

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, Wasserrwirtschaft 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 hochaufgelöst zu rekonstruieren und diese somit bei künftigen Planungsaufgaben von Küstenschutzanlagen zu integrieren.

Die Studie zielt auf die Bereitstellung von für den Küstenschutz relevanten Wasserstandsdaten 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 Wasserstandsdaten – werden die zeitlich und räumlich hochaufgelösten 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 Mittelschweden an der südwestlichen Ostsee drehten die Ostwinde zu einem ausgedehnten und langanhaltenden Oststurm. Die stärksten gemessenen Böen betragen 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 auflandigen 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 unbekanntem 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.

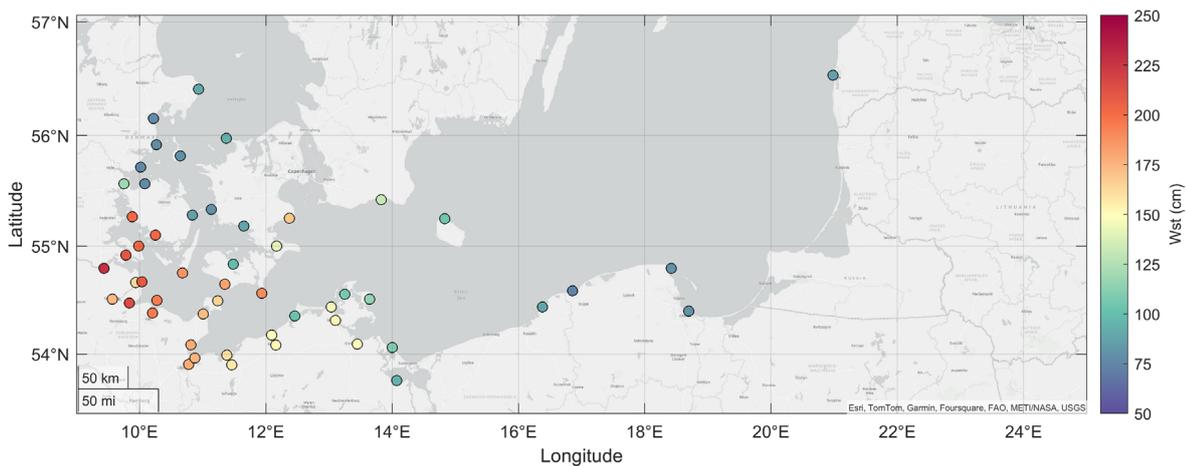


Abbildung 1: Maximale Wasserstände im Zeitraum 19.-23. Oktober 2023 an der südwestlichen Ostsee; (Quelle: *Global Ocean*).

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 Berechnungsmodule hinzugefügt 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 Commission* (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).

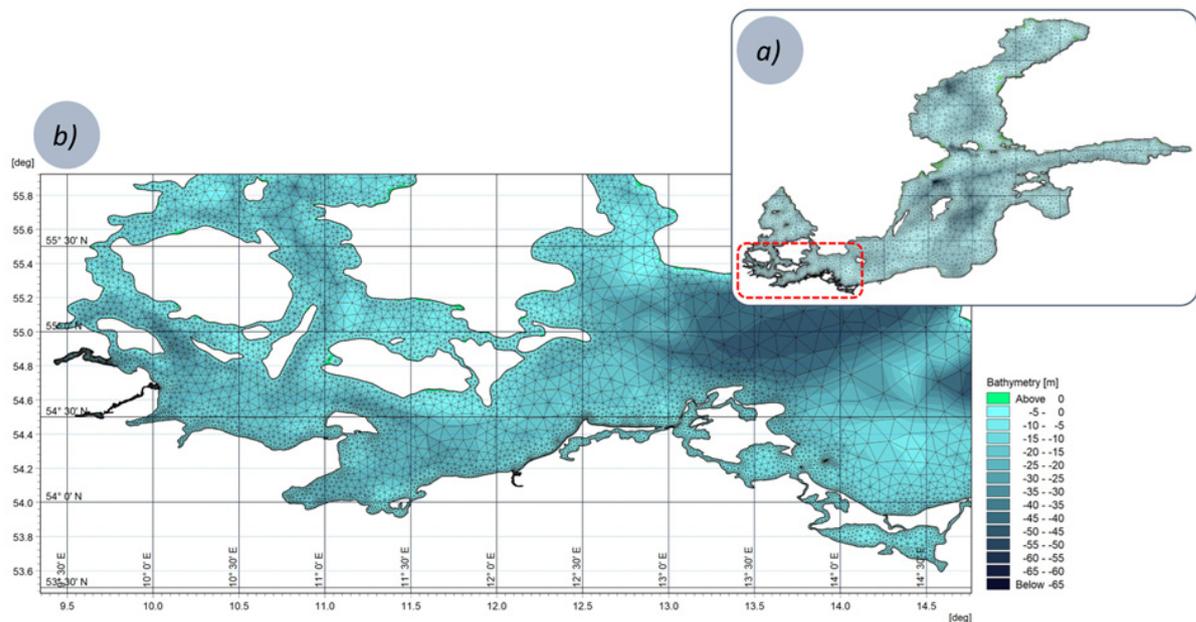


Abbildung 2: Darstellung der Modellfläche des Ostseemodells (a) und Ausschnitt für die deutsche Ostseeküste (b), inkl. der zugrundeliegenden Bathymetrie und des erstellten Berechnungsgitters.

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 Punkteabstand 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 Rauigkeitsansatz 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.

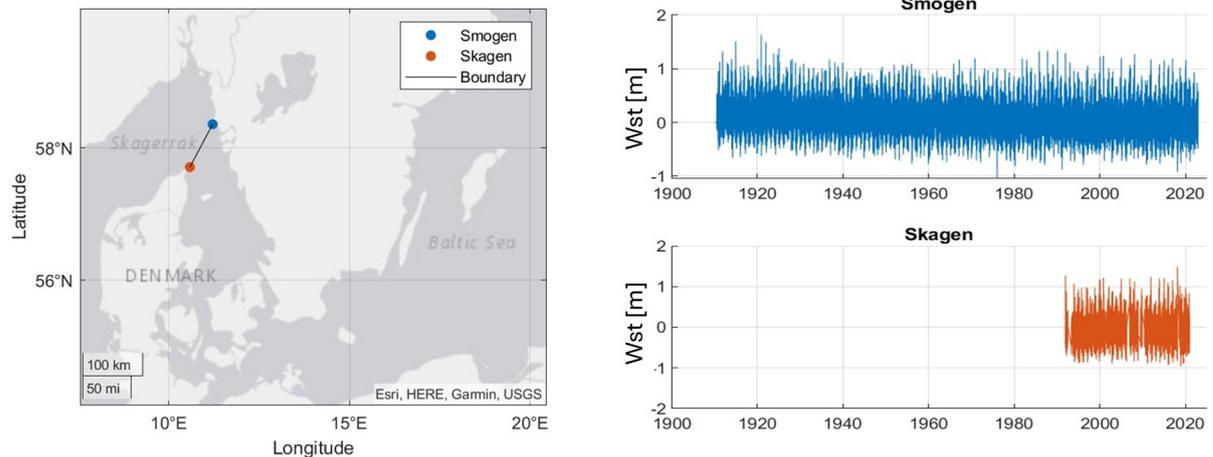
Variable	Produkt	Typ	Δt	$\Delta x / \Delta y$
Wind (10 m)	u_{10}	Reanalysis	1 h	31 km x 31 km
	v_{10}	Reanalysis	1 h	31 km x 31 km
Luftdruck	PMSL	Reanalysis	1 h	31 km x 31 km
Niederschlag	PREC	Ensemble Mean	3 h	31 km x 31 km
Verdunstung	EVA	Ensemble Mean	3 h	31 km x 31 km

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 *Smøgen* gewählt (vgl. Abbildung 3). Die Wasserstandsdaten des Pegels *Smøgen* wurden aus dem Datensatz *Global Ocean* des Copernicus Marine Service (CMEMS) bezogen. Die Pegelstände 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 Wasserstandsdaten 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 Sohl-schubspannung 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 Modelleistung 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 Modelleistung. 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:

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

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 akkuraten 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.

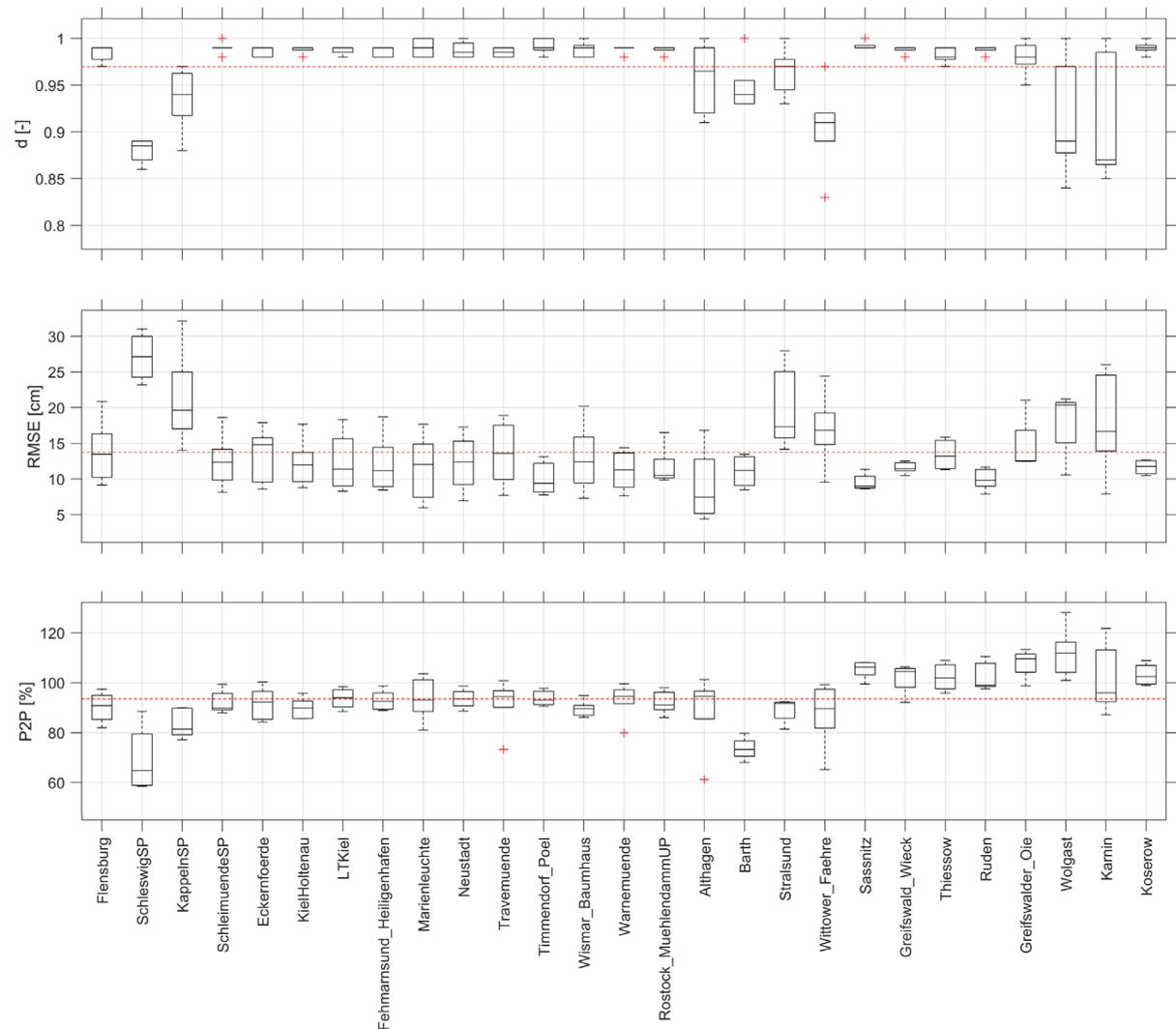


Abbildung 4: Statistiken für die Parameter des kalibrierten Modells anhand der höchsten Sturmhochwasserereignisse für Pegel entlang der südwestlichen Ostseeküste

Mit Gütekriterien von $\bar{d}=0,97$, $\overline{RMSE}=13,75$ cm und $\overline{P2P}=93,5$ % 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.

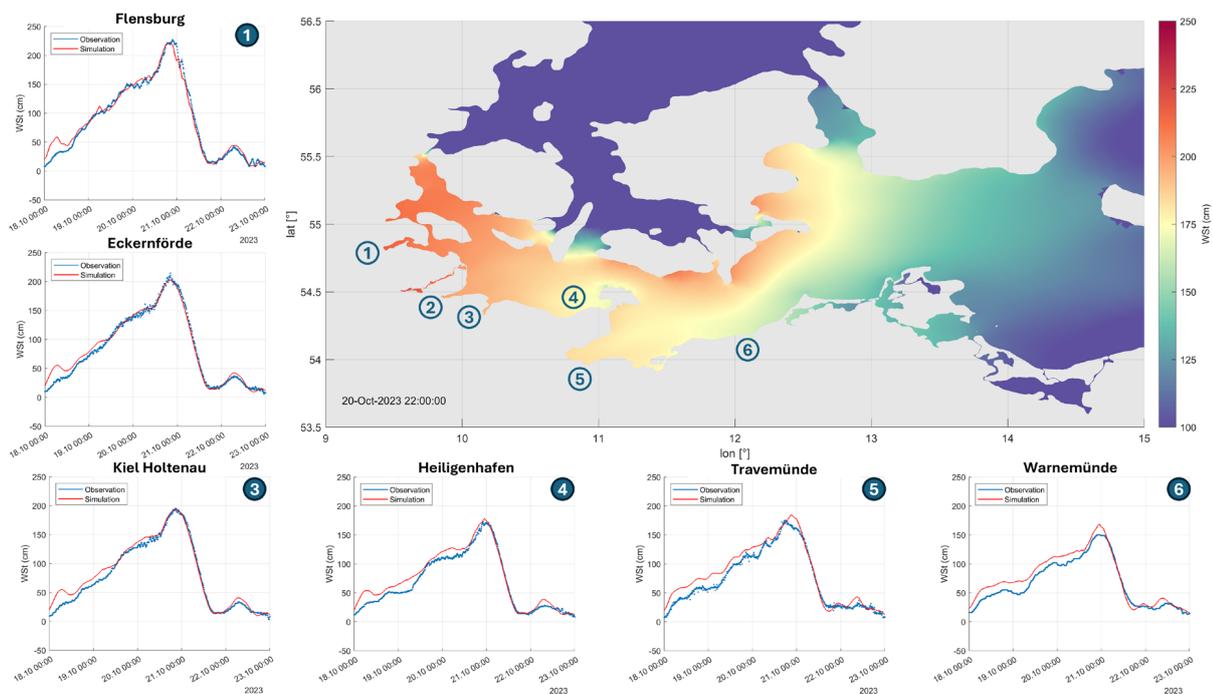


Abbildung 5: Gegenüberstellung der zeitlichen Verläufe der gemessenen und simulierten Wasserstände der südwestlichen Ostsee.

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 Sturmhochwassers“ 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.

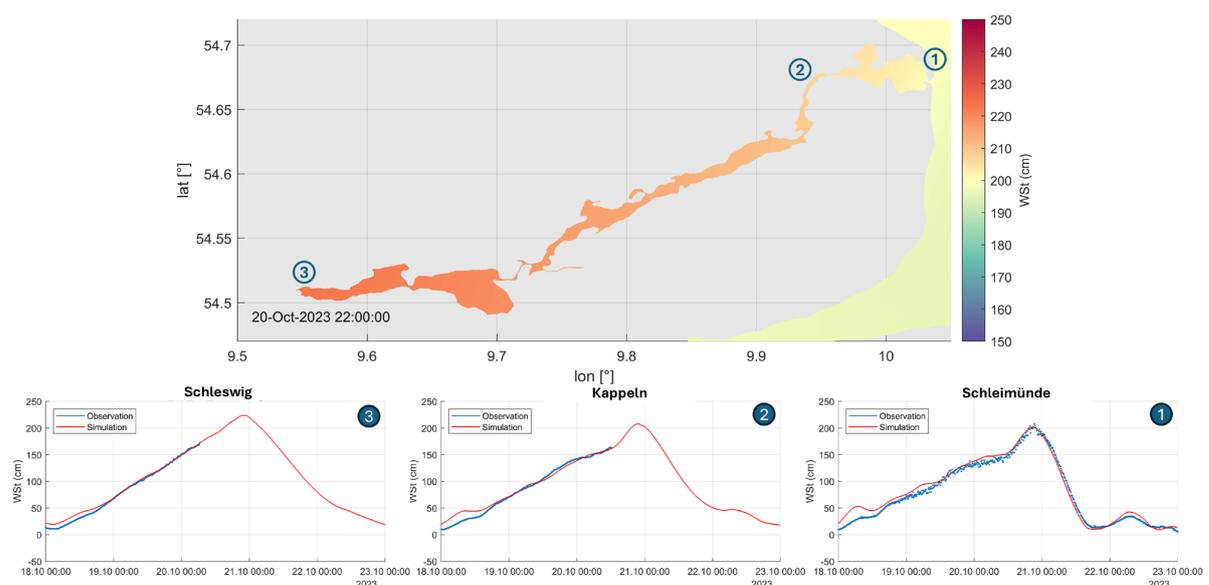


Abbildung 6: Wasserstände des Oktoberhochwassers 2023 in der Schlei.

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 Schwingungserscheinungen 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.

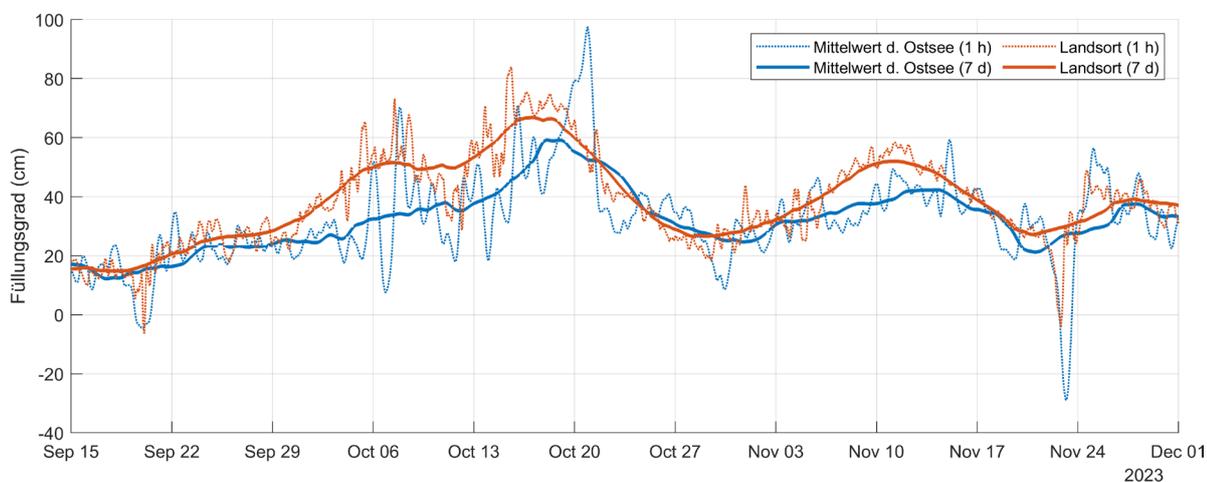


Abbildung 7: Ermittlung des Füllungsgrades der Ostsee: Vergleich zwischen dem im Schwingungsknoten liegenden Pegel *Landsort* (orange) und der gemittelten Wasserstände über die Ostsee (blau).

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). Schwingungserscheinungen im Bereich der südwestlichen, deutschen Ostseeküste prägen sich als Schwingungsbauch 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 Schwingungsbauch 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.

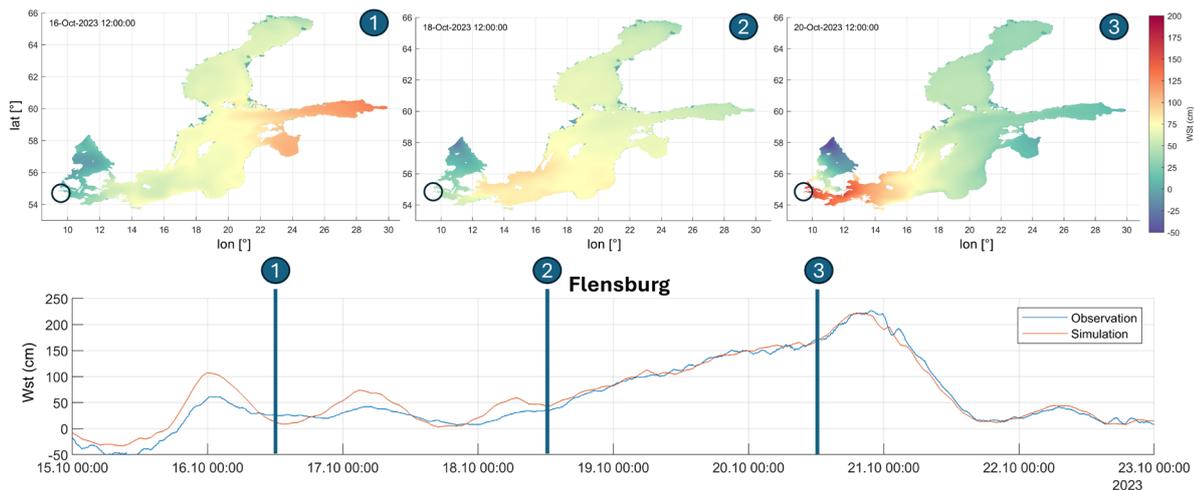


Abbildung 8: Wasserstandsentwicklungen (gemessen und simuliert) am Pegel Flensburg vom 15.10. bis zum 23.10.2023.

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.

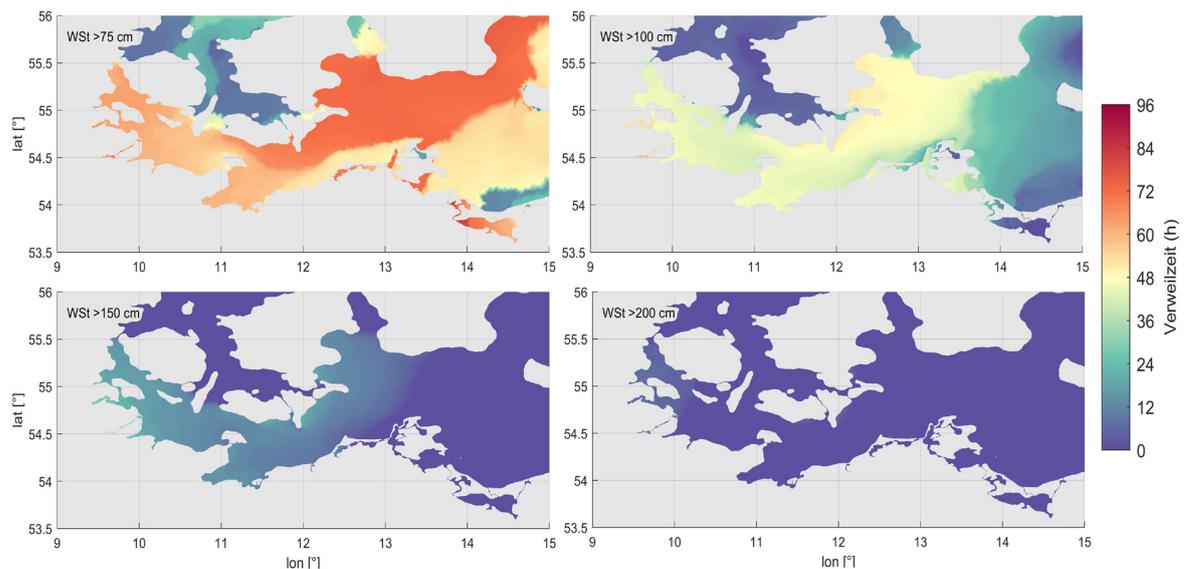


Abbildung 9: Verweilzeiten für die Überschreitung der Wasserstände von 75 cm; 100 cm, 150 cm und 200 cm.

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 Daueraufgabe, 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 Vorwarnsystem 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 Commission) 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-Institut 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.; 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*, <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 Küsteningenieurwesen, 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 Sturmweatherlage 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.