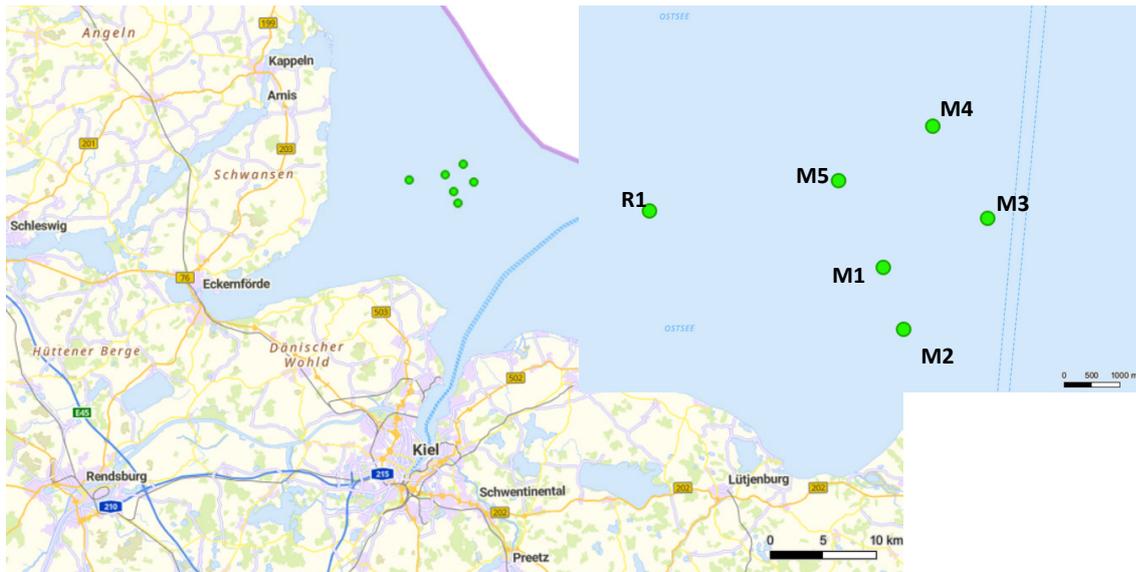


Abbildung 4: Lage der Seegangsmessstationen.

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.

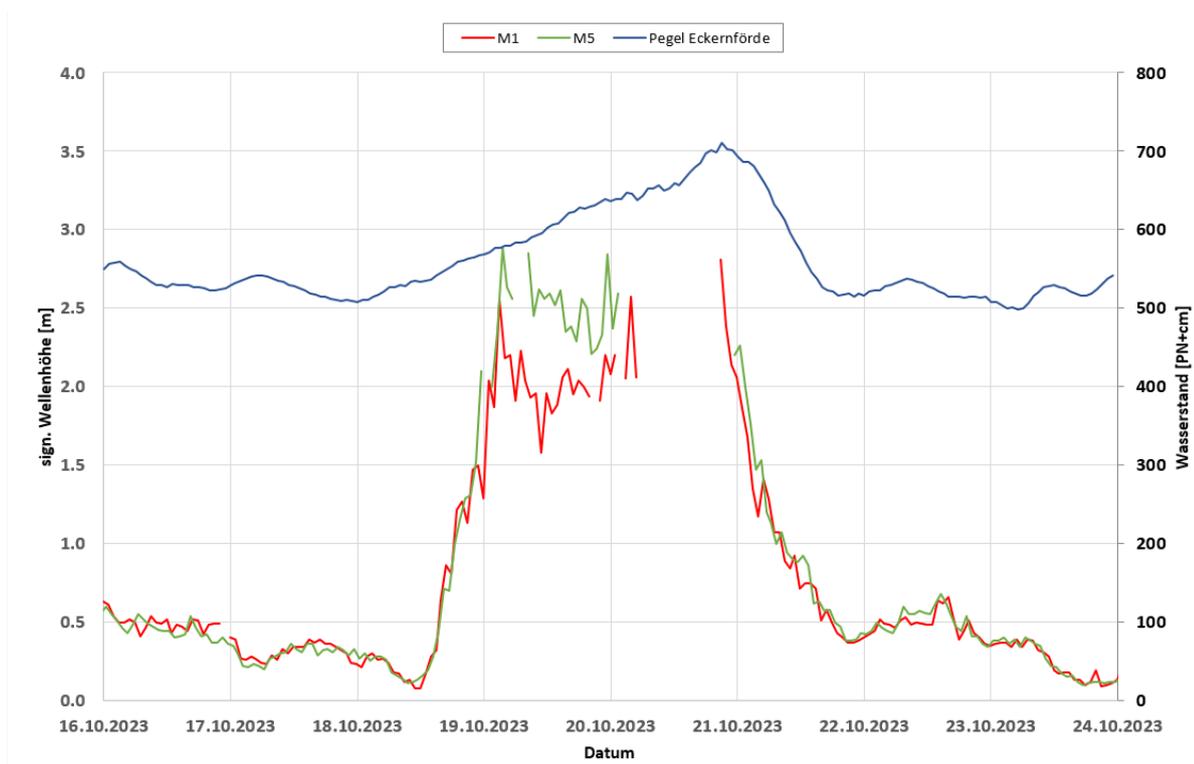


Abbildung 5: Signifikante Wellenhöhe an den Stationen M1 und M5.

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.

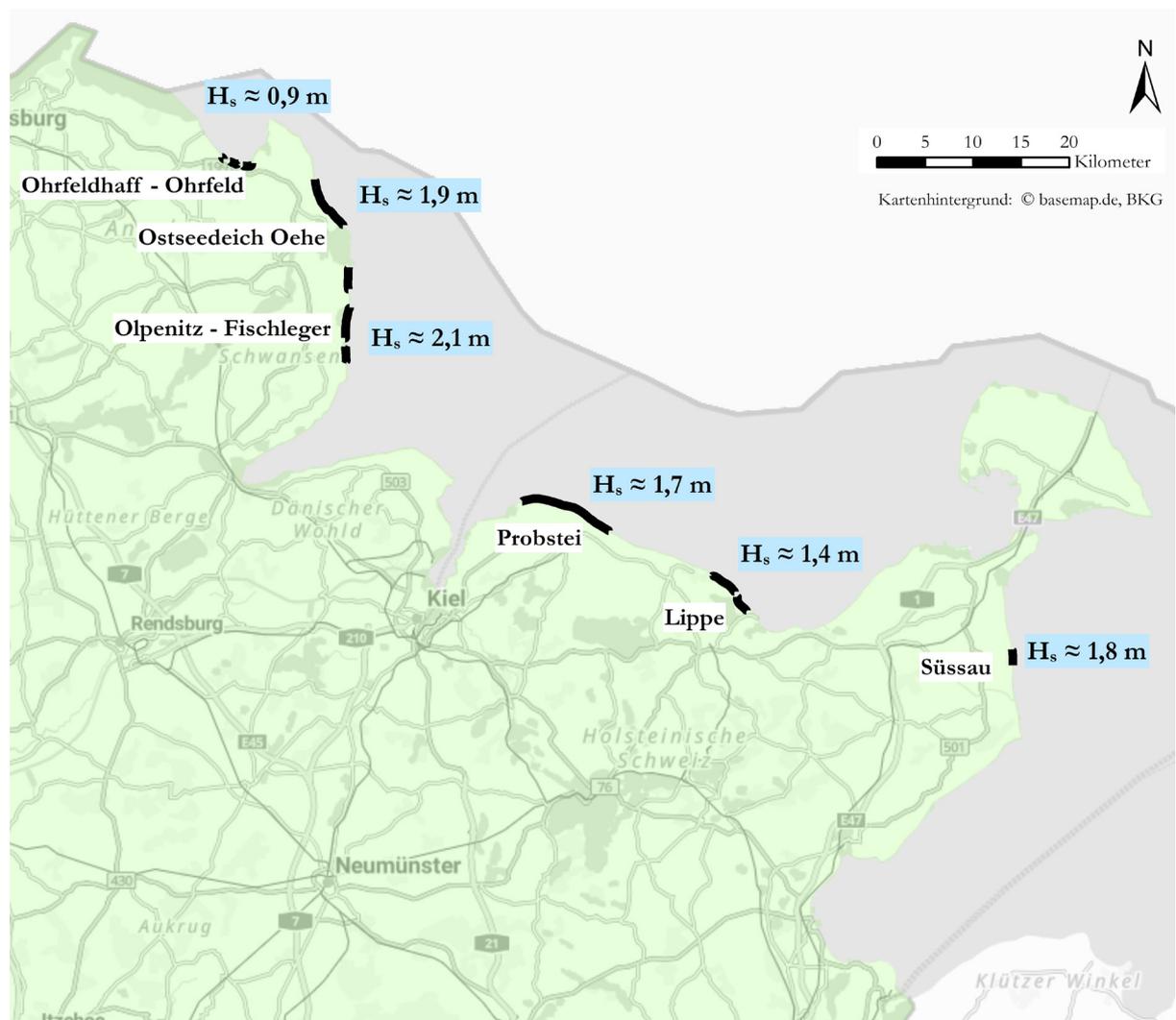


Abbildung 6: Abschätzung H_s gemäß StatWave im küstennahen Bereich, der Deich in der Probstei ist ein Landesschutzdeich, die übrigen sind Regionaldeiche.

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 Landesschutzdeiche 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 Landeschutzdeichs entsprechen, oder solche, bei denen die Deichkrone größere Lücken 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 $q > 2 \text{ l/(s*m)}$ 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.

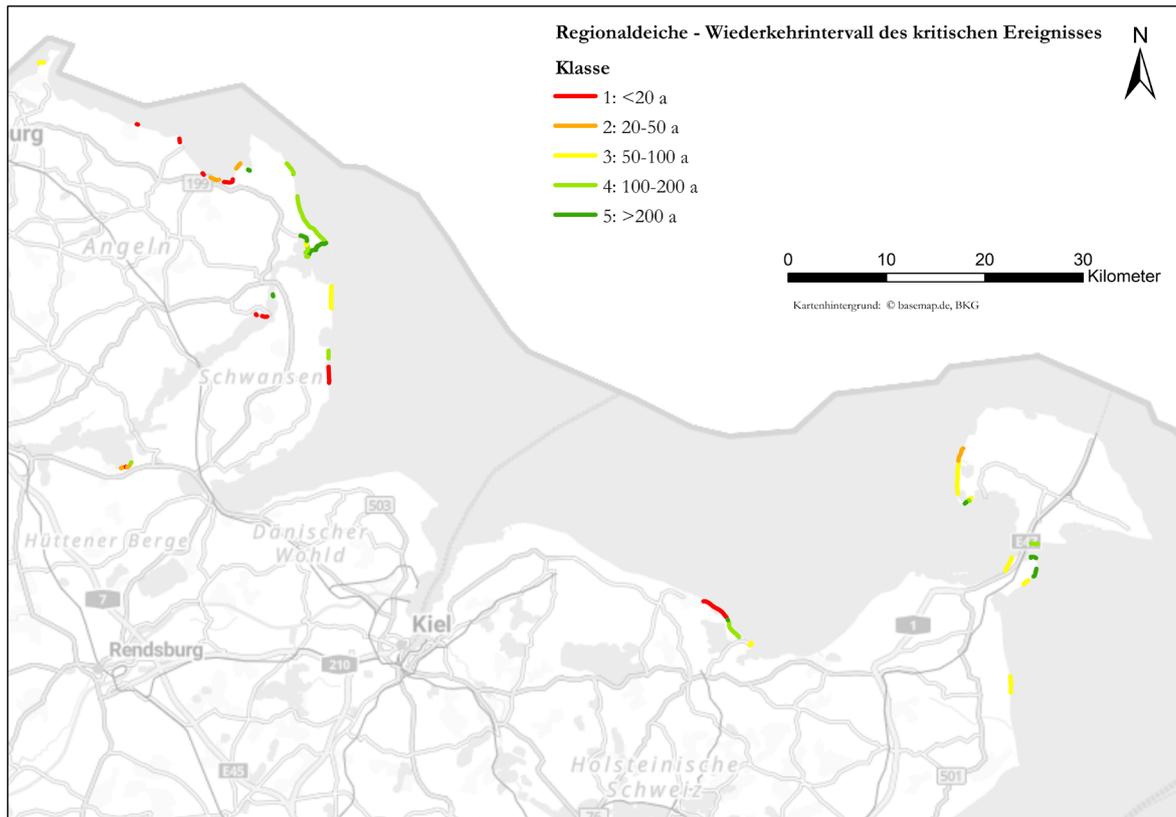


Abbildung 7: Sicherheitsüberprüfung Regionaldeiche Ostseeküste – Wiederkehrintervall des kritischen Ereignisses mit Wellenüberlauf $q > 2 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{m})$.

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:

- a) maximaler aufgetretener Wasserstand und berechneter Seegang zum selben Zeitpunkt
- b) 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.

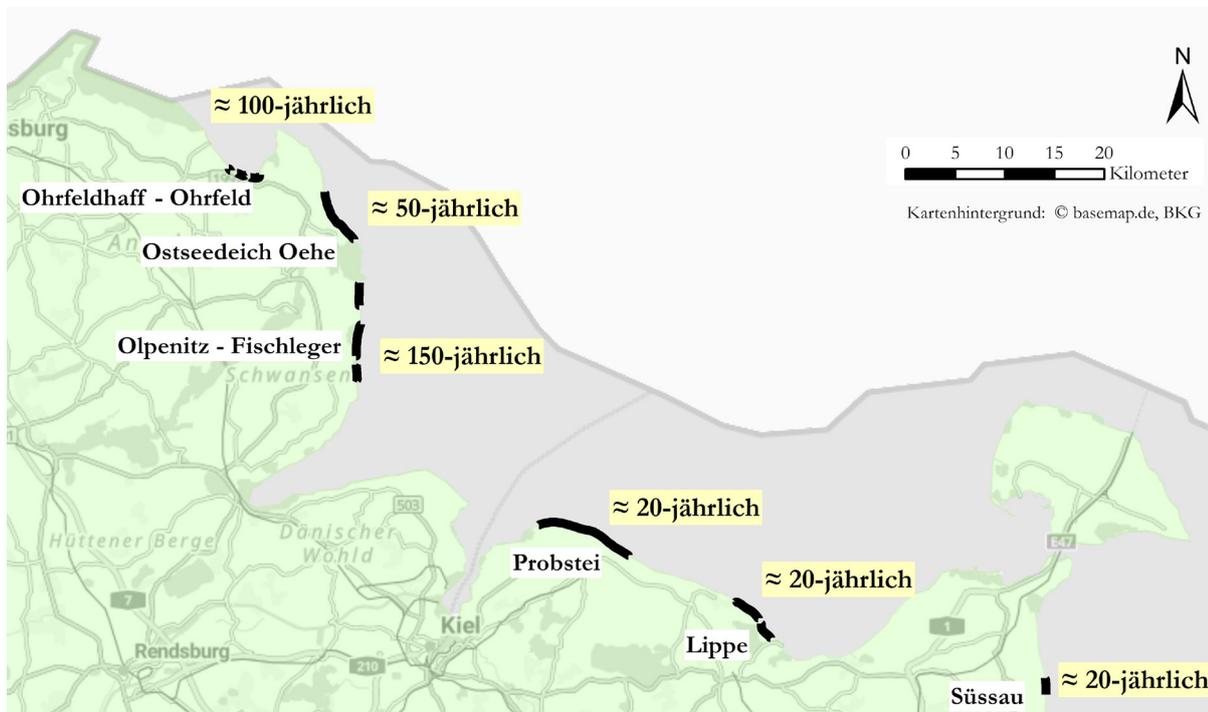


Abbildung 8: Kombinierte Jährlichkeit aus gemessenem Wasserstand und abgeschätztem Seegang an ausgewählten Küstenabschnitten.

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 $q > 2 \text{ l} / (\text{s} \cdot \text{m})$	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 $2 \text{ l} / (\text{s} \cdot \text{m})$ 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).

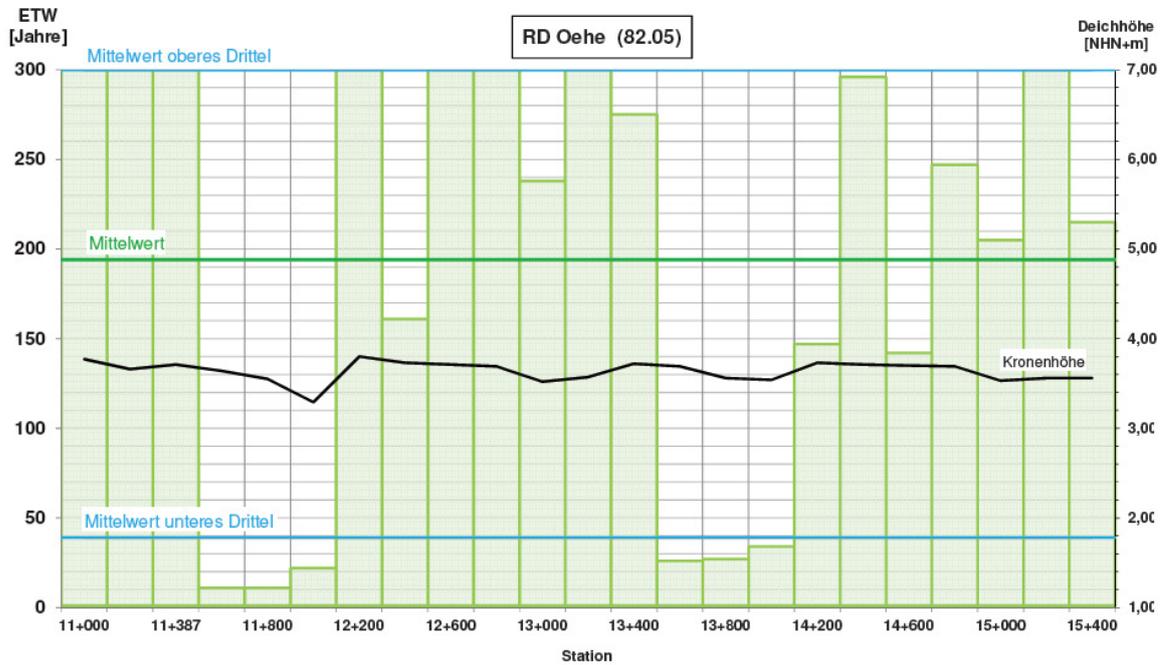


Abbildung 9: Wiederkehrintervall des kritischen Wellenüberlaufs $q > 2 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{m})$ am Regionaldeich Oehe (Abschnitt 82.05). Mittelwerte beziehen sich auf den gesamten Abschnitt.

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
Fleckeby (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 Behrendorf nicht zu berücksichtigen, wurde der Sicherheitszustand schlechter eingeschätzt, als er sich real verhalten hat. Die Regionaldeiche Watestelle (Arnis), Fleckeby (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 Seegangsbelastung 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 Schlei- und im Bereich Fehmarn. Die aktuellste Erfassung der gesamten Ostseeküste erfolgte 2021/2022.

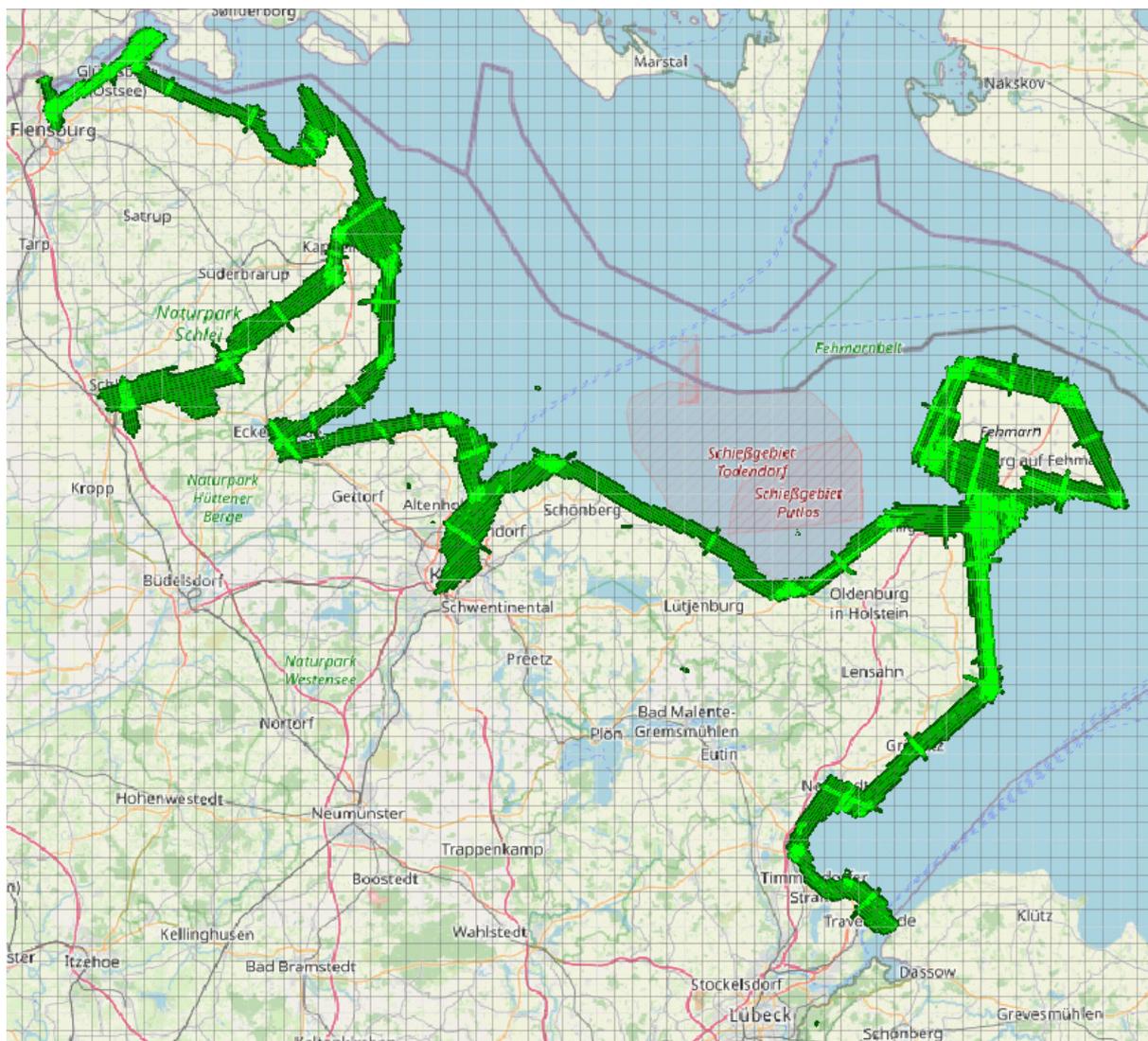


Abbildung 10: Flugstreifen Laserscanbefliegung 2024.

Um die morphologischen Veränderungen nach der Sturmflut von Oktober 2023 ermitteln zu können, wurde im Januar 2024 eine Gesamtbefliegung 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 Forschungs Kooperationen 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 Forschungsk Kooperation 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 Meeresspiegelanstiegs.

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 offengelegt, 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 Einzelereignis 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-fachplene_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.