 https://doi.org/10.18171/1.095108

Untersuchungen zur Sturmflut 16./17. Februar 1962 unter heutigen und zukünftigen Randbedingungen

Elke M.I. Meyer[1] und Elisabeth Rudolph[2]

[1] Institut für Küstensysteme - Analyse und Modellierung, Helmholtz-Zentrum Hereon, Geesthacht, elke.meyer@hereon.de
[2] Bundesanstalt für Wasserbau, Wasserbau im Küstenbereich, Hamburg

Zusammenfassung

Die sehr schwere Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 gehört nicht mehr zu den zehn höchsten Sturmfluten in Hamburg. Die Höhe der Wasserstände der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 waren entlang der Elbe durch die damalige Deichhöhe limitiert und durch Deichbrüche sowie Überflutungen entlang der Elbe stark beeinflusst. Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 wird mit heutigen Küstenschutzmaßnahmen in der heutigen Topografie neu simuliert und der mögliche Wasserstand entlang der Elbe bestimmt. Der Wasserstand der neuberechneten Sturmflut von 1962 erreicht in Hamburg St. Pauli dieselbe Größenordnung wie die höchste bisher beobachtete Sturmflut vom 03. Januar 1976.
Zur Verifikation des eingesetzten Modells der Deutschen Bucht und der Elbe wird die Sturmflut vom 06. Dezember 2013 in gleicher Weise mit der heutigen Topografie und mit Wind aus dem atmosphärischen Reanalysedatensatz 20CRv3 modelliert und die Wasserstandsergebnisse mit Messungen verglichen. Die Erkenntnisse aus der Modellierung der Sturmflut 2013 fließen in die Modellierung der Sturmflut 1962 ein.
Zusätzlich werden verschiedene Sensitivitätsstudien durchgeführt. So führt das Schließen der Sperrwerke an den Elbenebenflüssen zu einer Erhöhung des Sturmflutscheitelwasserstandes um bis zu 5 cm entlang der Tideelbe. Wird aus dem 20CRv3-Ensemble die extreme Wettersituation mit dem höchsten Wasserstand in Cuxhaven herausgesucht und als Antrieb zur Berechnung des Wasserstandes entlang der Elbe verwendet, so erhöht sich der Sturmflutscheitelwasserstand in Cuxhaven um 10 bis 20 cm und in Hamburg St. Pauli um 30 bis 40 cm.

Für die Sturmflut von 1962 wurden zwei Meeresspiegelanstiegsszenarien und verschiedene Abflussszenarien der Elbe in einer Sensitivitätsstudie kombiniert. Die Ergebnisse quantifizieren die mögliche Bandbreite klimawandelbedingter Veränderungen extremer Wasserstände entlang der Tideelbe. Durch den Meeresspiegelanstieg erhöhen sich die Sturmflutscheitelwasserstände bis tief in die Elbe hinein. Eine gleichzeitige Zunahme des Abflusses aus der Binnenelbe erhöht zusätzlich den Sturmflutscheitelwasserstand im oberen Bereich der Tideelbe.

Schlagwörter

Extreme Sturmflut, Küstenschutz, Elbe, 16./17. Februar 1962, 06. Dezember 2013, Xaver, Meeresspiegelanstieg, Abfluss

This journal paper is published under a Creative Commons licence BY 4.0 NC ND.
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/
Received 11.02.2026, reviewed 05.05.2026, revised 03.07.2026, accepted 21.08.2026, available online 05.11.2026

Summary

The severe storm tide that hit Hamburg on 16/17 February 1962 is no longer among the ten highest on record. The height of the storm tide water levels on 16/17 February 1962 along the Elbe was limited by the height of the dykes at that time and was greatly influenced by dyke breaches and flooding along the river. The storm tide of 16/17 February 1962 is being re-simulated using today's coastal protection measures and current topography to determine the possible water level along the Elbe. The water level of the recalculated 1962 storm tide in Hamburg St. Pauli is the same as the highest storm tide observed to date, which occurred on 3 January 1976.

To verify the model used for the German Bight and the Elbe, the 6 December 2013 storm tide is modelled in the same way, using today's topography and wind data from the 20CRv3 atmospheric reanalysis dataset. The resulting water levels are then compared with measurements. The findings from modelling the 2013 storm tide are then incorporated into modelling the 1962 storm tide.

In addition, various sensitivity studies are carried out. For instance, closing the flood barriers on the Elbe tributaries results in a rise in the highest water level during storm tide by up to 5 cm along the tidal Elbe. Selecting the extreme weather situation with the highest water level in Cuxhaven from the 20CRv3 ensemble and using it to calculate the water level along the Elbe results in an increase of 10 to 20 cm in Cuxhaven and 30 to 40 cm in Hamburg St. Pauli.

A sensitivity study examining the potential impact of a rise in sea levels combined with various discharge scenarios for the Elbe during the 1962 storm tide reveals the potential range of changes in high water levels along the Elbe due to climate change. Sea level rise increases storm tide peak water levels deep into the Elbe. Simultaneously increasing discharge from the inland Elbe would further raise the peak storm tide water level in the upper reaches of the tidal Elbe.

Keywords

Extreme storm tide, coastal protection, Elbe, 16/17 February 1962, 6 December 2013, sea level rise, river discharge

1 Einleitung

Mit der Sturmflut vom 16. auf den 17. Februar 1962 ereignete sich eine der verheerendsten Naturkatastrophen an der deutschen Nordseeküste. Die Scheitelwasserstände der Sturmflut 1962 erreichten und überschritten an zahlreichen Pegeln in der Deutschen Bucht die bis dahin bekannten höchsten Wasserstände (HHThw; Petersen (1967)). Durch Deichbrüche wurden große Gebiete entlang der Elbe und ihrer Nebenflüsse sowie tiefliegende Hamburger Gebiete und der Hamburger Hafen überflutet. Der maximale Wasserstand erreichte NHN+5,70 m am Pegel Hamburg St. Pauli (Meter über Normalhöhennull (m ü. NHN)). Dieser Wert gehört seit Februar 2022 in Hamburg St. Pauli nicht mehr zu den zehn höchsten gemessenen Wasserständen DGJ (2024b). Es stellt sich die Frage, wie hoch die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 unter heutigen topografischen Bedingungen auflaufen würde. Zum Beispiel erreichte die Sturmflut vom 06. Dezember 2013 unter heutigen topografischen Bedingungen mit NHN+6,08 m den zweithöchsten gemessenen Wasserstand in St. Pauli (siehe Tabelle 2 im Anhang).

Beide Sturmfluten (1962 und 2013) waren aus atmosphärischer Sicht ein Nordwest-Typ (Gerber et al. 2016, Kruhl 1978) oder werden auch als Skandinavientyp (Petersen und

Rhode 1991, Prügel 1942, Schelling 1952) kategorisiert. Bei diesem Typ bewegt sich ein Tiefdruckgebiet am nördlichen Rand der Nordsee über Skandinavien nach Osten und gleichzeitig intensiviert sich ein Hochdruckgebiet über der Biskaya. Diese Wetterlage erzeugt einen großen Luftdruckgradienten über der zentralen Nordsee mit langanhaltenden kräftigen Winden aus Nordwest (LSBG 2014, Meyer und Gaslikova 2024, Petersen und Rhode 1991). Diese historischen Wetterlagen (1962 und 2013) können mit aktuellen Atmosphärenmodellen, die darauf spezialisiert sind, historische Daten zu assimilieren, sehr gut simuliert werden. Das Atmosphärenmodell assimiliert z. B. beobachtete Druck-, Temperatur-, Wind- und Eisdaten und erstellt eine historische Wettervorhersage, sprich Reanalyse. Meyer und Gaslikova (2024) haben historische extreme Sturmfluten mit atmosphärischen Reanalysedaten und einem hydrodynamischen Modell für die Nordsee untersucht. Gute Ergebnisse sind für die Sturmfluten vom Nordwesttyp vom 16./17. Februar 1962, 21. Januar 1976 und 06. Dezember 2013 erzielt worden.

Meyer und Gaslikova (2024) verwendeten für die Simulationen von historischen Sturmflutereignissen z. B. die 20th Century Reanalysis Daten (20CRv3; Compo et al. 2011, Slivinski et al. 2019) mit 80 Ensemble-Mitgliedern, d. h. mit 80 möglichen Wettervorhersagen für den jeweiligen Sturmflutzeitraum. Simulationen mit einigen Ensemble-Mitgliedern zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Wasserständen. Bisher fehlten realistische Reanalysedaten, mit denen die Sturmflut von 1962 simuliert werden kann (Bork und Müller-Navarra 2006, Müller-Navarra et al. 2006). Atmosphärische Reanalyseprodukte vom ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) zeigen eine Unterschätzung bei Sturmwetterlagen mit Windgeschwindigkeiten größer als 25 m/s (Meyer und Gaslikova 2024, Gandoin und Garza 2024, Haakenstad et al. 2021 und Dullaart et al. 2020).

Für Fragen des Küstenschutzes ist es wichtig, mögliche Wasserstände entlang der Küste und der Ästuare abschätzen zu können. Mit dem Ausbau des Küstenschutzes entlang der Elbe sowie den Anpassungen des Elbefahrwassers an die Erfordernisse der Schifffahrt ist sowohl das mittlere Hochwasser am Pegel Hamburg St. Pauli als auch der Wasserstand bei Sturmfluten im Vergleich zu Cuxhaven kontinuierlich angestiegen (Fickert und Strotmann 2007, HPA 2026).

Hydrodynamisch-numerische Modelle der Nordsee (Meyer und Gaslikova 2024) bzw. der inneren Deutschen Bucht mit den Ästuaren von Elbe, Jade-Weser und Ems (Rudolph et al. 2019) erlauben es, unter Einbeziehung der aktuellen Reanalysedaten, Sturmfluten aus den vergangenen 100 Jahre detailliert zu untersuchen. Sie eröffnen die Möglichkeit, nicht nur ausgewählte Sturmflutszenarien in der heutigen Topografie mit aktuellem Sturmflutschutz zu betrachten, sondern auch auf Grund der vielen Ensemble-Mitglieder die Bandbreite der möglichen Sturmflutszenarien für einen Zeitpunkt zu untersuchen.

Um den gewählten Ansatz zu verifizieren, wird zuerst die Sturmflut vom 06. Dezember 2013 mit ausgewählten atmosphärischen Reanalysedaten aus 20CRv3 in der aktuellen Topografie simuliert und die simulierten Wasserstände mit Beobachtungen verglichen. Die Erkenntnisse aus der Modellierung der Sturmflut 2013 (Kapitel 5) werden für die Modellierung der Sturmflut 1962 mit der heutigen Topografie (Kapitel 6) genutzt, um den modellierten Sturmflutscheitelwasserstand unter aktuellen Bedingungen einordnen zu können.

Der Einsatz von hydrodynamisch-numerischen Modellen erlaubt, Sensitivitätsstudien durchzuführen, um zum Beispiel die Wirkung von Hochwasserschutzmaßnahmen (Sperrwerke der Nebenflüsse), siehe Kapitel 7.1 oder die Wirkung des atmosphärischen Antriebs

auf die Höhe des Sturmflutscheitelwasserstandes zu analysieren (Kapitel 7.2). Der mögliche Einfluss des Klimawandels in Form von Meeresspiegelanstieg in der Deutschen Bucht und Abfluss aus der Mittelelbe für die Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Tideelbe werden anhand der Sturmflut von 1962 in Kapitel 7.3 analysiert. Vergleichbare Experimente wurden im Projekt EXTREMENESS (Weisse et al. 2019, Rudolph et al. 2019) durchgeführt, jedoch nicht mit Fokus auf die historische Sturmflut von 1962.

Im folgenden Kapitel 2 gehen wir auf die Entwicklung des Küstenschutzes an der Elbe ein und stellen seine Bedeutung für die Höhe von historischen Sturmfluten dar. Wir skizzieren anschließend die Basis für die Sturmflutuntersuchungen in der Elbe (Kapitel 3) und stellen die eingesetzten hydrodynamisch-numerischen Modelle der Nordsee und der Deutschen Bucht vor (Kapitel 4).

2 Bedeutung des Küstenschutzes für die Wasserstände an der Elbe von 1825 bis heute

Zur Bestimmung der Deichhöhen im Bereich der Tideelbe wurden bis 1962 die höchsten bekannten Wasserständen zugrunde gelegt (Klinge 1962, Hundt 1955). Die bis zum 16./17. Februar 1962 in Hamburg aus früheren Jahrzehnten bekannte höchste Sturmflut ist die Sturmflut vom 03./04. Februar 1825, bei der ein höchster Wasserstand von 5,20 m über NHN erreicht wurde. Dieser Wert war seitdem maßgebend für die Sicherheit im hamburgischen Raum und danach wurde die Kronenhöhe der Hamburger Deiche auf NHN+5,70 m festgelegt (Freistadt 1962). Zwischen 1825 bis 1962 waren es 22 Sturmfluten mit Wasserstände höher als NHN+4,20 m (d. h. 2,50 m höher als das mittlere Tidehochwasser (MThw), d. h. schwere Sturmflut), jedoch erreichte nach 1855 bis 1962 keine Sturmflut in Hamburg einen Wasserstand von NHN+4,70 m (siehe z. B. Abbildung 1 in Freistadt (1962) oder Tabelle 2). Aufgrund der verheerenden Hollandflut von 1953 wurden die Deiche in Hamburg überprüft und eine Deicherhöhung geplant. Diese war 1962 jedoch noch nicht umgesetzt (Freistadt 1962). Auf eine Sturmflut des Ausmaßes vom 16./17. Februar 1962 war der Sturmflutschutz an der Elbe und in Hamburg nicht vorbereitet. Viele Deiche wurden überströmt und brachen. Weite Gebiete entlang der Elbe wurden überflutet.

Da der Sturmflutscheitelwasserstand in Hamburg 1962 durch die Deichhöhe und die Deichbrüche limitiert war, stellt sich die Frage, welche Wasserstände unter heutigen Voraussetzungen, d. h. mit heutigem Küstenschutz und aktuellem Ausbauzustand der Elbe, während der Sturmflut erreicht werden könnten. Nach 1962 wurden umfangreiche Küstenschutzmaßnahmen, wie Deicherhöhungen, Eindeichungen entlang der Elbe und in Hamburg verbunden mit einer Verkürzung der Deichlinie oder Sturmflutsperrwerken an den Nebenflüssen der Elbe (Kübler 1979) sowie Anpassungen an die Erfordernisse der Schifffahrt durch z. B. Vertiefung des Fahrwassers der Elbe und des Hamburger Hafens, Umbau des Hafens für den Containerumschlag oder der Bau des Wehrs Geesthacht (Siefert 1998) umgesetzt. Diese Maßnahmen führen zu einer Zunahme des Tidehochwassers (Thw) und einer Abnahme des Tideniedrigwassers (Tnw) entlang der Tideelbe (Siefert 1998). Durch den Vergleich von gemessenen Werten des Sturmflutscheitelwasserstandes zwischen Cuxhaven (fast unbeeinflusst) und Hamburg St. Pauli (durch die genannten Maßnahmen beeinflusst) kann die Wirkung der Baumaßnahmen in der Tideelbe abgeschätzt werden (Siefert 1998). Es wird deutlich, dass sich zwischen 1950 und 1990 die mittlere Höhendifferenz im Wasserstand zwischen Hamburg St. Pauli und Cuxhaven um circa

60 cm auf etwa 100 cm erhöht hat (Siefert 1998). Dieser Wert ist seit 1990 weitgehend stabil (FHH 2014). Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass seit 2002 Ausbau- und Neubaumaßnahmen von Bundeswasserstraßen so durchgeführt werden müssen, dass mehr als geringfügige Auswirkungen auf den Hochwasserschutz vermieden werden (siehe §12 im WaStrG; BMV 2025).

Aus heutiger Sicht erreicht die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 in Cuxhaven mit NHN+4,95 m nach der Sturmflut vom 03. Januar 1976 (NHN+5,10 m) den zweit-höchsten beobachteten Wasserstand (siehe Tabelle 2). Die Sturmfluten von 2013 und 1825 folgen auf Platz 4 und 5 (DGJ 2024a). In Hamburg St. Pauli erreichte die Sturmflut vom 03. Januar 1976 mit NHN+6,45 m den höchsten gemessenen Wasserstand gefolgt von der Sturmflut vom 06. Dezember 2013 mit NHN+6,08 m (siehe Tabelle 2). Dagegen gehört seit Februar 2022 die Sturmflut von 1962 mit einem Sturmflutscheitelwasserstand von NHN+5,70 m nicht mehr zu den zehn höchsten beobachteten Sturmfluten in Hamburg (siehe Tabelle 2 bzw. DGJ 2024b, HPA 2026).

3 Grundlagen der Untersuchung

In Meyer und Gaslikova (2024) wurden Simulationen von extremen historischen Sturmfluten mit Fokus in der Deutschen Bucht mit verschiedenen atmosphärischen Antriebsdaten aus Reanalysen vorgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass einige Simulationen (z. B. für 16./17. Februar 1962, 20./21. Januar 1976, 06. Dezember 2013) mit einem hydrodynamischen Modell, die mit Daten aus dem 20CRv3 Datensatz angetrieben wurden, die gemessenen Wasserstände an der Küste gut wiedergaben. Der 20CRv3 Datensatz besteht aus 80 Ensemble-Mitgliedern, d. h. für jedes Sturmflutszenario liegen 80 gleichwahrscheinliche Realisierungen der atmosphärischen Entwicklung im Sturmflutzeitraum mit einer zeitlichen Auflösung von drei Stunden und einer räumlichen von 1°x1°vor. Aus den jeweils 80 Realisierungen der Sturmflutzeiträume SF2013 und SF1962 im Nordseemodell, wurden für die Untersuchung in der Deutschen Bucht und dem Elbeästuar jeweils diejenigen ausgewählt, die die beste Übereinstimmung im Wasserstandsverlauf in der Elbmündung bei Cuxhaven im Vergleich zur Messung haben (SF2013_bester, SF1962_bester) und als Randwerte für das Deutsche-Bucht-Modell verwendet (Meyer 2023).

Um zu analysieren, welche extremen Sturmflutwasserstände entlang der Elbe mit den Daten aus den 20CRv3-Ensembles außerdem möglich sind, wird zusätzlich das Ereignis betrachtet, das die höchsten Wasserstände in Cuxhaven erreicht (SF2013_extrem, SF1962_extrem).

Die extremen Sturmfluten vom 03. Januar 1976 und 03. Dezember 1999 entstanden aus einer anderen Wetterlage (West-Südwest-Typ bzw. Jütland-Typ, siehe (Gerber et al. 2016, Kruhl 1978, Prügel 1942). Die Wasserstände dieser beiden extremen Sturmfluten konnten mit den atmosphärischen Daten von 20CRv3 und allen anderen Reanalyseprodukten als atmosphärischen Antrieb nicht vergleichbar gut simuliert werden (Meyer und Gaslikova 2024). Der Hauptgrund hierfür ist, dass die atmosphärischen Modelle der Reanalyseprodukte die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe bei extremen Stürmen und Orkanen unterschätzen (Gandoin und Garza 2024, Haakenstad et al. 2021).

4 Die hydrodynamisch-numerischen Modelle

Für die Untersuchungen wurden zwei hydrodynamisch-numerische Modelle verwendet, die den gleichen Ursprung haben (Casulli und Cheng 1992), aber unterschiedliche Weiterentwicklungspfade genommen haben. Beide Modelle basieren auf dem Modellverfahren TRIM (tidal, residual and intertidal mudflat; Cheng et al. 1993), welches Trockenfallen und Überfluten von Wattflächen ermöglicht. Simulationen für die Nordsee und den Osten des Nordatlantiks sind mit TRIM-NP (Kapitza 2008) gemacht worden, um den Einfluss des Wetters (Luftdruck und Windgeschwindigkeit) über dem Atlantik und dessen Wirkung auf den Wasserstand zu simulieren. TRIM-NP ist für viele Anwendungen genutzt und getestet, z. B. historische Extremereignisse (Meyer et al. 2022, Meyer und Gaslikova 2024) für multidekadische Wasserstandssimulationen (Gaslikova et al. 2013) oder Driftsimulationen (Callies et al. (2011)) und validiert worden (Pätsch et al. 2017). Liu et al. (2026) ermitteln für einen Zeitraum von zehn Jahren RMSE-Werte des Modells gegenüber den Beobachtungen von 0,21 m für Helgoland, 0,23 m für Norderney und 0,20 m für Hörnum. TRIM-NP simuliert mit einer Gitterauflösung von 12,8 km x 12,8 km den Nordatlantik, Nordsee und Ostsee (Gitter 1) mit stündlicher Ausgabe. Die Nordsee wird mit drei weiteren Gittern (6,4 x 6,4 km; 3,2 x 3,2 km und 1,6 x 1,6 km) höher aufgelöst simuliert, wobei die Deutsche Bucht die höchste Auflösung hat. Die Ergebnisse aus den historischen TRIM-NP-Simulationen (Meyer und Gaslikova 2024) gehen als Antriebsdaten am Rand des Deutsche-Bucht-Modells zur Nordsee ein.

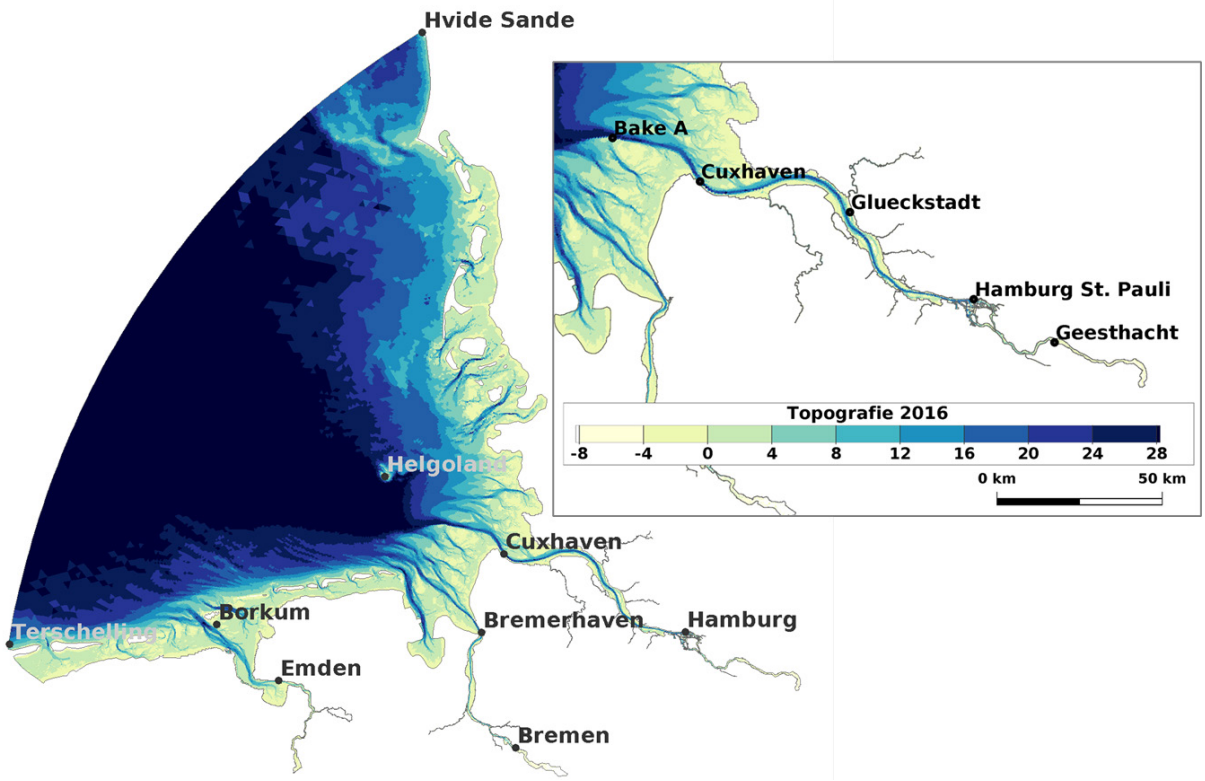


Abbildung 1: Modellgebiet mit der Topografie des Deutsche-Bucht-Modells (links) mit einer vergrößerten Darstellung des Elbeästuars (rechts).

Für die hochaufgelöste Simulation der Sturmfluten in der Deutschen Bucht und dem Elbe-Ästuar wird das hydrodynamisch-numerische Verfahren UnTRIM² (Casulli 2008, Casulli und Stelling 2010) verwendet. UnTRIM² ist ein dreidimensionales Finite-Differenzen

Verfahren. Es löst die Flachwassergleichungen und die Transportgleichungen für Salz auf einem unstrukturierten orthogonalen Gitter unter Berücksichtigung der SubGrid Technologie. UnTRIM² eignet sich für Anwendungen in geometrisch komplexen Ästuaren mit regelmäßigem Trockenfallen und Überfluten großer Wattflächen (Sehili et al. 2014).

Das Deutsche-Bucht-Modell umfasst das in Abbildung 1 (links) dargestellte Gebiet der inneren Deutschen Bucht mit den Ästuaren der Ems (bis zum Küstenkanal), der Weser (bis Intschede) und der Elbe (bis Bleckede), und enthält somit auch die stromauf der Tidegrenze gelegenen, von Sturmfluten betroffenen Gebiete im deutlich flacheren Binnenbereich von Elbe, Weser und Ems. Im Binnenbereich wird der Wasserstand durch die Höhe des Abflusses bestimmt, jedoch werden bei Sturmflut die Wasserstände im an den Tidefluss angrenzenden Binnenbereich zusätzlich durch die Sturmflut beeinflusst, siehe z. B. BAW (2018). Für die hier vorgestellten Untersuchungen wird angenommen, dass die Wehre Herbrum und Bollingerfähr in der Ems, Hemelingen in der Weser und Geesthacht in der Elbe im Untersuchungszeitraum gelegt sind. Die landseitige Modellgrenze wird durch den heutigen Verlauf der Deichlinie gebildet. Der Deich kann im Modell nicht überflutet werden oder brechen. Die Nebenflüsse von Ems, Weser und Elbe sind in der Modelltopografie enthalten, während der Sturmflutuntersuchungen sind sie jedoch durch geschlossene Sturmflutsperrwerke geschützt. Die Topografie des Deutsche-Bucht-Modells ist auf der Grundlage des DGM-W 2016 (WSV 2018) erstellt. Abbildung 5 (unten) zeigt das Längsprofil der auf NHN bezogenen Sohllage der Fahrrinnenachse der Elbe in der Topografie des Deutsche-Bucht-Modells von der Elbmündung (Bake A bei Elbe-km 755) über den Hamburger Hafen, das Wehr Geesthacht bis in den Binnenbereich bei Elbe-km 550 (Bleckede). Die Topografie aus dem Jahr 2016 entspricht weitgehend der topografischen Situation während der Sturmflut im Dezember 2013. Für Modelluntersuchungen mit der Topografie 2022 auf Grundlage des DGM-W-2022 (WSV 2024) sind keine grundlegenden Änderungen der Wasserstände zu erwarten.

Die Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht und in den Ästuaren wird bestimmt durch die Wasserstandsentwicklung auf dem Rand des Deutschen-Bucht-Modells zur Nordsee, dem Wind über dem Modellgebiet und dem Abfluss aus dem Binnenbereich. Für die hier vorgestellte Untersuchung werden die Windfelder aus dem 20CRv3-Datensatz verwendet, die auch für die Nordseemodellierung eingesetzt wurden. Der Impulseintrag aus der Atmosphäre wird wie im Nordsee-Modell mit dem von Smith und Banke (1975) vorgeschlagenen Koeffizienten parametrisiert. Am binnenseitigen Ende der Ästuare wird der Abfluss vorgegeben. Für die untersuchten Sturmflutereignisse wird für Ems, Weser und Elbe der in den untersuchten Zeiträumen gemessene Abfluss vorgegeben (Elbe: Q_{SF1962} = 1050 m³/s und Q_{SF2013} = 610 m³/s, siehe DGJ 1963, 1965, 2015a, 2015b). Auf dem offenen Rand zur Nordsee wird die Wasserstandsentwicklung aus den Modellergebnissen des Nordsee-Modells (Meyer und Gaslikova 2024) übernommen. Der Salzgehalt auf dem Rand zur Nordsee wird mit 33 psu, einem für die Deutsche Bucht charakteristischen Wert (BSH 2016), vorgegeben. Kalibrierung und Validierung des Modells sind im Bericht zu EXTREMENESS-C (BAW 2020) sowie in BAW (2026) dargestellt. In der Topografie 2016 erreicht das Modell der Deutschen Bucht bei der Modellierung des Jahres 2016 im Vergleich zu Messungen an 17 Pegeln entlang der Tideelbe einen RMSE zwischen 7 cm und 16 cm (BAW 2026).

Zusätzlich zu den Windfeldern aus 20CRv3 werden höheraufgelöste Modelldaten aus COSMO-REA2 und COSMO-REA6 für die Sturmflut vom 06. Dezember 2013, siehe

Tabelle 1, verwendet, um die Wirkung der räumlichen Auflösung der Windfelder zu untersuchen.

Tabelle 1: Für die Modellierung der Sturmflut SF2013 verwendete Windfelder und ihre räumliche und zeitliche Auflösung (Bollmeyer et al. 2015, Compo et al. 2011, Wahl et al. 2017). Weitere Erläuterungen zur Modifikation in Abschnitt 5.

Windfeld	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Modifikation
20CRv3	1° x 1°	3 Stunden	keine
20CRv3+25%	1° x 1°	3 Stunden	Windgeschwindigkeit über Land x 1,25
COSMO-REA6	0,055° x 0,055°	1 Stunde	keine
COSMO-REA2	0,018° x 0,018°	1 Stunde	keine

5 Sturmflut 6. Dezember 2013 in der Elbe

Die Sturmflut vom 6. Dezember 2013 wird mit Wasserstandsrandwerten aus dem Nordsee-Modell und Windfeldern aus den 20CRv3 Reanalysedaten (SF2013_bester) mit dem Deutsche-Bucht-Modell modelliert. Ein Vergleich der modellierten Wasserstände (SF2013_bester, türkis) mit Messungen (schwarz) zeigt eine gute Übereinstimmung von Messung und Modellsimulation im Mündungsbereich der Elbe bei Cuxhaven (Abbildung 2) während des Höhepunktes der Sturmflut. Während der Vortiden der Sturmflut wird das Tidehochwasser vom Deutsche-Bucht-Modell um ca. 40 cm überschätzt. In Hamburg St. Pauli, ca. 100 km stromauf (Abbildung 2) wird ebenfalls während der Vortide das Tidehochwasser um den gleichen Betrag überschätzt. Jedoch wird der Sturmflutscheitelwasserstand in Hamburg St. Pauli vom Deutsche-Bucht-Modell um ca. 30 cm (SF2013_bester, türkis) unterschätzt.

Die Windgeschwindigkeit in Bodennähe wird nicht nur durch den Luftdruckgradienten, sondern auch von der Bodenreibung bestimmt. Die Rauigkeit von Wasser, hier der Nordsee, ist deutlich geringer als die des Landes. Dieser Einfluss des Untergrundes ist deutlich in der Windgeschwindigkeitsverteilung in Abbildung 3 (links) zu erkennen. Über den Niederlanden, Deutschland und Dänemark werden bei den dargestellten Terminen während der Sturmfluten deutlich geringere Windgeschwindigkeiten von 20CRv3 berechnet als über der freien Nordsee. Die Land-Wassergrenze bzw. die Landmaske von 20CRv3 ist in der Darstellung der Windgeschwindigkeit klar erkennbar. Es wird auch deutlich, dass die Landmaske die Bereiche der Ästuare von Ems, Jade-Weser und Elbe nicht auflösen kann. Diese Bereiche haben bei der Berechnung der Windgeschwindigkeit die Rauigkeit von Land und nicht von Wasser.

Die Verwendung von höher aufgelösten Windfeldern aus COSMO-REA6 (gelbgrün) oder COSMO-REA2 (hellgrün) führt nicht zu höheren Wasserständen in Hamburg St. Pauli. Auf Grund ihrer räumlichen Auflösung (siehe Tabelle 1) stellen die hier verwendeten Windfelder den Effekt der unterschiedlichen Rauigkeit von Wasser und Land beim Übergang von der Nordsee auf Land gut dar, jedoch unterschätzen sie die Windgeschwindigkeiten über dem, im Verhältnis zur räumlichen Auflösung der Windfelder, relativ schmalen Elbeästuar (Ganske und Rosenhagen 2012). Um den Effekt der Landmaske von 20CRv3 zu beseitigen, wird auf der Grundlage der Ergebnisse der Untersuchungen von

 https://doi.org/10.18171/1.095108

Ganske und Rosenhagen (2012) die Windgeschwindigkeit im Bereich der Landmaske, d. h. auch über der Elbmündung und dem Elbeästuar, um 15 %, 20 % bzw. 25 % erhöht.(siehe beispielhaft für 25 % Abbildung 3, rechts) und der Einfluss auf die Wasserstände in Cuxhaven und Hamburg St. Pauli untersucht. Die unveränderten 20CRv3-Windfelder für den Bereich der Nordsee sind in Abbildung 12 dargestellt.

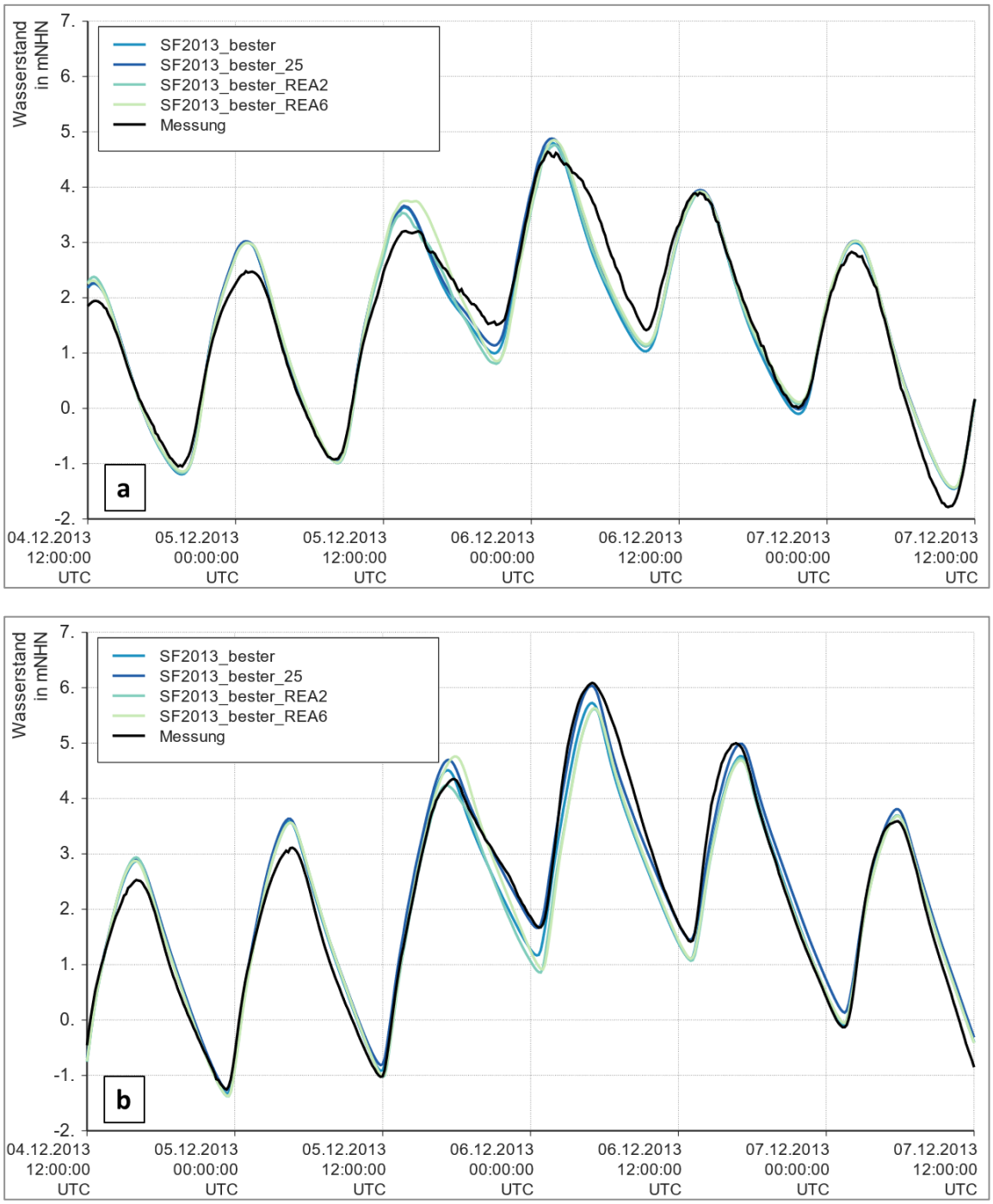


Abbildung 2: SF2013: Wasserstandsverlauf bei (a) Cuxhaven und (b) Hamburg St. Pauli. Die Messung ist in Schwarz dargestellt, die Farben kennzeichnen die verwendeten Windfelder: 20CRv3 (türkis), 20CRv3+25 % (blau), COSMO-REA6 (gelbgrün) und COSMO-REA2 (hellgrün).

Eine Erhöhung der Windgeschwindigkeiten im Bereich der Landmaske von 20CRv3 um z. B. 25 % beseitigt den Effekt der Landmaske (siehe Abbildung 3, rechts). Dies führt am

 https://doi.org/10.18171/1.095108

Tag vor der Sturmflut, bei niedrigen Windgeschwindigkeiten, zu keiner Veränderung der Wasserstände in Hamburg St. Pauli (Abbildung 2), am Tag der Sturmflut jedoch werden nun Wasserstände (blau) in der Höhe der Messung erreicht (schwarz).

Durch diese generelle Erhöhung der Windgeschwindigkeit im Bereich der Landmaske wird keine Erhöhung der räumlichen Auflösung der Windgeschwindigkeit bewirkt. Lokale Effekte auf Grund der Topografie wie z. B. Abschattungen oder Windrichtungsänderungen werden nicht abgebildet. Hierfür wäre eine Regionalisierung der Windfelder nötig, die die Wasserfläche der Elbe und die damit verbundenen Rauigkeitsunterschiede im Bereich zwischen der Mündung und Hamburg auflöst.

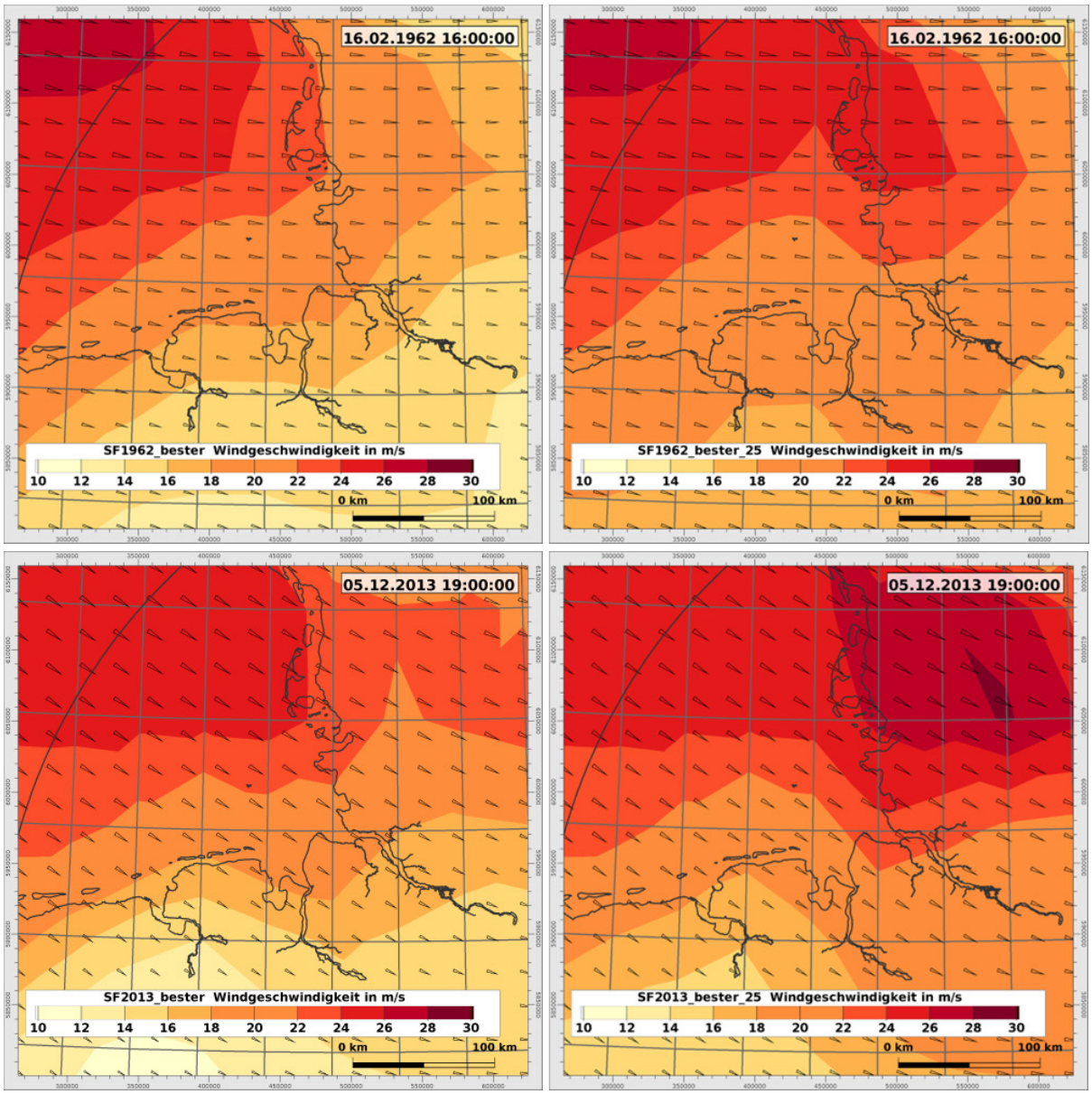


Abbildung 3: 20CRv3 Windfeld über der Deutschen Bucht während SF1962 (oben) und SF2013 (unten) sowie mit Erhöhung um 25 % im Bereich der Landmaske (Uhrzeiten in CET). Die Umrandung des Modellgebiets des Deutsche-Bucht-Modells (siehe auch Abbildung 1) ist zur Orientierung in Schwarz eingezeichnet.

6 Sturmflut 16./17. Februar 1962 in der Elbe

Die Untersuchung der Sturmflut vom 6. Dezember 2013 und der Vergleich mit Messungen macht Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes der atmosphärischen Reanalysedaten auf Grund ihrer räumlichen Auflösung für die Modellierung von Sturmfluten in der Deutschen Bucht und dem Elbeästuar deutlich. Die Erfahrungen und Erkenntnisse aus der Modellierung der Sturmflut vom 6. Dezember 2013 fließen in die Untersuchung der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 ein, d. h. auch hier werden die 20CRv3 Windfelder modifiziert (siehe Abbildung 3). Ein Vergleich der modellierten Wasserstände (SF1962_bester, türkis) mit Messungen (schwarz) zeigt eine gute Übereinstimmung von Messung und Modell im Mündungsbereich der Elbe bei Cuxhaven (Abbildung 4) im Sturmflutzeitraum. Während der Vortiden der Sturmflut wird das Tidehochwasser vom Deutsche-Bucht-Modell überschätzt. Durch eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit um 25 % (SF1962_bester_25, grün) über der Elbe wird der Wasserstandsverlauf während der Vortiden weder in Cuxhaven noch in Hamburg St. Pauli verändert (siehe Abbildung 4). Erst im Verlauf des 16. und 17. Februar 1962 bewirkt die erhöhte Windgeschwindigkeit eine Zunahme der Wasserstände in Hamburg St. Pauli. Der modellierte Sturmflutscheitelwasserstand steigt durch die erhöhte Windgeschwindigkeit um ca. 35 cm (Abbildung 4).

Während der Sturmflut 1962 erreichte der Wasserstand in Hamburg St. Pauli NHN+5,70 m. Das entspricht der damaligen Höhe der Deiche. Nach Erreichen der Deichhöhe wurden die Deiche überströmt und brachen (Abbildung 4). In der heutigen Topografie der Elbe (2016, WSV 2018) mit heutigem Küstenschutz (Deiche in Hamburg höher als NHN+8,10 m, Eindeichungen entlang der Tideelbe, geschlossene Sturmflutsperrwerke an den Nebenflüssen) wird mit dem Deutsche-Bucht-Modell ein Wasserstand zwischen NHN+6,20 m (SF1962_bester) und NHN+6,50 m (SF1962_bester_25) erreicht (Abbildung 4). Ohne Deichbrüche und in der heutigen Topografie würde die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 in Hamburg Wasserstände erreichen, die in der Größenordnung der bei der Sturmflut vom 3. Januar 1976 gemessenen Wasserstände (NHN+6,45 m, siehe Tabelle 2) liegen.

Für die untersuchten Sturmflutszenarien SF1962 (Elbe: Q_{SF1962} = 1050 m³/s) und SF2013 (Elbe: Q_{SF2013} = 610 m³/s) wird der Sturmflutscheitelwasserstand HThw auf einem Längsprofil entlang der Elbe zwischen der Mündung bei Bake A (Elbe km 755) und Bleckede in der Mittelelbe (Elbe km 550) analysiert. Abbildung 5 zeigt für beide Sturmflutszenarien den Verlauf des Sturmflutscheitelwasserstandes entlang des Elbeästuars in der heutigen Topografie. Die Erhöhung der Windgeschwindigkeit um 25 % im Bereich der Landmaske verändert die Sturmflutscheitelwasserstände im Bereich der Elbmündung zwischen Bake A und Cuxhaven um wenige Zentimeter. Stromauf von Cuxhaven bewirkt die erhöhte Windgeschwindigkeit über der Elbe eine Zunahme der Sturmflutscheitelwasserstände um 20 bis 35 cm.

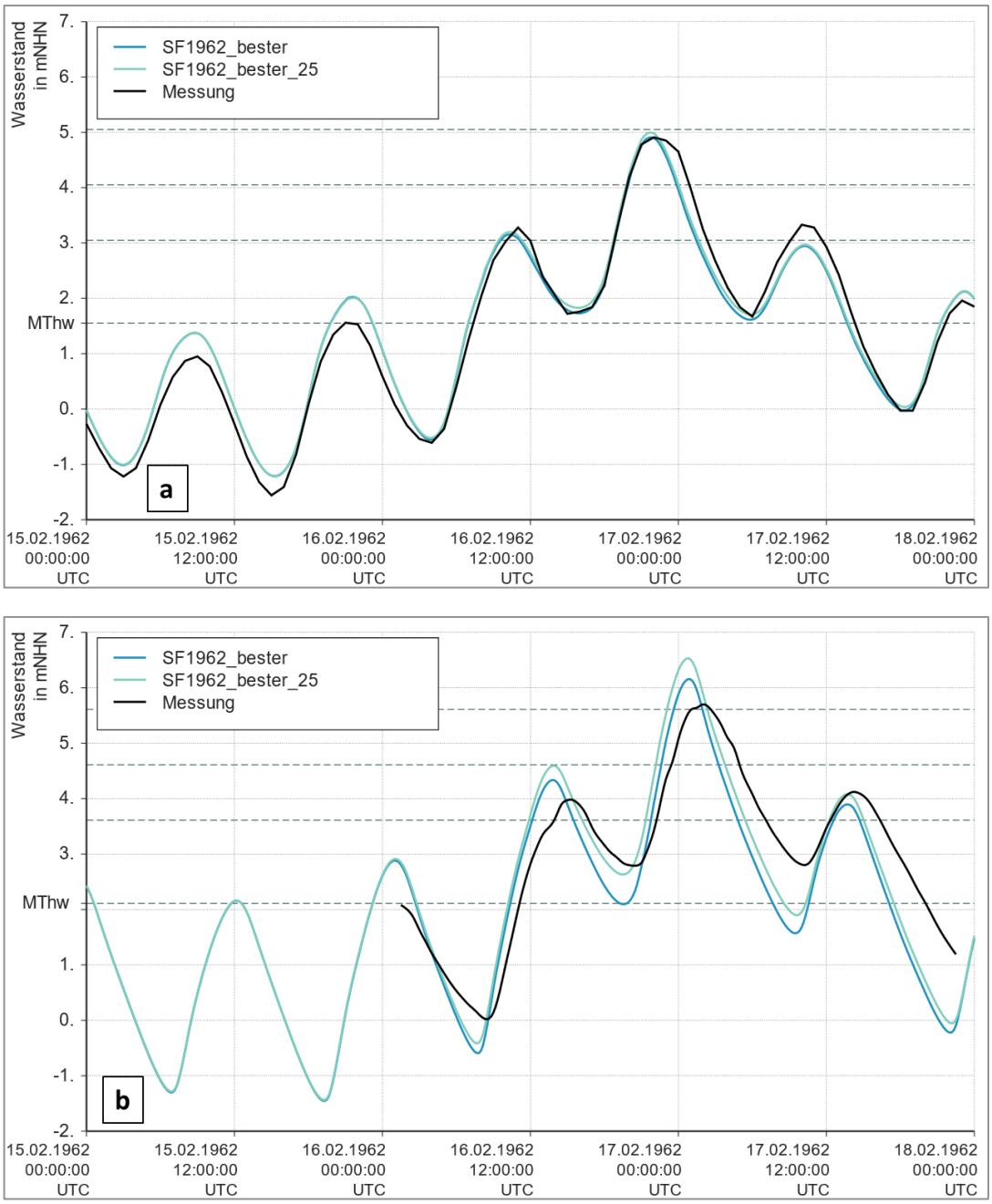


Abbildung 4: SF1962: Wasserstandsverlauf bei (a) Cuxhaven und (b) Hamburg St. Pauli. Die Messung ist in schwarz dargestellt, die Farben kennzeichnen die verwendeten Windfelder: 20CRv3 (türkis) und 20CRv3+25 % (grün). Das $MThw_{2016\text{-}2020}$ (NHN+1,55 m für Cuxhaven und NHN+2,15 m für Hamburg St. Pauli) sowie die vom Bundesamt für Hydrographie und Schifffahrt (BSH) verwendeten Grenzwasserstände für Sturmflut (MThw+1,5 m), schwere Sturmflut (MThw+2,5 m) und sehr schwere Sturmflut (MThw+3,5 m) sind als waagrechte grau gestrichelte Linien markiert.

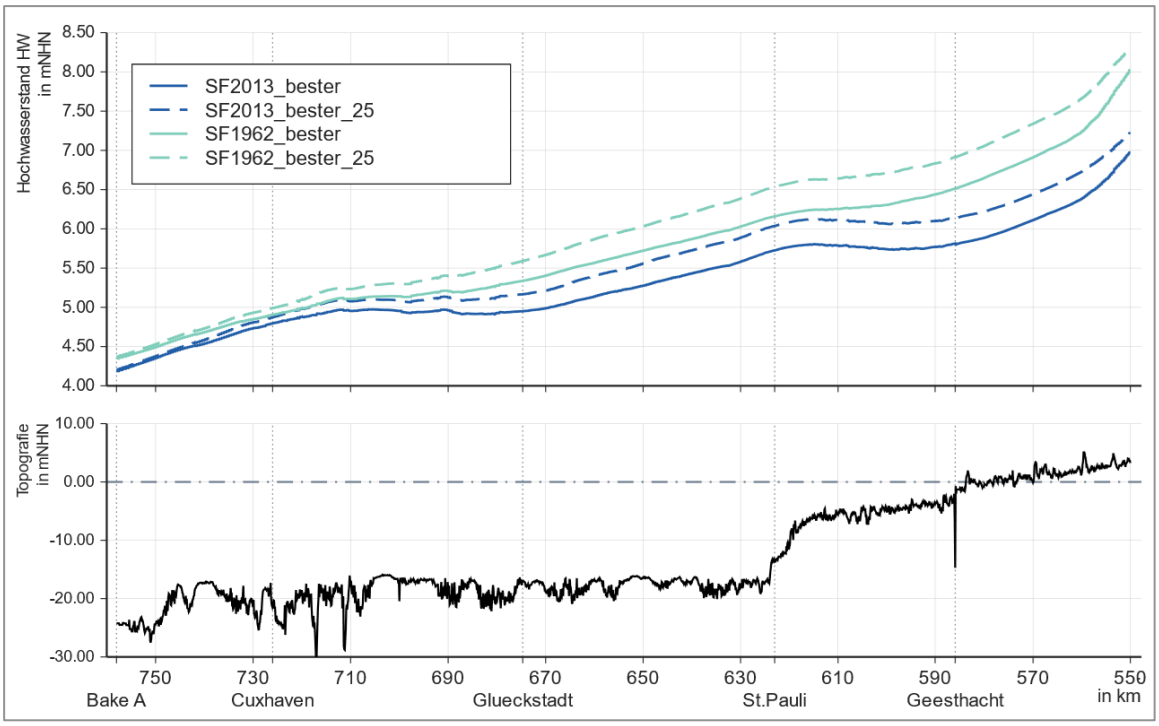


Abbildung 5: Sturmflutscheitelwasserstand (oben) entlang der Elbe zwischen Bake A (Elbe km 755) und Bleckede (Elbe km 550, im deutlich flacheren Binnenbereich) für die Sturmflutszenarien SF2013_bester (Q = 610 m^3/s, blau) und SF1962_bester (Q = 1015 m^3/s, grün) unter Verwendung der Windfelder 20CRv3 (durchgezogen) und 20CRv3+25 % (gestrichelt) sowie Topografie entlang der Fahrrinnenmitte (unten) für den gleichen Bereich der Elbe.

Sturmfluten in den Ästuaren wie der Tideelbe werden nicht nur durch die Gezeitendynamik und den Windstau in der Nordsee geprägt, sondern auch durch den lokalen Wind über dem Ästuar. Für eine detaillierte Untersuchung der durch den lokalen Wind über der Elbe beeinflussten Wasserstände entlang der Elbe während der Sturmflut 1962 ist eine Regionalisierung der Windfelder aus 20CRv3 erforderlich.

7 Sensitivitätsstudien und Ausblick Klimawandel

Der Einsatz eines numerischen Modells der Deutschen Bucht ermöglicht es, die Wirkung unterschiedlicher Aspekte der Sturmflutuntersuchungen zu betrachten. Da die Nebenflüsse der Elbe 1962 noch nicht durch Sturmflutsperrwerke geschützt waren, wird in einem Experiment die Wirkung des Flutraumes der Nebenflüsse für die Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Tideelbe untersucht. Ein weiteres Experiment wählt aus den 80 Realisierungen jeweils das Ensemble-Member aus, dass den höchsten Wasserstand in Cuxhaven für die Sturmflut 1962 und 2013 erzeugt. Vergleichbar zu den Untersuchungen in EXTREMENESS betrachtet das dritte Experiment die Wirkung von Meeresspiegelanstieg in der Deutschen Bucht und Abfluss aus der Mittelelbe für die Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Tideelbe.

7.1 Wirkung der Sturmflutsperrwerke an den Nebenflüssen

Nach der Sturmflut von 1962 wurden zwischen Cuxhaven und Geesthacht an den Nebenflüssen der Elbe Sturmflutsperrwerke gebaut. Dadurch steht bei Sturmflut der Flutraum

der Nebenflüsse heute nicht mehr zu Verfügung. Die Größe des im Ästuar zu Verfügung stehenden Flutraumes hat einen Einfluss auf die Höhe der Wasserstände der Sturmflut. Um den Einfluss der geschlossenen Sturmflutsperrwerke an den Nebenflüssen der Elbe abzuschätzen, werden die Sturmflutscheitelwasserstände der Sturmflutszenarien SF2013_bester_25 und SF1962_bester_25 bei geöffneten und bei geschlossenen Sturmflutsperrwerken verglichen (siehe Abbildung 6 oben). Durch das Öffnen der Sperrwerke nehmen die im numerischen Modell volumentreu abgebildeten Nebenflüsse am Tide- und Sturmflutgeschehen teil. Das Öffnen der Sturmflutsperrwerke senkt die Sturmflutscheitelwasserstände zwischen Brunsbüttel (Elbe km 695) und Bunthaus (Elbe km 609) um ca. 5 cm (siehe Abbildung 6 unten).

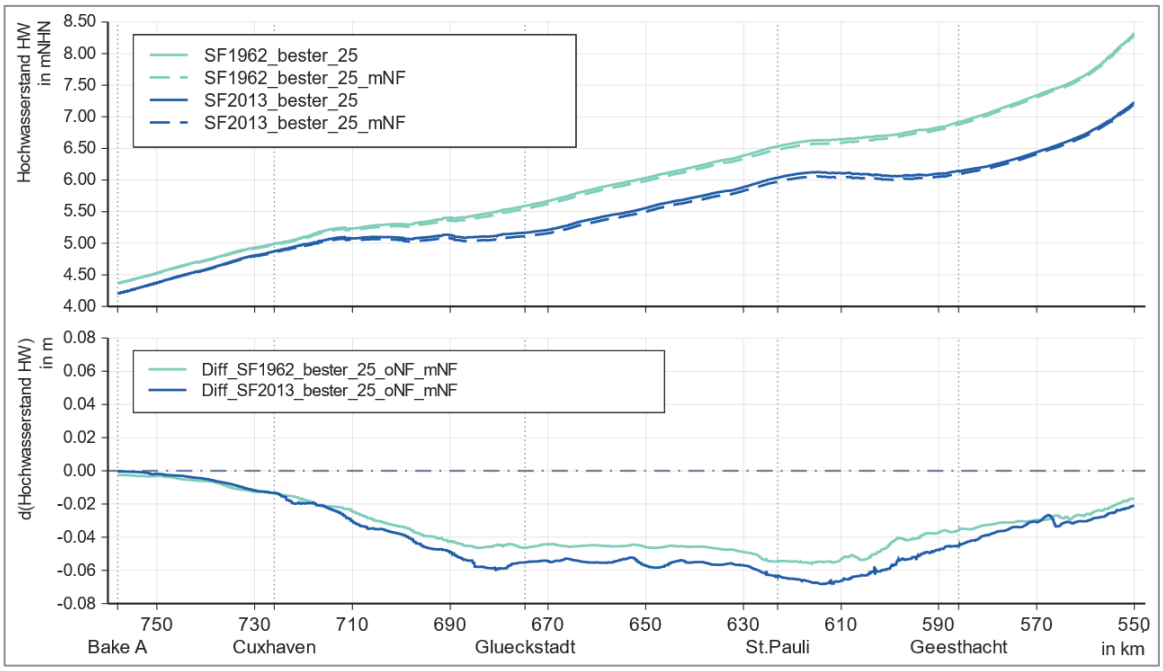


Abbildung 6: Oben: Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Elbe zwischen Bake A und Bleckede für die Sturmflutszenarien SF2013_bester_25 (blau) und SF1962_bester_25 (grün). Durchgezogen für geschlossene und gestrichelt für geöffnete Sturmflutsperrwerke an den Nebenflüssen. Unten: Änderung des Sturmflutscheitelwasserstands durch geöffnete Sperrwerke an den Nebenflüssen.

7.2 Wirkung der Wahl des Ensemble Members

Für jeden betrachteten Sturmflutzeitraum stehen Informationen über den Verlauf des Windes und des Wasserstands in der inneren Deutschen Bucht für 80 Ensemble-Mitglieder zur Verfügung, sprich 80 verschiedene Wettervorhersagen mit leicht unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und -richtungen (Meyer und Gaslikova 2024, Meyer 2023). Aus diesen 80 Realisierungen der Sturmfluten wird zusätzlich das Ereignis ausgewählt, das die höchsten Wasserstände in Cuxhaven erreichte (SF2013_extrem_25 und SF1962_extrem_25). Der zeitliche Verlauf der Windgeschwindigkeit und des Wasserstands sind jeweils für die beiden Realisierungen sehr ähnlich, jedoch werden in Cuxhaven am Tag der Sturmflut höhere Wasserstände erreicht (siehe Abbildung 7).

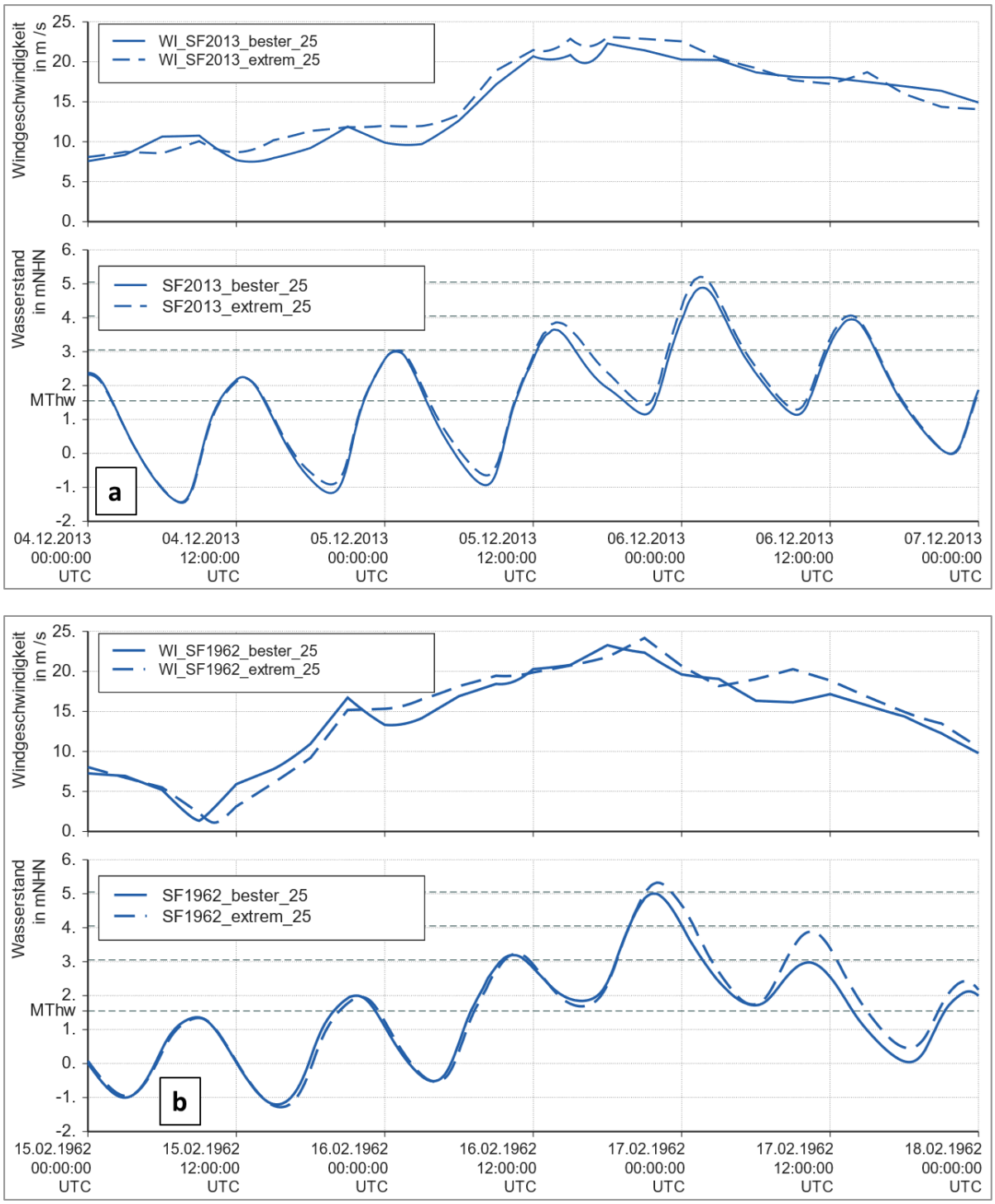


Abbildung 7: (a) SF2013 und (b) SF1962: Verlauf der Windgeschwindigkeit (oben) und des Wasserstands (unten) bei Cuxhaven für SF2013_bester_25 (durchgezogen) und SF2013_extrem_25 (gestrichelt). Das MThw sowie die vom BSH verwendeten Grenzwasserstände für Sturmflut (MThw+1,5 m), schwere Sturmflut (MThw+2,5 m) und sehr schwere Sturmflut (MThw+3,5 m) sind als waagrechte grau gestrichelte Linien markiert.

Die Analyse der Sturmflutscheitelwasserstände entlang des Elbeästuars (siehe Abbildung 8) zeigt, dass in Cuxhaven ca. 10 bis 20 cm und in Hamburg St. Pauli 30 bis 40 cm höhere Wasserstände beim Eintreten eines anderen Ensemble-Mitglieds möglich sind.

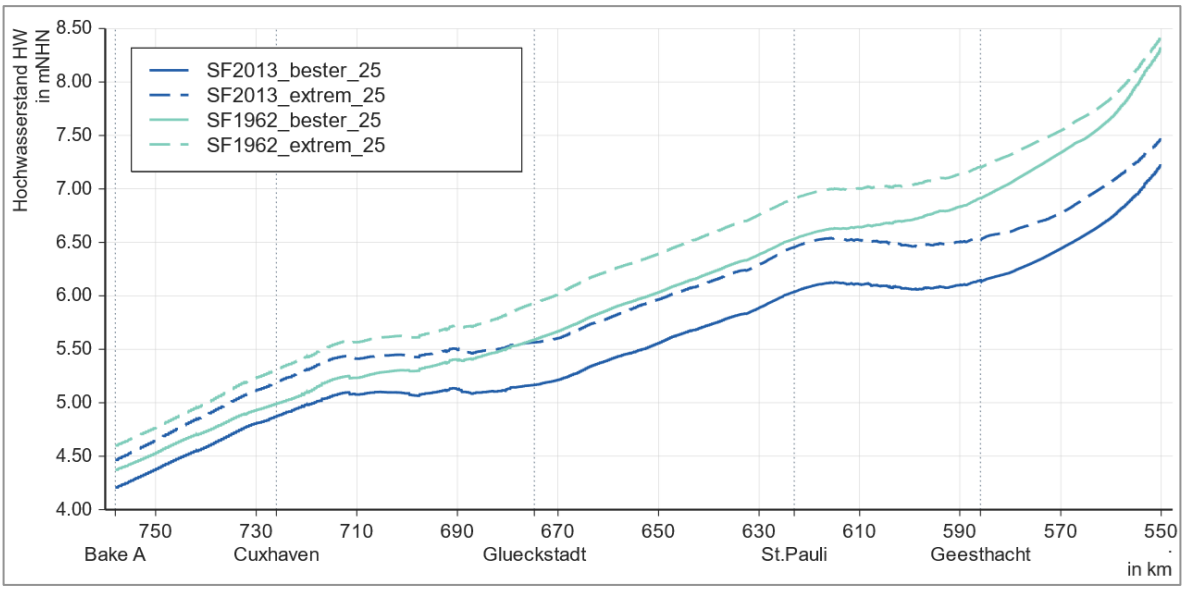


Abbildung 8: Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Elbe zwischen Bake A und Bleckede für die Sturmflutszenarien SF2013_bester_25 (blau) und SF2013_extrem_25 (blau gestrichelt) sowie SF1962_bester_25 (grün) und SF1962_extrem_25 (grün gestrichelt) unter Verwendung der Windfelder 20CRv3+25 %.

7.3 Möglicher Einfluss des Klimawandels

Im Forschungsvorhaben EXTREMENESS (Weisse et al. 2019, Rudolph et al. 2019, Grabemann et al. 2019) wurden Möglichkeiten einer potentiellen Verstärkung von Sturmfluten im Klimawandel durch z. B. eine Zunahme des Abflusses aus dem Binnenbereich oder einen Meeresspiegelanstieg in der Deutschen Bucht untersucht. Auf der Grundlage der Reanalysedaten historischer Sturmfluten besteht die Möglichkeit, auch für sehr hohe historische Ereignisse zu untersuchen, wie sie durch den Klimawandel verändert werden könnten. In einer Sensitivitätsstudie werden für das Sturmflutszenario SF1962 Szenarien untersucht, die zentrale Elemente einer möglichen Zukunft wie einen Meeresspiegelanstieg in der Deutschen Bucht um 50 cm und 100 cm sowie eine gleichzeitige Zunahme des Abflusses aus dem Binnenbereich auf bis zu 4000 m³/s (~ $HHQ_{\text{Neu Darchau Elbe}}$) hervorheben. Abbildung 9 zeigt für einen angenommenen Abfluss von 1000 m³/s die Wirkung eines Meeresspiegelanstieges in der Deutschen Bucht für die Wasserstände in Cuxhaven und in Hamburg St. Pauli. Ein Meeresspiegelanstieg hebt an beiden Orten sowohl das Tnw und das Thw vor der Sturmflut als auch den Sturmflutscheitelwasserstand HThw in der Größenordnung des angenommenen Meeresspiegelanstieges an. Für Hamburg St. Pauli erkennt man zusätzlich das durch eine höhere Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle bei tieferem Wasser verursachte frühere Eintreten des HThw.

Zur Untersuchung der Wirkung des Abflusses werden die Sturmflutszenarien mit einem Abfluss von 1000 m³/s, 2000 m³/s, 3000 m³/s und 4000 m³/s aus dem Binnenbereich kombiniert. Der Einfluss des Abflusses auf den Wasserstand ist sowohl ohne als auch mit einem Meeresspiegelanstieg von 100 cm in Cuxhaven und in Hamburg St. Pauli in Abbildung 10 dargestellt. In Cuxhaven, in der breiten und tiefen Elbmündung, ist kein Einfluss des Abflusses auf den Wasserstand der Vortiden oder während der Sturmflut zu beobachten. In Hamburg St. Pauli dagegen hebt eine Zunahme des Abflusses den Wasserstand im

gesamten Untersuchungszeitraum in der Größenordnung von ca. 10 cm/1000 m³/s an (vergleiche hierzu Rudolph et al. (2019) oder Rudolph (2014)).

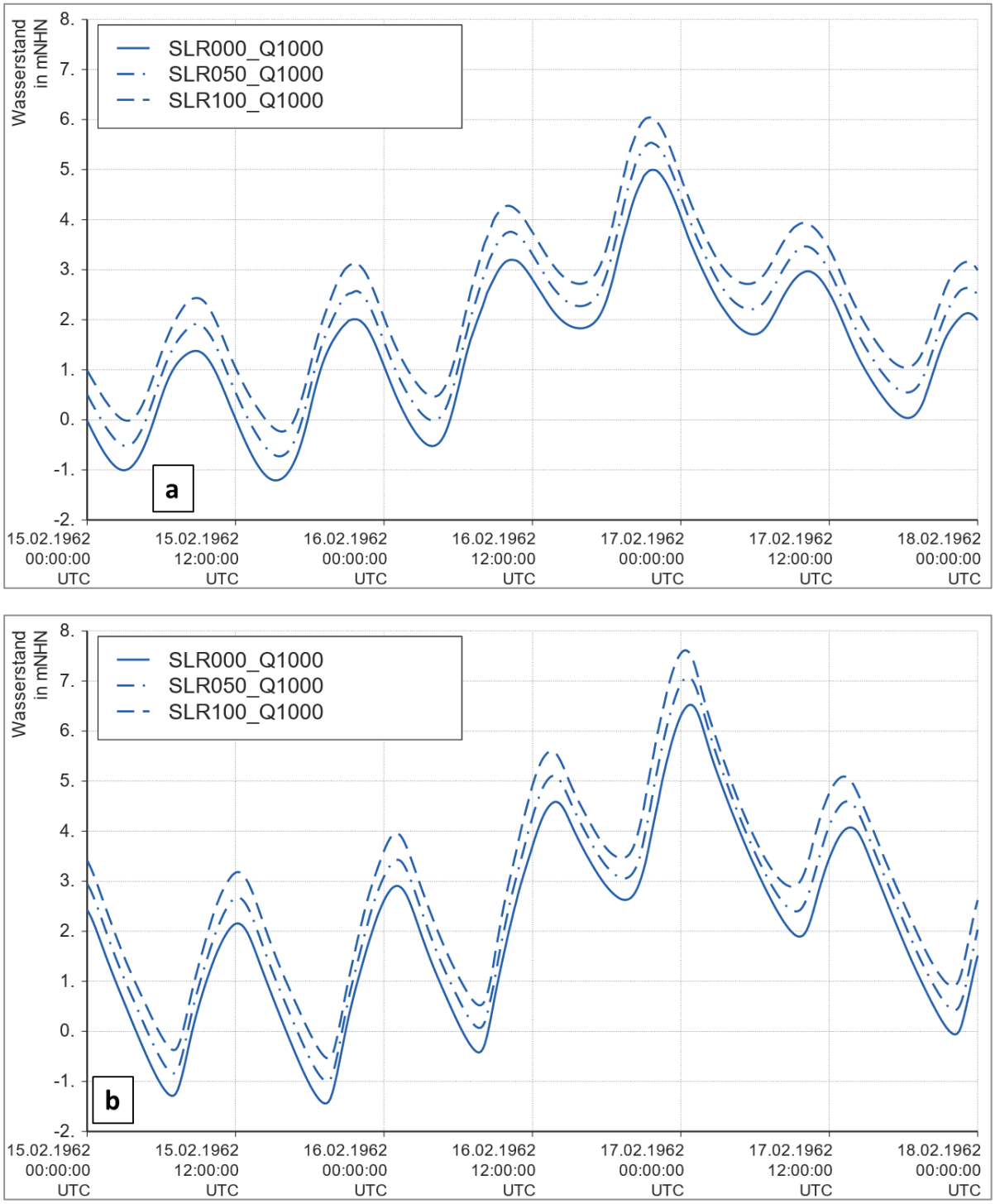


Abbildung 9: SF1962: Wasserstandsverlauf bei (a) Cuxhaven und (b) Hamburg St. Pauli ohne Meeresspiegelanstieg (durchgezogen), mit 50 cm Meeresspiegelanstieg (strichpunktiert) und mit 100 cm Meeresspiegelanstieg (gestrichelt; gewählter Abfluss 1000 m³/s).

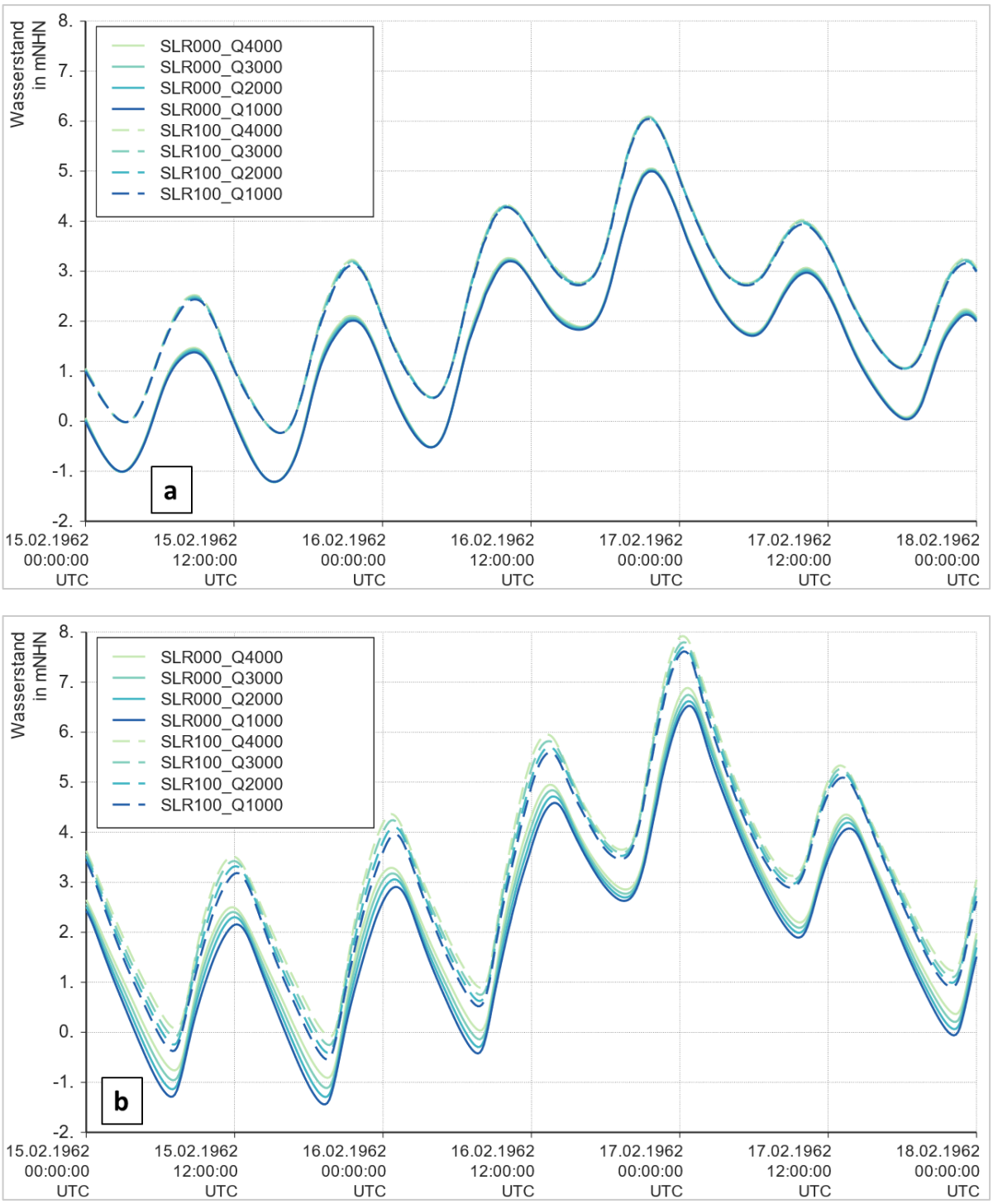


Abbildung 10: SF1962: Wasserstandsverlauf bei (a) Cuxhaven und (b) Hamburg St. Pauli ohne Meeresspiegelanstieg (durchgezogen) und mit 100 cm Meeresspiegelanstieg gestrichelt. Die Farben kennzeichnen den verwendeten Abfluss aus dem Binnenbereich: 1000 m^3/s (blau), 2000 m^3/s (türkis), 3000 m^3/s (grün), 4000 m^3/s (hellgrün).

Abbildung 11 zeigt zusammenfassend den Einfluss von Meeresspiegelanstieg in der Nordsee und Abfluss aus dem Binnenbereich auf den Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Elbe zwischen Bake A in der Elbmündung und Bleckede in der Mittelelbe (Elbe km 550). Durch einen Meeresspiegelanstieg erhöht sich der Sturmflutscheitelwasserstand bis tief in die Tideelbe hinein um den Betrag des Meeresspiegelanstieges. Erst stromauf von Hamburg nimmt der Einfluss des Meeresspiegelanstieges auf die Höhe der

Sturmflutscheitelwasserstände ab. Eine gleichzeitige Zunahme des Abflusses aus dem Binnenbereich erhöht zusätzlich den Sturmflutscheitelwasserstand im Bereich der Tideelbe (siehe Abbildung 11) im Mündungsbereich um wenige Zentimeter, im mittleren Bereich um wenige Dezimeter und im Bereich zwischen Hamburg St. Pauli und Bleckede um mehrere Dezimeter.

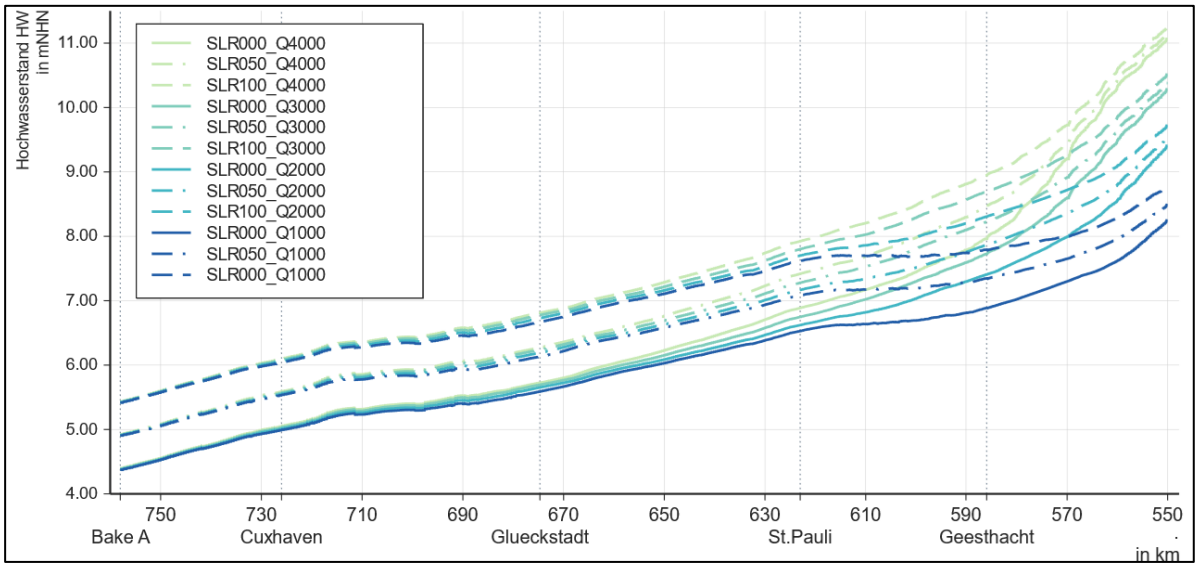


Abbildung 11: Sensitivitätsstudie zur Wirkung von Meeresspiegelanstieg und Abfluss: Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Elbe während SF1962 ohne Meeresspiegelanstieg (durchgezogen), mit 50 cm Meeresspiegelanstieg strichpunktiert und mit 100 cm Meeresspiegelanstieg gestrichelt. Die Farben kennzeichnen den verwendeten Abfluss aus dem Binnenbereich: 1000 m^3/s (blau), 2000 m^3/s (türkis), 3000 m^3/s (grün), 4000 m^3/s (hellgrün).

8 Zusammenfassung und Ausblick

Auf Basis der Veröffentlichung von Meyer und Gaslikova (2024) wurde die historische Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 mit ausgewählten Ensemblemitgliedern des Reanalyseproduktes 20CRv3 für die Elbe mit aktueller Topografie simuliert. Die Topografie entlang der Elbe hat sich in den letzten Jahrzehnten durch umfangreiche Küstenschutzmaßnahmen und Anpassungen an die Erfordernisse der Schifffahrt (z. B. die Vertiefung des Elbefahrwassers oder Umbau des Hamburger Hafens) verändert. Numerische Simulationen bieten die Möglichkeit, die Veränderungen in den Modellen zu integrieren und Sensitivitätsstudien durchzuführen.

Der umfangreiche atmosphärische Reanalysedatensatz 20CRv3 (Compo et al. 2011) ermöglicht die Betrachtung der Sturmentwicklung im vergangenen Jahrhundert über dem Nordatlantik und der Nordsee sowie die gezielte Untersuchung von Sturmflutverläufen in der Nordsee und der Deutschen Bucht mit hydrodynamisch-numerischen Modellen der Nordsee (Meyer und Gaslikova 2024). Für jeden Sturmflutzeitraum liegen 80 gleichwahrscheinliche Realisierungen der Windentwicklung und somit auch des Wasserstandsverlaufes im Sturmflutzeitraum vor.

Die Ergebnisse aus Meyer und Gaslikova (2024) werden als Grundlage für weitere Sturmflutuntersuchungen in der inneren Deutschen Bucht und dem Elbeästuar genutzt. Ausgewählt werden zwei historische extreme Sturmfluten vom Nord-West-Typ, die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 und die Sturmflut vom 6. Dezember 2013. Die Sturmflut

vom 6. Dezember 2013 fand unter heutigen topografischen Bedingungen der Elbe statt und ermöglicht so einen Vergleich der gemessenen und modellierten Wasserstände entlang des Elbeästuars.

Dieser Vergleich zeigt, dass die Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Elbe im Gegensatz zu den Sturmflutscheitelwasserständen im Küstenbereich deutlich unterschätzt werden. Dies wird verursacht durch die bei der Erstellung des Reanalysedatensatzes 20CRv3 verwendete Landmaske, die zu einer deutlichen Unterschätzung der Windgeschwindigkeit über dem Elbeästuar führt. Ein generelles Anheben der Windgeschwindigkeit im Bereich der Landmaske um 25 % bewirkt eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und modelliertem Wasserstand in Hamburg St. Pauli für Sturmflutszenario SF2013.

Diese Erkenntnisse werden bei den Untersuchungen der Sturmflut 1962 genutzt und ermöglichen ein Abschätzen der in der heutigen Topografie möglichen Sturmflutscheitelwasserstände für dieses Ereignis. Mit geeignet modifizierten Windfeldern, ohne Deichbrüche und in der heutigen Topografie (2016) erreicht SF1962 in Hamburg St. Pauli einen Sturmflutscheitelwasserstand in der Größenordnung der Sturmflut vom 3. Januar 1976. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Sturmflut vom 3. Januar 1976 unter den heutigen topografischen Bedingungen und dem heutigen Küstenschutz vermutlich ebenfalls höher in Hamburg-St. Pauli auflaufen würde, da damals große Landflächen in Schleswig-Holstein (Haseldorfer Marsch) und Niedersachsen (Landkreis Stade) überflutet wurden.

In einer Sensitivitätsstudie wird für beide Sturmflutszenarien die Wirkung des Schutzes der Nebenflüsse der Elbe durch Sturmflutsperrwerke analysiert. Ohne diesen Flutraum der Elbenebenflüsse steigt der Sturmflutscheitelwasserstand in Hamburg zusätzlich um ca. 5 cm an.

Für beide Sturmflutzeiträume standen Wind- und Wasserstandsrandwerte für 80 gleichwahrscheinliche Realisierungen zur Verfügung, aus denen für die vorliegende Untersuchung jeweils zwei pro Sturmflut ausgewählt wurden: diejenige, die in Cuxhaven am besten zur Wasserstandsmessung passte sowie diejenige, die die höchsten Wasserstände in Cuxhaven erreichte. Die Analyse der Sturmflutscheitelwasserstände entlang des Elbeästuars zeigt, dass in Hamburg St. Pauli 30 bis 40 cm höhere Wasserstände beim Eintreten der in Cuxhaven höchsten Realisierung möglich sind.

Auf der Grundlage der Reanalysedaten historischer Sturmfluten besteht die Möglichkeit, auch für sehr hohe historische Ereignisse zu untersuchen, wie sie durch den Klimawandel verändert werden könnten. In einer Sensitivitätsstudie werden für das Sturmflutszenario SF1962 Szenarien untersucht, die zentrale Elemente einer möglichen Zukunft wie einen Meeresspiegelanstieg in der Deutschen Bucht um 50 cm und 100 cm sowie eine Zunahme des Abflusses aus dem Binnenbereich auf bis zu 4000 m^3/s hervorheben. Durch einen Meeresspiegelanstieg in der Nordsee erhöht sich der Sturmflutscheitelwasserstand bis tief in die Tideelbe hinein. Eine gleichzeitige Zunahme des Abflusses aus dem Binnenbereich erhöht zusätzlich den Sturmflutscheitelwasserstand im oberen Bereich der Tideelbe.

Der umfangreiche Reanalysedatensatz 20CRv3 bietet die Möglichkeit, weitere historische Sturmfluten unter heutigen und zukünftigen durch den Klimawandel verursachten Bedingungen zu betrachten und die Wasserstände entlang der Tideelbe zu analysieren. Von besonderem Interesse für z. B. den Küstenschutz sind hier die in Cuxhaven sehr hohen (Tabelle 2), jedoch weit zurückliegenden Sturmfluten von 1825, 1906 und 1916 aber auch die langen Kettensturmfluten von November bis Dezember 1973, Februar 1990 und Februar 2022. Für eine detaillierte Analyse des Wassserstandsverlaufs entlang der Tideelbe ist

jedoch für alle Windfelder aus dem Reanalysedatensatz eine die Rauigkeitsunterschiede im Bereich der Elbe berücksichtigende Regionalisierung der Windfelder nötig, die für die hier vorgestellten Untersuchungen nicht vorlag.

9 Daten

Support for the Twentieth Century Reanalysis Project dataset is provided by the U.S. Department of Energy, Office of Science Biological and Environmental Research (BER) program, by the National Oceanic and Atmospheric Administration Climate Program Office, and by the NOAA Physical Sciences Laboratory.

Die Messungen des Wasserstandes für 1962 und 2013 wurden von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung bereitgestellt.

10 Anhang

Tabelle 2: Liste der 20 höchsten gemessenen Sturmflutscheitelwasserstände HThw in Cuxhaven (DGJ 2024b, 2024a). Zusätzlich sind für diese Ereignisse der Sturmflutscheitelwasserstand sowie die Platzierung in Hamburg St. Pauli eingetragen. Zur Einordnung der HThw in Hamburg ist der Abfluss Neu Darchau soweit bekannt jeweils am Tag vor dem Sturmflutereignis aufgeführt. Wir danken dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe Nordsee für die Umrechnung der Daten von PN in NHN.

	HThw Cuxhaven		HThw Hamburg St. Pauli		Abfluss Neu Darchau
Sturmflut	Nr.	mNHN	Nr.	mNHN	m^3/s
03.01.1976	1	5,10	1	6,45	473
16.02.1962	2	4,95	11	5,70	1040
21.01.1976	3	4,70	13	5,58	1401
06.12.2013	4	4,65	2	6,08	609
04.02.1825	5	~4,65	-	~ 5,24	-
03.12.1999	6	4,53	5	5,95	340
24.11.1981	7	4,51	7	5,81	1360
27.02.1990	8	4,51	14	5,53	627
28.01.1994	9	4,49	3	6,02	1351
10.01.1995	10	4,48	4	6,02	1020
09.11.2007	11	4,42	12	5,65	511
28.02.1990	12	4,41	9	5,75	651
06.12.1973	13	4,39	20	5,33	357
19.02.2022	14	4,37	6	5,87	1040
13.03.1906	15	~4,37	-	~4,39	-
23.01.1993	16	4,34	8	5,76	753
05.02.1999	17	4,34	10	5,74	933
13.01.1916	18	~4,33	-	~4,60	-
22.12.2023	19	4,28	16	5,45	1090
16.11.1973	20	4,22	17	4,82	366

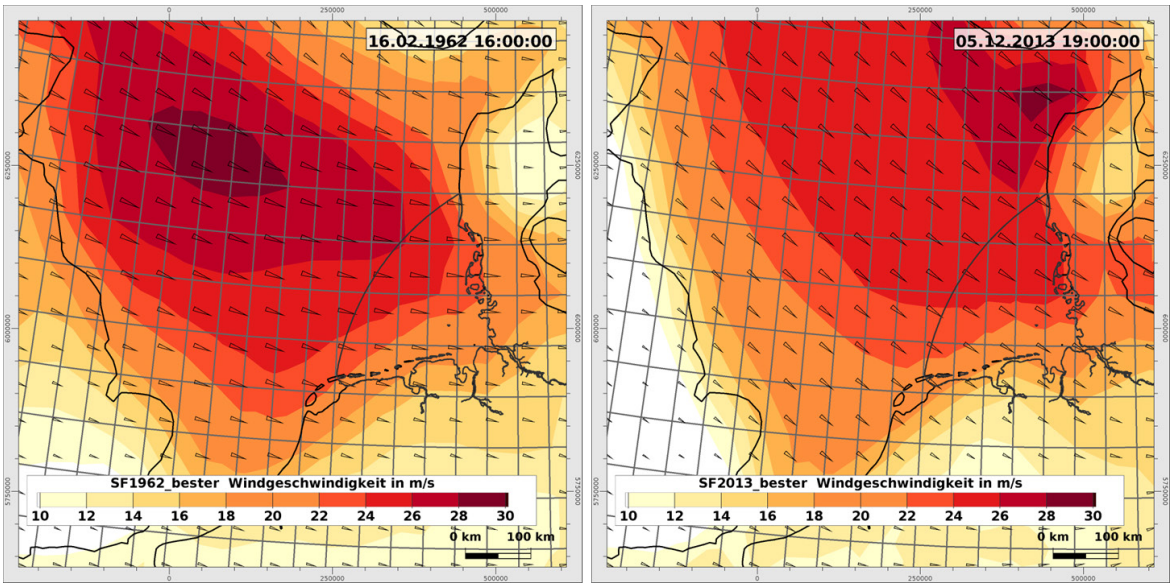


Abbildung 12: 20CRv3 Windfeld über der Nordsee und der Deutschen Bucht während SF1962 (links) und SF2013 (rechts) (Uhrzeit in CET). Zur Orientierung ist sowohl die Küstenlinie und die Umrandung des Modellgebiets des Deutsche-Bucht-Modells (siehe auch Abbildung 1) als auch das Gitter der 20CRv3 Daten in Schwarz eingezeichnet. Aufgrund der in 20CRv3 verwendeten Landmaske treten über Land deutlich niedrigere Windgeschwindigkeiten als über Wasser auf.

11 Danksagung

Die Autorinnen bedanken sich bei Iris Grabemann und den beiden Gutachtern für die konstruktiven Anmerkungen im Manuskript.

12 Literaturverzeichnis

BAW: Modellierung von Sturmflutwasserständen in der Tideelbe. BAW Gutachten B3955.03.06.1006, 2018. https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/130536/Gutachten_der_BAW.pdf, zuletzt geprüft am 20.06.2026.

BAW: EXTREMENESS-C: Analyse von extremen Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe und Ems und mögliche Verstärkungen. FuE-Abschlussbericht B3955.03.04.70237. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, https://hdl.handle.net/20.500.11970/107125, 2020.

BAW: GBOM und ElbeHel - Vergleich von Modellergebnissen mit Messungen für das Jahr 2016. in Vorbereitung, Hamburg: BAW, 2026.

BMV: Bundeswasserstraßengesetz WaStrG, 2025.

Bollmeyer, C.; Keller, J. D.; Ohlwein, C.; Wahl, S.; Crewell, S.; Friederichs, P.; Hense, A.; Keune, J.; Kneifel, S.; Pscheidt, I.; Redl, S.; Steinke, S.: Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 141, 686, 1–15, https://doi.org/10.1002/qj.2486, 2015.

Bork, I.; Müller-Navarra, S.: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordseeküste – Abschlussbericht Teil C – Sturmflutsimulation. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2006.

BSH: Nordseezustand 2008 - 2011. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2016.

Callies, U.; Plüß, A.; Kappenberg, J.; Kapitza, H.: Particle tracking in the vicinity of Helgoland, North Sea: a model comparison. In: Ocean Dynamics, 61, 12, 2121–2139, https://doi.org/10.1007/s10236-011-0474-8, 2011.

Casulli, V.: A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. In: International Journal for Numerical Methods in Fluids, 60, 4, 391–408, 2008.

Casulli, V.; Cheng, R. T.: Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. In: International Journal for Numerical Methods in Fluids, 15, 6, 629–648, https://doi.org/10.1002/fld.1650150602, 1992.

Casulli, V.; Stelling, G. S.: Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows. In: International Journal for Numerical Methods in Fluids, 67, 441–449, 2010.

Cheng, R. T.; V. Casulli; J. W. Gartner: Tidal, Residual, Intertidal Mudflat (TRIM) Model and its Applications to San Francisco Bay, California. In: Estuarine, Coastal and Shelf Science, 36, 36, 235–280, https://doi.org/10.1006/ecss.1993.1016, 1993.

Compo, G. P.; Whitaker, J. S.; Sardeshmukh, P. D.; Matsui, N.; Allan, R. J.; Yin, X.; Gleason, B. E.; Vose, R. S.; Rutledge, G.; Bessemoulin, P.; Brönnimann, S.; Brunet, M.; Crouthamel, R. I.; Grant, A. N.; Groisman, P. Y.; Jones, P. D.; Kruk, M. C.; Kruger, A. C.; Marshall, G. J.; Maugeri, M.; Mok, H. Y.; Nordli, Ø.; Ross, T. F.; Trigo, R. M.; Wang, X. L.; Woodruff, S. D.; Worley, S. J.: The Twentieth Century Reanalysis Project. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137, 654, 1–28, https://doi.org/10.1002/qj.776, 2011.

DGJ: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Weser- und Emsgebiet Abflussjahr 1962, Hannover: Niedersächsischer Minister für Ernährung, Landwirtsaft und Forsten, 1963.

DGJ: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Unteres Elbegebiet - Abflussjahr 1962, Hamburg: Freie und Hansestadt Hamburg - Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Landwirtschaft - Strom- und Hafenbau, 1965.

DGJ: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Elbegebiet, Teil III, Untere Elbe ab der Havelmündung 2013, Hamburg Port Authority, 2015a.

DGJ: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Weser- und Emsgebiet 2013, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden, Germany, 2015b.

DGJ: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch im Internet. Pegeldaten Cuxhaven Steubenhöft 2013 -2023, 2024a. https://dgj-daten.bafg.de/Nordsee/Cuxhaven/5990020_W.pdf, zuletzt geprüft am 19.03.2025.

DGJ: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch im Internet. Pegeldaten Hamburg St.Pauli 2015 -2023, 2024b. https://hydroonline.hpanet.de/cms/assets/4449cc45-cf14-4372-8644-31acb06d49e3/eiii_w_59520505_2023.pdf, zuletzt geprüft am 18.08.2025.

Dullaart, J. C. M.; Muis, S.; Bloemendaal, N.; Aerts, J. C. J. H.: Advancing global storm surge modelling using the new ERA5 climate reanalysis. In: Climate Dynamics, 54, 1-2, 1007–1021, https://doi.org/10.1007/s00382-019-05044-0, 2020.

FHH: Drucksache 20/10597. Große Anfrage zum Hochwasserschutz und Antwort des Senats. Senat der Freien und Hansestadt Hamburg, 2014. https://www.buergerschaft-hh.de/ParlDok/dokument/43911/hochwasserschutz.pdf, zuletzt geprüft am 18.08.2025.

Fickert, M.; Strotmann, T.: Hydrodynamische Entwicklung der Tideelbe. In: Coastline Reports, 9, 59–68, 2007.

Freistadt, H.: Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 in Hamburg. In: Die Küste, 10, 81–92, 1962.

Gandoin, R.; Garza, J.: Underestimation of strong wind speeds offshore in ERA5: evidence, discussion and correction. In: Wind Energy Science, 9, 8, 1727–1745, https://doi.org/10.5194/wes-9-1727-2024, 2024.

Ganske, A.; Rosenhagen, G.: Downscaling von Windfeldern aus Lokalmodellen auf die Tideelbe. In: Die Küste, 79, 125–140, 2012.

Gaslikova; L.; Weisse; R.: coastDat-2 TRIM-NP-2d Tide-Surge North Sea, 2013. https://www.wdc-climate.de/ui/entry?acronym=coastDat-2_TRIM-NP-2d, zuletzt geprüft am 01.12.2025.

Gerber, M.; Ganske, A.; Müller-Navarra, S.; Rosenhagen, G.: Categorisation of Meteorological Conditions for Storm Tide Episodes in the German Bight. In: Meteorologische Zeitschrift, 25, 4, 447–462, https://doi.org/10.1127/metz/2016/0660, 2016.

Grabemann, I.; Gaslikova, L.; Brodhagen, T.; Rudolph, E.: Extreme storm tides in the German Bight (North Sea) and their potential for amplification. In: Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., 2019, 1–27, https://doi.org/10.5194/nhess-2019-351, 2019.

Haakenstad, H.; Breivik, Ø.; Furevik, B. R.; Reistad, M.; Bohlinger, P.; Aarnes, O. J.: NORA3: A Nonhydrostatic High-Resolution Hindcast of the North Sea, the Norwegian Sea, and the Barents Sea. In: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 60, 10, 1443–1464, https://doi.org/10.1175/JAMC-D-21-0029.1, 2021.

HPA: Gewässerkundliche Information. Hydrologisches Jahr 2025 (01.11.2024 - 31.10.2025), 2026. https://www.hamburg-port-authority.de/fileadmin/user_upload/Gewaesserkundliche_Information_2026.pdf, zuletzt geprüft am 20.06.2026.

Hundt, C.: Maßgebende Sturmfluthöhen für das Deichbestick der schleswig-holsteinischen Westküste. In: Die Küste, 3, 96–152, 1955.

Kapitza, H.: MOPS – A Morphodynamical Prediction System on Cluster Computers. In: Palma, J. M. L. M.; Palma, J. M. L. M. (Hg.): High performance computing for computational science - VECPAR 2008. 8th international conference, Toulouse, France, June 24-27, revised selected papers. Springer, Berlin, 63–68, https://doi.org/10.1007/978-3-540-92859-1_8, 2008.

Klinge, W.: Betrachtungen zu den Höhen der Deiche an Elbe und Weser. In: Die Küste, 10, 69–85, 1962.

Kruhl, H.: Sturmflutwetterlagen. In: promet, 8., 4, 6–8, 1978.

Kübler, H.: Erfahrungen mit den Hochwasserschutzanlagen in Hamburg bei den Sturmfluten im Januar 1976 und Folgerungen. In: Die Küste, 33, 101–120, 1979.

Liu, X.; Gaslikova, L.; Weisse, R.: Impact of mean sea level rise on storm surges and tide-surge interaction in the German Bight, https://doi.org/10.5194/egusphere-2026-3871, 2026.

LSBG: Die Sturmflut nach dem Tief Xaver vom 5. bis 7. Dezember 2013 (Berichte des Landesbetriebes Straßen, Brücken und Gewässer Nr. 16). Hamburg, 2014. https://lsbg.hamburg.de/resource/blob/784538/54f1a9c9124460439c06e501b4d89442/bericht-nr-16-die-sturmflut-nach-dem-tief-xaver-vom-5-bis-7-dezember-2013-data.pdf, zuletzt geprüft am 18.08.2025.

Meyer, E. M. I.: coastDat historical severe storm tides in the German Bight, 2023. https://www.wdc-climate.de/ui/entry?acronym=CoastdatStormTides, zuletzt geprüft am 27.11.2025.

Meyer, E. M. I.; Gaslikova, L.: Investigation of historical severe storms and storm tides in the German Bight with century reanalysis data. In: Natural Hazards and Earth System Sciences, 24, 2, 481–499, https://doi.org/10.5194/nhess-24-481-2024, 2024.

Meyer, E. M. I.; Weisse, R.; Grabemann, I.; Tinz, B.; Scholz, R.: Reconstruction of wind and surge of the 1906 storm tide at the German North Sea coast. In: Natural Hazards and Earth System Sciences, 22, 7, 2419–2432, https://doi.org/10.5194/nhess-22-2419-2022, 2022.

Müller-Navarra, S. H.; Bork, I.; Koziar, C.; Mudersbach, C.; Müller, A.; Rudolph, E.: Modellstudien zur Sturmflut und zum Hamburg-Orkan 1962. In: Hansa - International Maritime Journal, 143, 12, 72–88, 2006.

Pätsch, J.; Burchard, H.; Dieterich, C.; Gräwe, U.; Gröger, M.; Mathis, M.; Kapitza, H.; Bersch, M.; Moll, A.; Pohlmann, T.; Su, J.; Ho-Hagemann, H.; Schulz, A.; Elizalde, A.; Eden, C.: An evaluation of the North Sea circulation in global and regional models relevant for ecosystem simulations. In: Ocean Modelling, 116, 70–95, https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.06.005, 2017.

Petersen, M.: Sturmflut 1962 - Wasserstände an den Küsten der Nordsee. In: Die Küste, 15, 1–123, 1967.

Petersen, M.; Rhode, H.: Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe. Karl Wachholtz Verlag, Neumünster, 1991.

Prügel, H.: Die Sturmflutschäden an der schleswig-holsteinischen Westküste in ihrer meteorologischen und morphologischen Abhängigkeit. Schriften des Geographischen Instituts der Universität Kiel, 1942.

Rudolph, E.: Storm Surges in the Elbe, Jade-Weser and Ems Estuaries. In: Die Küste, 81, 291–300, 2014.

Rudolph, E.; Brodhagen, T.; Fery, N.; Gaslikova, L.; Grabemann, I.; Meyer, E.; Möller, T.; Tinz, B.; Weisse, R.: Analyse extremer Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste und ihrer möglichen Verstärkung. In: Die Küste, 87, 47–73, https://doi.org/10.18171/1.087111, 2019.

Schelling, H.: Die Sturmfluten an der Westküste von Schleswig- Holstein unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse am Pegel Husum. In: Die Küste, 1, 63–146, 1952.

Sehili, A. M.; Lang, G.; Lippert, C.: High resolution subgrid models: background, grid generation and implementation. In: Ocean Dynamics, 64, 4, 519–535, 2014.

Siefert, W.: Tiden und Sturmfluten in der Elbe und ihren Nebenflüssen. Die Entwicklung von 1950 bis 1997 und ihre Ursachen. In: Die Küste, 60, 1–115, 1998.

Slivinski, L. C.; Compo, G. P.; Whitaker, J. S.; Sardeshmukh, P. D.; Giese, B. S.; McColl, C.; Allan, R.; Yin, X.; Vose, R.; Titchner, H.; Kennedy, J.; Spencer, L. J.; Ashcroft, L.; Brönnimann, S.; Brunet, M.; Camuffo, D.; Cornes, R.; Cram, T. A.; Crouthamel, R.; Domínguez-Castro, F.; Freeman, J. E.; Gergis, J.; Hawkins, E.; Jones, P. D.; Jourdain, S.; Kaplan, A.; Kubota, H.; Le Blancq, F.; Lee, T.-C.; Lorrey, A.; Luterbacher, J.; Maugeri, M.; Mock, C. J.; Moore, G. K.; Przybylak, R.; Pudmenzky, C.; Reason, C.; Slonosky, V. C.; Smith, C. A.; Tinz, B.; Trewin, B.; Valente, M. A.; Wang, X. L.; Wilkinson, C.; Wood, K.; Wyszyński, P.: Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 145, 724, 2876–2908, https://doi.org/10.1002/qj.3598, 2019.

Smith, S. D.; Banke, E. G.: Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 101, 429, 665–673, 1975.

Wahl, S.; Bollmeyer, C.; Crewell, S.; Figura, C.; Friederichs, P.; Hense, A.; Keller, J. D.; Ohlwein, C.: A novel convective-scale regional reanalysis COSMO-REA2: Improving the representation of precipitation. In: Meteorologische Zeitschrift, 26, 4, 345–361, https://doi.org/10.1127/metz/2017/0824, 2017.

Weisse, R.; Grabemann, I.; Gaslikova, L.; Meyer, E.; Tinz, B.; Fery, N.; Möller, T.; Rudolph, E.; Brodhagen, T.; Arns, A.; Jensen, J.; Ulm, M.; Ratter, B.; Schaper, J.: Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen: Das EXTREMENESS Projekt, https://doi.org/10.18171/1.087110, 2019.

WSV: Digitales Geländemodell des Wasserlaufes: DGM-W 2016 der Unter- und Außenelbe., 2018. https://www.kuestendaten.de/Tideelbe/DE/Service/Kartenthemen/Kartenthemen_node.html, zuletzt geprüft am 03.04.2025.

WSV: DGM-W 2022 der Unter- und Außenelbe - Digitales Geländemodell des Wasserlaufes - Multifunktionsmodell, 2024. https://www.kuestendaten.de/Tideelbe/DE/Service/Kartenthemen/Kartenthemen_node.html, zuletzt geprüft am 12.03.2025.