



Sturmebben in der Tideelbe im Klimawandel

Mahavadi, T. | Jensen, C. | Seiffert, R. | Kruschke, T.

Zitiervorschlag

Mahavadi T, Jensen C, Seiffert R, Kruschke T (2022) Sturmebben in der Tideelbe im Klimawandel. Aus der Berichtsreihe: „Sonderanalysen und methodische Entwicklungen“. Berichtsreihe des Schwerpunktthemas 101 (SPT-101) im Themenfeld 1 des BMDV-Expertennetzwerks. DOI: https://doi.org/10.18451/expn_2022_01

Impressum

Digitale Publikationsreihe des Themenfeldes 1 Klimawandelfolgen und Anpassung im BMDV-Expertennetzwerk „Wissen – Können – Handeln“ zu den Forschungsergebnissen (der Schwerpunktthemen) aus der 2. Forschungsphase (2020–2025).

Die Arbeiten des BMDV-Expertennetzwerk „Wissen – Können – Handeln“ wurden durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) gefördert. Internet: [BMDV-Expertennetzwerk](#)

Das BMDV-Expertennetzwerk ist das verkehrsträgerübergreifende Forschungsformat in der Ressortforschung des BMDV. Unter dem Leitmotiv „Wissen – Können – Handeln“ haben sich sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) 2016 zu einem Netzwerk zusammengeschlossen. Ziel ist es, drängende Verkehrsfragen der Zukunft unter anderem in den Bereichen Klimawandel, Umweltschutz, alternde Infrastruktur und Digitalisierung, erneuerbare Energien und verkehrswirtschaftliche Analysen zu erforschen und durch Innovationen eine resiliente und umweltgerechte Gestaltung der Verkehrsträger zu ermöglichen.

Dieses Werk ist Teil der Öffentlichkeitsarbeit der Bundesregierung. Sie wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt.

Herausgeber: BMDV-Expertennetzwerk

Autorinnen und Autoren:

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH):

Corinna Jensen, Tim Kruschke

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW):

Tara Mahavadi, Rita Seiffert

Redaktionsschluss: Monat/ 2022

Titelbild: (von oben nach unten)

1. Hamburger Hafen (Bundesanstalt für Gewässerkunde | Enno Nilson)
2. Beladung eines Containerschiffs (Bundesanstalt für Gewässerkunde | Enno Nilson)
3. Windfahne auf Spiekeroog (Bundesanstalt für Gewässerkunde | Enno Nilson)
4. Die HafenCity bei Sturmebbe (HafenCity Zeitung | Michael Baden)
5. Die Speicherstadt bei Sturmebbe (HafenCity Zeitung | Michael Baden)
6. Die Speicherstadt bei Sturmebbe II (HafenCity Zeitung | Michael Baden)

DOI: https://doi.org/10.18451/expn_2022_01

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	1
2	Hintergrund und Ziele	2
3	Definition Sturmebben	3
4	Daten und Methoden	5
4.1	Messdaten	5
4.1.1	Pegeldaten	5
4.1.2	Abflussmessungen	5
4.2	Reanalysedaten	5
4.2.1	ERA5 Reanalyse	5
4.2.2	COSMO-REA6-Reanalyse	6
4.2.3	UERRA-HARMONIE	6
4.3	Meteorologische Methoden	6
4.3.1	LAMB-Wetterlagen-Klassifikation	6
4.3.2	Sturmstärke	7
4.3.3	Effektiver Wind	7
4.4	Hydrodynamische Modellierung	8
4.4.1	Das hydrodynamisch-numerische Modell	8
4.4.2	Verwendete Randwerte	10
4.4.3	Modellvalidierung	12
4.4.4	Szenarien zu Meeresspiegelanstieg, Abfluss und Topographieänderung	13
4.4.5	Hydrodynamische Analyseparameter	16
5	Sturmebben 1987 und 2018	17
5.1	Sturmebbe 2018	17
5.2	Sturmebbe 1987	19
6	Klimatologische Analyse der meteorologischen Größen	22
6.1	Meteorologische Bedingungen vor Sturmebben	22
6.1.1	Wetterlagen	22
6.1.2	Sturmstärke	23
6.1.3	Effektiver Wind	23
6.2	Zeitliche Entwicklung im Vorfeld von Sturmebben	25
7	Hydrographische Betrachtung der Vergangenheit	29
7.1	Abflussentwicklung der Tideelbe	29
7.2	Meeresspiegelanstieg	30
7.3	Wasserstände in der Tideelbe	31
8	Klimawandelbedingte Änderungen wichtiger Einflussfaktoren	35

8.1	Zukünftige Änderungen der meteorologischen Einflussfaktoren	35
8.2	Änderung der Abflussverhältnisse der Tideelbe	36
8.3	Zukünftiger Meeresspiegelanstieg und Wattwachstum	36
9	Hydrodynamische Sensitivitätsstudie mittels Modellierung zweier Sturmebben	38
9.1	Ergebnisse der Sensitivitätsstudie Sturmebbe 2018	38
9.1.1	Änderung durch Abflussvariation	38
9.1.2	Änderung durch Meeresspiegelanstieg mit sowie ohne Wattwachstum	41
9.2	Ergebnisse des Sturmebbenszenarios 1987	47
9.3	Zusammenfassung und Diskussion der Hydrodynamischen Sensitivitätsstudie	49
9.3.1	Sensitivitätsstudie Sturmebbe 2018	49
9.3.2	Sturmebbenszenario 1987	50
10	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	51
11	Ausblick	53
12	Abbildungsverzeichnis	54
13	Literatur	58
14	Anhang	61
14.1	Modellvalidierung - weitere Pegel	61
15	Abkürzungsverzeichnis	65

1 Kurzfassung

In der Deutschen Bucht und ihren tidebeeinflussten Flussmündungen kann starker ablandiger Wind zu einer deutlichen Reduktion des Wasserstandes führen. Dadurch kann die Befahrbarkeit der Wasserstraßen eingeschränkt, und die Standfestigkeit von Uferbauwerken gefährdet werden. Da es für die durch starken Wind verursachten besonders niedrigen Wasserstände, anders als bei dem Gegenteil *Sturmflut*, keine einheitliche Definition oder Bezeichnung gibt, wird in der hier vorgestellten Untersuchung der Begriff *Sturmebbe* verwendet und mit einer eigenen Definition versehen. In diesem Bericht *Sturmebben in der Tideelbe im Klimawandel* wird untersucht, welchen Einfluss der Klimawandel auf Sturmebben haben könnte. Der Fokus der Untersuchung liegt dabei auf der Tideelbe¹. Es wird der Einfluss des Klimawandels auf Sturmebben durch eine mögliche Änderung der Einflussgrößen: Meteorologische Verhältnisse, Meeresspiegelanstieg und Wattwachstum sowie der Abflussverhältnisse in die Tideelbe analysiert und diskutiert.

Die Untersuchung zeigt, dass vor Sturmebben sowohl Wetterlagen in Verbindung mit südöstlichen Windrichtungen über der Nordsee, als auch „Sturm“ deutlich häufiger aufgetreten sind, als zu mittleren Bedingungen. Der für Sturmebben in der Tideelbe berechnete effektive Wind liegt während Sturmebben deutlich höher als im Mittel. Eine Analyse von Pegeldaten ergibt, dass extrem niedrige Tideniedrigwasserstände am Pegel St. Pauli in der Vergangenheit zwischen 1950 und 2020 relativ zum Pegel Cuxhaven deutlich abgesunken sind.

Um den Einfluss möglicher Meeresspiegelanstiegs-, Wattwachstums- und Abflusszenarien auf Sturmebben in der Tideelbe zu untersuchen, wird eine Sensitivitätsstudie mittels Modellierung zweier Sturmebben durchgeführt, welche sich im März 1987 sowie im März 2018 ereigneten. Die Simulationsergebnisse zeigen, wie stark das niedrigste Tideniedrigwasser (NTnw) der Sturmebbe 2018 am Pegel St. Pauli bei den verschiedenen Meeresspiegelanstiegsszenarien ansteigt. Weiterhin zeigen die Ergebnisse in welchem Maß ein veränderter Abfluss einen Einfluss auf das NTnw der Sturmebbe 2018 entlang der Tideelbe hat. Würde das meteorologische Ereignis vom März 1987 im heutigen Zustand² bei einem geringeren Abfluss auftreten, so deuten die Simulationsergebnisse darauf hin, dass das niedrigste jemals beobachtete Tnw (NNTnw) bei St. Pauli noch untertroffen werden könnte.

Betrachtete Analysen zur Entwicklung der Wetterlagen im Klimawandel aus der Fachliteratur deuten darauf hin, dass Süd-Ost-Wetterlagen, welche zu Sturmebben führen können, in Zukunft seltener werden. Die betrachteten Abschätzungen zur zukünftigen Abflussentwicklung deuten nicht auf eine Abnahme des mittleren jährlichen Abflusses in naher und ferner Zukunft hin. Die Projektionen des IPCC (2021) zum zukünftigen globalen mittleren Meeresspiegelanstieg unterscheiden sich, insbesondere für das Ende des Jahrhunderts, stark je nach sozioökonomischem Entwicklungspfad.

Nach den Erkenntnissen dieser Untersuchung wird es langfristig im Klimawandel zu einer geringeren Beeinträchtigung durch Sturmebben in der Tideelbe kommen. In naher Zukunft können jedoch bisherige extrem niedrige Wasserstände in der Tideelbe untertroffen werden, bevor der Meeresspiegelanstieg überwiegt. Eine genauere zeitliche Einordnung und quantitative Einschätzung der zukünftigen Entwicklung von Sturmebben in der Tideelbe ist aufgrund der Unsicherheiten in der Abschätzung der Entwicklung der Einflussgrößen nicht möglich.

¹ tidebeeinflusste Flussmündung der Elbe

² Topographie von 2019 in der Tideelbe

2 Hintergrund und Ziele

Starke ablandige Winde können in der Deutschen Bucht und den angrenzenden tidebeeinflussten Flussmündungsgebieten (Ästuaren) zu einer deutlichen Reduktion des Wasserstandes führen. Die durch Wind verursachte Absenkung des Wasserstandes wird als Windsunk bezeichnet (Norm DIN 4049-3 : 1994-10). Durch die besonders niedrigen Wasserstände und die hohen Windgeschwindigkeiten während dieser Ereignisse kann es zu Einschränkungen des Schiffsverkehrs der in den Ästuaren verlaufenden Bundeswasserstraßen kommen. Da extrem niedrige Tideniedrigwasserstände die Standfestigkeit von Wasserbauwerken gefährden können, wird das NNTnw (niedrigster bekannter Tideniedrigwasserstand DIN 4049-3 : 1994-10 (1994)) als eine zu berücksichtigende Bemessungsgrundlage für viele Bauwerke herangezogen (siehe beispielsweise (LSBG und HPA 2013) und (EAU 2021)).

Für die durch Windsunk verursachten besonders niedrigen Wasserstände gibt es nach unserer Kenntnis, anders als bei dem Gegenteil *Sturmflut*, keine einheitliche Definition oder Bezeichnung. In der hier vorgestellten Untersuchung wird daher der Begriff *Sturmebbe* verwendet und mit einer eigenen Definition versehen (siehe Abschnitt 3). Es wird dabei exemplarisch der Fokus auf das Elbeästuar gelegt, da der Hamburger Hafen, der größte deutsche Seehafen und der drittgrößte Containerhafen Europas, in der Tideelbe liegt und von besonderer Bedeutung für den See- und Binnentransport ist.

Der Klimawandel kann Sturmebben zukünftig hinsichtlich mehrerer Prozesse beeinflussen: Ein verändertes Klima ändert die großskalige Zirkulation (IPCC 2021) und damit auch die Wetterlagen über der Nordsee. Dies wiederum kann die Häufigkeit, Intensität und Dauer von Sturmebben beeinflussen. Der für dieses Jahrhundert prognostizierte globale mittlere Meeresspiegelanstieg (SLR) (IPCC 2021) wird die Wasserstände in der Deutschen Bucht und der Tideelbe anheben und die Tidedynamik verändern (Wachler et al. 2020; Jordan et al. 2021; Khojasteh et al. 2021; Rasquin et al. 2020), was zu einer Veränderung der Watttopographie führen kann, die wiederum die Tidedynamik beeinflusst (Friedrichs 2011). Ein mögliches verändertes Niederschlagsverhalten im Einzugsgebiet der Elbe beeinflusst den Abfluss in die Tideelbe (Brienen et al. 2020), welcher ebenfalls Einfluss auf die Wasserstände hat.

In diesem Bericht wird zunächst eine Definition von Sturmebben für die Tideelbe entwickelt. Anschließend wird untersucht welche meteorologischen Bedingungen diese Sturmebben begünstigen. Darauf folgt eine Analyse der Entwicklung extrem niedriger Tideniedrigwasserstände in der Tideelbe in der Vergangenheit. Zudem werden in der Fachliteratur präsentierte Abschätzungen zur Änderung der Einflussfaktoren Abfluss, Meeresspiegelanstieg und Wetterlagen zusammengefasst. Anschließend wird mithilfe einer Sensitivitätsstudie mittels Modellierung ausgewählter Sturmebben der Einfluss möglicher Meeresspiegelanstiegs-, Wattwachstums- und Abflussszenarien auf Sturmebbenwasserstände in der Tideelbe untersucht.

3 Definition Sturmebben

Für besonders niedrige durch Windsunk verursachte Wasserstände gibt es nach unserer Kenntnis, anders als bei dem Gegenteil *Sturmflut*, keine einheitliche Definition oder Bezeichnung. In der englischen Literatur wird u.a. die Bezeichnung *negative storm surge* (Gönnert et al. 2001) oder *sea level blowout* (Gurumurthy et al. 2019) verwendet.

In der hier vorgestellten Untersuchung wird im Folgenden der Begriff *Sturmebbe* verwendet und mit einer eigenen Definition versehen. Der Fokus dieser Untersuchung liegt dabei auf extrem niedrigen Tideniedrigwasserständen, welche durch starken Wind verursacht werden. Das gespiegelte Äquivalent zu diesen Ereignissen sind Sturmfluten. An der deutschen Nordseeküste sind Sturmfluten definiert als Ereignisse mit einem Wasserstand höher als 1,5 m über dem mittleren Tidehochwasser (MThw) (BSH 2020). In der vorliegenden Untersuchung werden Sturmebben, die mit einer vergleichbaren Häufigkeit wie Sturmfluten auftreten, betrachtet. Am Pegel Cuxhaven traten auf Datenbasis von Gerber et al. (2016) in dem Zeitraum von 1949–2012 am Pegel Cuxhaven 246 Sturmfluten auf, was im Durchschnitt etwa 4 Sturmfluten pro Jahr entspricht. Bei im Durchschnitt 706 Tiden pro Jahr entsprechen die Sturmfluttiden am Pegel Cuxhaven in diesem Zeitraum von 63 Jahren dem 99,45. Perzentil aller Tidehochwasser (Thw). Für die Definition der Sturmebben wählen wir entsprechend das 0,55. Perzentil aller Tideniedrigwasser (Tnw) am Pegel Cuxhaven. Dies entspricht, auf Grundlage der in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Datenbasis, für den Zeitraum 1950-2019 allen Tnw niedriger als NHN -2,50 m am Pegel Cuxhaven.

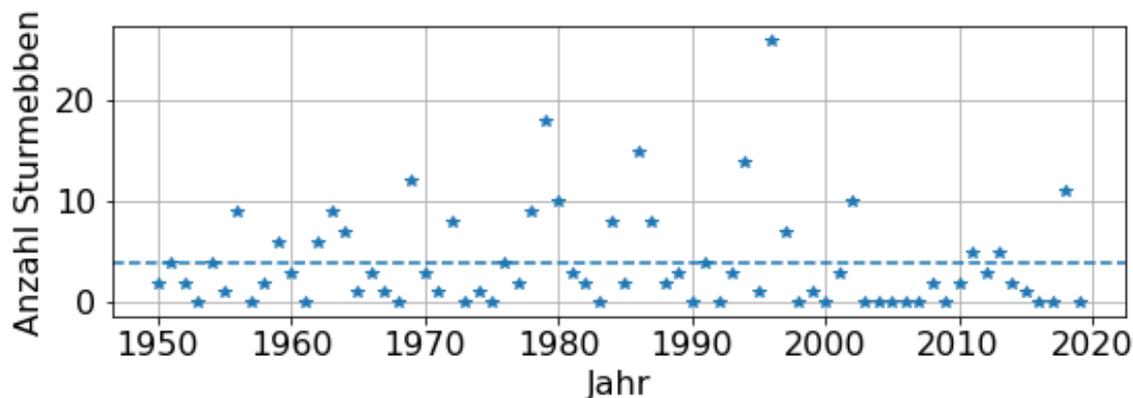


Abbildung 3-1 | Häufigkeit der Sturmebben am Pegel Cuxhaven pro Jahr (gekennzeichnet durch Sterne) und im Mittel (gekennzeichnet durch die gestrichelte Linie) für den Zeitraum 1950–2019.

Basierend auf oben genannter Sturmebben-Definition werden im Betrachtungszeitraum 1950–2019 271 Tnw (folgend „Sturmebbe“) aus den Pegeldaten für die Messreihe in Cuxhaven identifiziert. An dieser Stelle ist zu betonen, dass diese Ereignisse nicht alle unabhängig voneinander sind. Oft führt eine großskalige Wetterlage (siehe unten) zu einer Abfolge mehrerer Niedrigwasser, die das hier genannte Kriterium einer Sturmebbe erfüllen. Eine solche Reihe an Sturmebben wird im folgenden Sturmebbenkette genannt. Abbildung 3-1 zeigt die jährliche Anzahl von Sturmebben am Pegel Cuxhaven. Diese Zeitreihe ist von hoher interannueller Variabilität gekennzeichnet, ein statistisch signifikanter Trend ist im Beobachtungszeitraum nicht vorhanden. In Abbildung 3-2 ist die Verteilung der 271 Sturmebben auf die Monate dargestellt. Alle 271 Sturmebben traten in der Zeit zwischen Oktober und April auf, die meisten in den Monaten Januar, Februar und März.

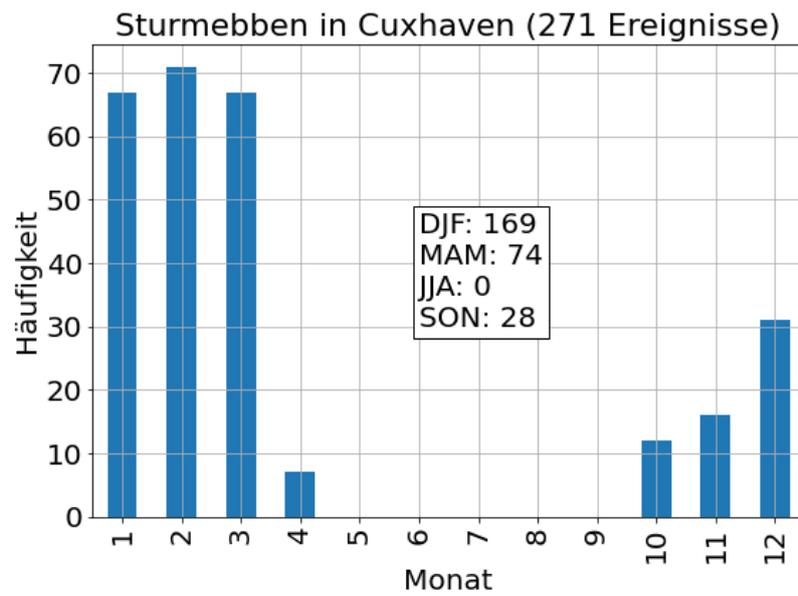


Abbildung 3-2 | Verteilung der 271 Sturmebben am Pegel Cuxhaven auf die einzelnen Monate und Jahreszeiten (Winter=DJF, Frühling =MAM, Sommer = JJA, Herbst = SON) im Zeitraum 1950–2019.

4 Daten und Methoden

4.1 Messdaten

4.1.1 Pegel­daten

Als fundamentaler Ausgangsdatensatz werden Pegelmessdaten der Tideniedrigwasserstände der Stationen Cuxhaven und St. Pauli für den Zeitraum 1950–2019 genutzt. Die Daten wurden zuletzt im Juni 2021 vom Portal Küstendaten der WSV (<https://www.kuestendaten.de/DE/>) heruntergeladen. Die Zeitpunkte der Tideniedrigwasser, welche unter die in dieser Untersuchung getroffene Definition einer Sturm­ebbe fallen, werden anschließend für die meteorologischen Analysen (siehe Abschnitt 6) verwendet. Der genannte Datensatz wird außerdem genutzt, um die Entwicklung besonders niedriger Wasserstände an den beiden Pegeln Cuxhaven und St. Pauli in dem Zeitraum 1950–2019 zu analysieren und visualisieren (siehe Abschnitt 7).

4.1.2 Abflussmessungen

Für die hydrodynamisch numerische Modellierung in Abschnitt 4.4 wird auch der gemessene Abfluss am Pegel Neu Darchau für die Elbe als Randwerte genutzt. Für die Modellsimulationen zweier extremer Sturm­ebben werden die Abflussdaten für den Februar und März 1987 bzw. 2018 verwendet. Die Daten wurden zuletzt im Juni 2021 vom Portal Tideelbe (<http://www.portal-tideelbe.de/>) heruntergeladen und wurden vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Magdeburg erhoben.

4.2 Reanalysedaten

Reanalysen sind Verfahren, die es ermöglichen langfristige meteorologische Datensätze zu erstellen, die auf Beobachtungsdaten basieren. Vorteil ist hier, dass die Ausgabedatensätze eine lückenlose, physikalisch konsistente vierdimensionale Rekonstruktion des vergangenen Atmosphärenzustandes darstellen. Dazu werden eine Vielzahl unterschiedlichster Beobachtungsdaten in ein Wettermodell assimiliert, welches dann gemäß der physikalischen und dynamischen Modellgleichungen sämtliche Variablen der kompletten durch das Modell abgedeckte Atmosphäre berechnet. Unterschiedliche Wetterdienste nutzen ihre eigenen numerischen Modelle und berücksichtigen ggf. einen unterschiedlichen Umfang an zu assimilierenden Beobachtungsdaten, um Reanalysen zu erstellen. Für diese Arbeit werden für verschiedene Zwecke die Daten von drei verschiedenen Reanalysen verwendet.

4.2.1 ERA5 Reanalyse

ERA5 ist der Nachfolger der ERA-Interim Reanalyse des *Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage* (Hersbach, H et. Al 2020, ECMWF 2021) und als solche eine der modernsten und fortschrittlichsten globalen Reanalysen, welche unter Verwendung des globalen Wettervorhersagesystems *IFS* erstellt wurde. Die ERA5 Daten liegen in einem hochaufgelösten Gitter mit 0.25° Gitterweite und in stündlicher Auflösung für den Zeitraum 1979 bis heute vor und werden in regelmäßigen Abständen aktualisiert. Für einen längeren Zeitraum werden die vorläufigen Daten für den Zeitraum 1950 bis 1978 ebenfalls in die Analyse mit einbezogen, sodass sich ein gesamter Zeitraum von 1950 bis 2019

ergibt Die Daten wurden zuletzt im August 2021 vom Copernicus Climate Data Store (<https://cds.climate.copernicus.eu/>) heruntergeladen.

Der Luftdruck auf Meeressniveau (Sea Level Pressure = SLP) wird in instantanen Werten ausgegeben. Für die folgenden Untersuchungen werden diese Daten folgendermaßen genutzt: (1) Für tägliche Mittelwerte wird hier ein Mittel über die stündlichen Werte von 00 Uhr bis 23 Uhr berechnet. (2) Zur besseren Darstellung der zu der jeweiligen Sturmbebe führenden Wetterlage wird ein 24-Stunden-Mittel als Mittel über die 24 Stunden vor dem Ereignis inklusive der Stunde des Ereignisses errechnet. (3) Für die detaillierten Untersuchungen der vorhergehenden Bedingungen in Abschnitt 6.2 werden die stündlichen instantanen Werte verwendet.

4.2.2 COSMO-REA6-Reanalyse

Die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe sowie der Luftdruck auf Höhe der Geländeoberfläche für den Februar und März 2018, die zur hydrodynamisch-numerischen Modellierung des Sturmbebe 2018 verwendet wird, stammt aus dem regionalen Reanalyse-System COSMO-REA6 (Bollmeyer et al. 2015). COSMO-REA6 deckt die Jahre 1995–2015 durch stündliche Felder über Europa (EURO-CORDEX-Region) mit einer 6x6 km Auflösung ab. Die Daten werden vom Hans-Ertel-Zentrum der Universität Bonn in Zusammenarbeit mit dem DWD erstellt und zur Verfügung gestellt (<https://reanalysis.meteo.uni-bonn.de/?COSMO-REA6> und https://opendata.dwd.de/climate_environment/REA/COSMO_REA6/)

4.2.3 UERRA-HARMONIE

Die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe sowie der Luftdruck auf Höhe der Geländeoberfläche für den Februar und März 1987, die für die hydrodynamisch numerische Modellierung der Sturmbebe 1987 verwendet wird, stammt aus dem regionalen Reanalyse-System UERRA-HARMONIE (SMHI 2017; SMHI 2018). UERRA ist ein Europäisches FP7 Reanalyse-Projekt für meteorologische Daten (<http://www.uerra.eu/project-overview/about.html>). UERRA-HARMONIE deckt die Jahre 1961–2019 mit einer 11x11 km Auflösung durch stündliche Felder über Europa und Nordafrika ab. Die Daten wurden zuletzt im Juli 2021 vom Copernicus Climate Data Store (<https://cds.climate.copernicus.eu/>) heruntergeladen.

4.3 Meteorologische Methoden

4.3.1 LAMB-Wetterlagen-Klassifikation

Eine zusammenhängende Beschreibung der regionalen atmosphärischen Zirkulation ist mithilfe definierter Zirkulationsmuster oder Wetterlagen möglich (z. B. Lamb 1950). Am BSH wird dazu im Rahmen der Analysen des Nordseezustands das von Jenkinson und Collison (1977) zur Objektivierung der „Lamb Weather Types“ entwickelte automatische Klassifizierungsverfahren verwendet (Löwe 2005). Dieses Klassifizierungsverfahren wird auch für die folgenden Untersuchungen angewendet.

Das Verfahren besteht in der Auswertung von Tagesmitteln der Luftdruckfelder auf Meeressniveau an 16 Gitterpunkten im erweiterten Nordseeraum (siehe Abbildung 4-1), die zur Bestimmung repräsentativer Indizes für Wind und Vorticity herangezogen werden. Aus diversen Relationen zwischen diesen Indizes lassen sich Wetterlage und Sturmstärke ableiten. Die Wetterlagen (und deren Abfolge) bieten einen ersten Überblick über die vorherrschenden Windverhältnisse und mögliche Zugbahnen von Tiefdruckgebieten. Während das Klassifizierungsverfahren ursprünglich 27 verschiedene Wetterlagen zulässt, wird hier mit einem auf 6 Wetterlagen reduzierten Klassifizierungsverfahren gearbeitet (Löwe

2005, Löwe 2009). Diese 6 charakteristischen Wetterlagen sind: Antizyklonal (A), Zyklonal (C), Nordost (NE), Nordwest (NW), Südost (SE), Südwest (SW).

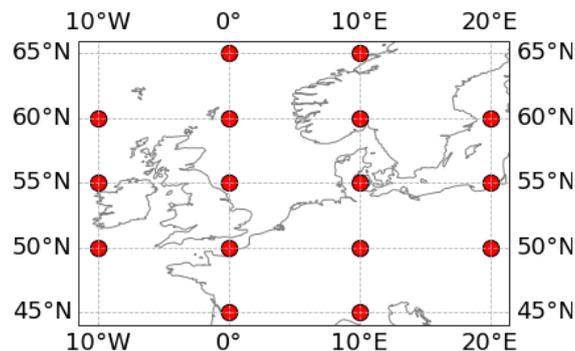


Abbildung 4-1 Lage der 16 Gitterpunkte, die zur Berechnung der Lamb-Wetterlagen verwendet werden.

4.3.2 Sturmstärke

Eine weitere Größe, die bei Sturmebben eine Rolle spielt ist die *Sturmstärke*. Auch diese ist in einer Ausgabegröße der LAMB Wetterlagen-Klassifikation widerspiegelt. Aus dem Luftdruckfeld werden Wirbelstärke und Windindex für das betrachtete Gebiet errechnet. Der für die Nordseeregion repräsentative Sturmindex G^* ergibt sich über eine elliptische Beziehung zwischen Windindex V^* und Wirbelstärke (Vorticity) ζ^* :

$$G^* = \sqrt{V^{*2} + \frac{\zeta^{*2}}{4}}$$

Die Klassen *NUL* („No Gale“, kein Sturm), *G* („Gale“, Sturm), *SG* („Severe Gale“, starker Sturm) und *VSG* („Very Severe Gale“, sehr starker Sturm) sind im Referenzklima (1971–2000) durch das 90., 98. und 99,73. Perzentil der G^* -Verteilung gegeneinander abgegrenzt (Loewe et al. 2013). Ein Sturm liegt also vor, sobald der Sturmindex G^* in eine der drei Sturmklassen fällt, die über dem 90. Perzentil des Sturmindex liegen. Das bedeutet, dass im langjährigen Mittel mit diesem Verfahren an 36,5 Tagen pro Jahr ein Sturm identifiziert wird.

4.3.3 Effektiver Wind

Neben der Sturmstärke und der großskaligen Zirkulation ist es vor allem der *effektive Wind*, der den Pegelstand beeinflusst. Unter dem effektiven Wind versteht man den Wind (bzw. den Anteil des Windes) der aus jener Windrichtung wirkt, bei der der Effekt auf den Wasserstand am stärksten ist. Im Fall der hier betrachteten Sturmebben ist dies also die Windrichtung aus der der Wind kommen muss um das Wasser aus der Tideelbe zu treiben und so für einen anomal niedrigen Pegel zu sorgen. Wenn man diese Windrichtung maximaler Wirkung kennt, dann kann man den effektiven Wind berechnen, indem man den Windvektor auf diese Windrichtung projiziert. Als Nebenprodukt der LAMB Wetterlagenklassifikation werden die Vektorkomponenten des geostrophischen Windes ausgegeben, also der Wind, der parallel zu den Isobaren, d.h. den Linien gleichen Luftdrucks, weht. Der geostrophische Wind ist eine gute Approximation der großskaligen Windverhältnisse unter Vernachlässigung jeglicher Reibungseffekte (z. B. am Erdboden).

Um eine effektive Windrichtung für den Pegel Cuxhaven für die hier untersuchten Sturmebben zu erhalten werden jeweils die zeitlich gemittelten U- und V-Komponenten für die 24 Stunden vor 271

Sturmebben in Cuxhaven extrahiert und mittlere Komponenten (u_m, v_m) errechnet (siehe dazu auch Abbildung 6-3). Diese mittleren Komponenten bestimmen jene Windrichtung, die im Mittel zu den Sturmebben geführt hat. Im Fall der 271 Sturmebben in Cuxhaven ergibt sich so eine effektive Windrichtung von 142° . Nun werden die bisherigen U- und V-Komponenten des gesamten Zeitraums auf die Windrichtung von 142° projiziert und man erhält den Betrag des Windanteils, der effektiv aus der Windrichtung von 142° weht. Diese Windgeschwindigkeit wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit als der *effektive Wind* bezeichnet. Diese Methode wurde bereits in mehreren Projekten im Zusammenhang mit Sturmfluten verwendet, siehe z. B. (Koziar and Renner 2005) und (Ganske et al. 2018)

4.4 Hydrodynamische Modellierung

Die Auswirkung möglicher zukünftiger Veränderungen der Einflussfaktoren Abfluss, Meeresspiegelanstieg und Topographieänderung auf die besonders niedrigen Tideniedrigwasserstände während Sturmebben in der Tideelbe wird in einer Sensitivitätsstudie mittels hydrodynamisch-numerischer Modellierung ausgewählter Extremereignisse untersucht. Es werden dafür zwei Sturmebbenketten aus den Jahren 2018 und 1987 ausgewählt und in verschiedenen Szenarien mit variierten Einflussfaktoren simuliert. Die Einflussfaktoren werden einzeln sowie in Kombination bezüglich ihres Effekts auf das NTnw (niedrigstes Tnw) der Sturmebbenketten untersucht. Anhand der Ergebnisse können Wenn-Dann-Aussagen zur Änderung der NTnw bei Änderung der Einflussfaktoren getroffen werden. Details zu dem verwendeten Modell, der Analyse der Simulationsergebnisse, den eingesteuerten Randwerten und den gewählten Szenarien sind im Nachfolgenden beschrieben.

4.4.1 Das hydrodynamisch-numerische Modell

UnTRIM²

Für die hydrodynamische Sensitivitätsstudie mittels Modellierung ausgewählter Extremereignisse wird das hydrodynamisch-numerische Modellverfahren UnTRIM² (Casulli 2008) eingesetzt. Das auf der Methode der Finiten-Differenzen/ Finiten-Volumen basierende zwei- und drei-dimensionale mathematische Verfahren UnTRIM² dient der Simulation stationärer und instationärer Strömungs- und Transportprozesse in Gewässern mit freier Wasseroberfläche. Es ist ein Verfahren zur numerischen Lösung der dreidimensionalen Flachwassergleichungen sowie der dreidimensionalen Transportgleichung für Salz, Wärme, Schwebstoffe sowie suspendierte Sedimente. UnTRIM² verwendet ein unstrukturiertes orthogonales Gitter. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich im UnTRIM-Validierungsdokument (BAW 2004).

Mit diesem Berechnungsverfahren können flächendeckend für jede Gitterzelle und jeden Zeitschritt u. a. folgende physikalische Größen berechnet und ausgegeben werden:

- Wasserspiegelauslenkung (bezüglich NHN)
- Strömungsgeschwindigkeit
- Tracerkonzentration (z. B. Salzgehalt, Temperatur, Schwebstoffgehalt)

Eine Besonderheit in der Anwendung des Modellverfahrens UnTRIM² liegt in der Subgrid-Technologie, mit welcher es möglich ist die Bathymetrie des Modellgebietes genauer und unabhängig von dem Berechnungsgitter wiederzugeben. Die SubGrid-Technologie erlaubt einen graduelleren und realistischeren Übergang von nass zu trocken, mit geringerer Energiedissipation (Sehili et al. 2014). Ein besonderer

Vorteil ergibt sich somit für die naturähnliche Darstellung von Überflutungsvorgängen auf den Wattgebieten, welche für die vorliegende Fragestellung relevant ist.

Der Einfluss des Windes auf Wasserstand und Strömung ist bei einer Sturmflut von besonderer Bedeutung. Der Impulseintrag aus der Atmosphäre wird parametrisiert und durch die Windschubspannung mithilfe eines Windschubspannungskoeffizient (Impulsaustauschkoeffizient) C_D beschrieben. Es gibt für diesen Koeffizienten verschiedene empirische Ansätze. Für diese Untersuchungen wird C_D nach S. D. Smith und E. G. Banke (1975) berechnet. Der Ansatz von S. D. Smith und E. G. Banke (1975) beruht auf gemessenen Windgeschwindigkeiten im Bereich von 3 bis 22 m/s. In diesem Bereich wächst der Windschubspannungskoeffizient an, da sich die Oberflächenrauigkeit der Wasseroberfläche aufgrund zunehmender Wellenhöhe vergrößert. Die Verwendung des Ansatzes von Smith und Banke ist für Windgeschwindigkeiten bis 26 m/s validiert und hat sich für die Nordsee bewährt (Jensen et al. 2006).

Modellgebiet und Topographie

Das Modellgebiet des für diese Untersuchungen verwendeten hydrodynamisch numerischen Modells (HN-Modell) umfasst das Gebiet der gesamten Deutschen Bucht von Terschelling in den Niederlanden bis Hvide Sande in Dänemark sowie die Ästuar von Ems, Weser und Elbe (siehe Abbildung 4-2). Die landseitige Grenze des Modells ist der heutige Verlauf der Deichlinie, welche im Modell nicht überflutet werden kann. Fokusgebiet dieser Untersuchungen ist die Tideelbe. Die landseitige Modellgrenze der Tideelbe befindet sich bei Bleckede. Für diese Untersuchung wird das Wehr Geesthacht geschlossen, sodass sich die tatsächliche Tidegrenze beim Wehr Geesthacht befindet.

Die Topographie-Daten stammen aus Peildaten der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), die in dem Projekt EasyGSH-DB (Hagen et al. 2019) bzw. dem Funktionalen Bodenmodell (Milbradt et al. 2015) zusammengetragen wurden. Diese digitalen Geländemodelle (DGMs) beinhalten die Topographie der Deutschen Bucht aus dem Jahr 2010. Für den Bereich der Tideelbe wird eine Topographie aus dem Jahr 2019 verwendet. Die Tiefeninformation aus den DGMs wird auf die SubGrid-Zellen des Modells übertragen.

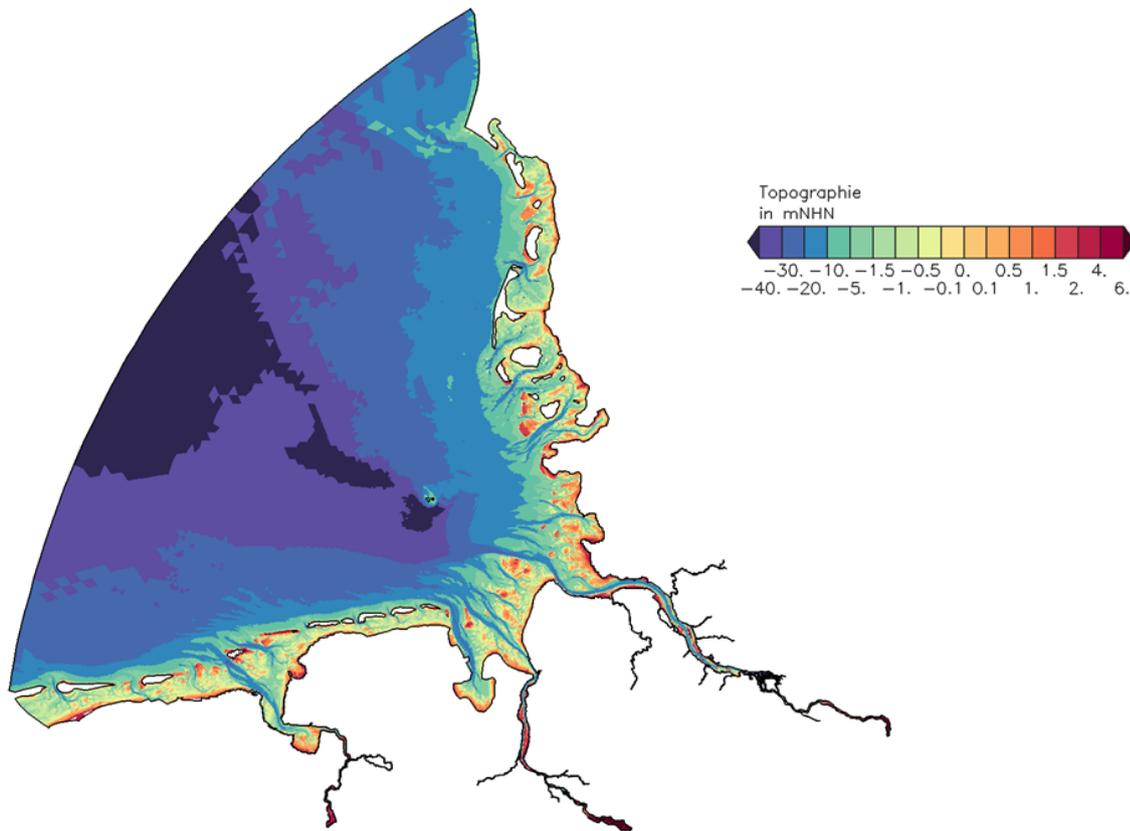


Abbildung 4-2 | Topographie des Deutsche Bucht Modells.

Gitternetz

Das verwendete unstrukturiert orthogonale Gitternetz besteht aus dreieckigen und viereckigen Gitterelementen. Das Rechengitternetz hat 113.213 Elementen, 85.968 Knoten und 199.217 Kanten. Die Diskretisierung der Rechenzellen ist räumlich variabel. Die Kantenlänge liegt dabei zwischen 5 km am seeseitigen Rand und reduziert sich auf bis zu 20 m im Küstenbereich und den Ästuaren. In der Elbe beträgt die Kantenlänge etwa 250 m im Mündungsbereich und etwa 50-150 m im Bereich des Hafens. Die vertikale Auflösung des Gitters liegt im gesamten Modell bis zu einer Tiefe von 27,5 m bei 1 m und vergrößert sich darunter auf bis zu 10 m. Die Anzahl der SubGrid-Zellen pro Rechenzelle ist variabel gewählt, mit einer hohen Auflösung im Küstenbereich und den Ästuaren. Das gesamte Modell umfasst 11.946.466 Subgridelemente.

4.4.2 Verwendete Randwerte

Sturmebbe 2018

Für die Simulation der Sturmebbe 2018 stammen die Randwerte des Wasserstands aus dem Kontinentalschelfmodell DCSMv6-FM, welches auf dem Vorgängermodell Dutch Continental Shelf Model Version 6 (DCSMv6) (Zijl et al. 2013, Zijl et al. 2015) basiert und das gesamte nordwesteuropäische Kontinentalschelf umfasst. Der für die verschiedenen Szenarien verwendete Meeresspiegelanstieg wird im Deutsche Bucht Modell auf die am seeseitigen Rand eingesteuerten Randwerte des Wasserstands adaptiert. Die Winddaten, die in dem Schelfmodell (DCSMv6-FM) und dem Deutsche Bucht Modell für die

Simulation der Sturmebbe 2018 verwendet werden, stammen aus dem Reanalyse-System COSMO-REA6 ((Hans-Ertel-Zentrum für Wetterforschung)(Bollmeyer et al. 2015)) (siehe Abschnitt 4.2.2.) Da ein Vergleich der Winddaten aus dem Reanalysedatensatz mit Messdaten an einigen Orten im Modellgebiet (u.a. Messtation Helgoland und Cuxhaven) deutlich zu niedrige Windgeschwindigkeiten während der Sturmebbe zeigt, wird die Windgeschwindigkeit für die Simulation um 10 % erhöht. Für den Oberwasserzufluss der Ästuarie werden gemessene Zeitreihen des Abflusses im Zeitraum der Sturmebbe 2018 bei Versen für die Ems, bei Intschede für die Weser und bei Neu Darchau für die Elbe verwendet (siehe Abschnitt 4.1.2). Der Abfluss in die Tideelbe wird im Modell am Wehr Geesthacht eingesteuert, welches im Modell gestellt ist.

Tabelle 4-1 | Randwerte für die Simulation der Sturmebbe 2018.

Randwerte	Herkunft
Oberwasserzufluss	Messung Neu Darchau (600-800 m ³ /s)
Seeseitiger Wasserstand Zusätzlich mit SLR von	Schelfmodell DCSMv6-FM +10, + 30, +50, +80 und +110 cm
Windfeld über dem gesamten Modellgebiet Windgeschwindigkeit um 10 % erhöht	COSMO-REA6 (6 x 6 km, stündlich)
Salz	
Seeseitig	Konstant 33 PSU
Abfluss Elbe	Konstant 0,4 PSU
Abfluss Nebenflüsse der Elbe	Konstant 0,3 PSU

Tabelle 4-2 | Simulations- und Analysezeitraum für die Sturmebbe 2018.

Simulationszeitraum	02.02.2018 – 31.03. 2018
Simulationszeitschritt	30 s
Ausgabezeitschritt	10 min
Analysezeitraum	25.02.2018 – 26.03.2018

Sturmebbe 1987

Für die Simulation der Sturmebbe 1987 werden Randwerte des Wasserstands ebenfalls mit dem Kontinentalschelfmodell DCSMv6-FM erzeugt. Die Winddaten, die in dem Schelfmodell (DCSMv6-FM) und dem Deutsche Bucht Modell für die Simulation der Sturmebbe 2018 verwendet werden, stammen aus dem Reanalyse-System von UERRA HARMONIE (SMHI 2018) (siehe Abschnitt 4.2.3). Da ein Vergleich der Winddaten aus dem Reanalysedatensatz mit Messdaten an vielen Orten im Modellgebiet (u.a. Messtation Scharhörn und Cuxhaven) deutlich zu niedrige Windgeschwindigkeiten während der Sturmebbe ergibt, wird die Windgeschwindigkeit in dem Datensatz um 25 % erhöht. Die starke Abweichung des Windfelds mit den Daten der Messstationen hängt vermutlich mit der groben räumlichen Auflösung des Windfeldes zusammen, durch die die Windgeschwindigkeit insbesondere nahe der Küste zu niedrig ausfällt.

Für den Oberwasserzufluss der Ästuarie werden gemessene Zeitreihen des Abflusses im Zeitraum der Sturmebbe 1987 bei Versen für die Ems, bei Intschede für die Weser und bei Neu Darchau für die Elbe

verwendet (siehe Abschnitt 4.1.2) Das Wehr in Geesthacht wird im Modell für den gesamten Simulationszeitraum geschlossen, der Abfluss der Elbe wird im Modell am Wehr eingesteuert, welches im Modell gestellt ist.

Tabelle 4-3 | Randwerte für die Simulation der Sturmeebbe 1987.

Randwerte	Herkunft
Oberwasserzufluss	Messung Neu Darchau (ca. 1600 m ³ /s)
Seeseitiger Wasserstand	Schelfmodell DCSMv6-FM
Windfeld über dem gesamten Modellgebiet Windgeschwindigkeit um 25 % erhöht	UERRA HARMONIE (11 x 11 km)
Salz	
Seeseitig	Konstant 33 PSU
Abfluss Elbe	Konstant 0,4 PSU
Abfluss Nebenflüsse der Elbe	Konstant 0,3 PSU

Tabelle 4-4 | Simulations- und Analysezeitraum für die Sturmeebbe 1987.

Simulationszeitraum	02.02.1987 – 10.03.1987
Simulationszeitschritt	30 s
Ausgabezeitschritt	10 min
Analysezeitraum	28.02.1987 – 05.03.1987

4.4.3 Modellvalidierung

In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4) wird der Wasserstand aus Simulation und Messung während der Sturmeebbe 2018 für die Pegel Cuxhaven und St. Pauli in der Tideelbe verglichen. Abbildungen zu weiteren ausgewählten Pegeln sind im Anhang platziert. Die vergleichende Gegenüberstellung der gemessenen und der mit dem HN-Modell der Deutschen Bucht berechneten Wasserstandsverläufe zeigt, dass das Systemverhalten im Tidezyklus hinsichtlich der Höhen- als auch der Phasenlage durch das HN-Modell der Deutschen Bucht gut nachgebildet wird. Das NTnw aus der Simulation liegt in der Elbmündung etwas niedriger als in der Messung und weiter stromauf ab Brunsbüttel etwas zu hoch. Das NTnw am Pegel St. Pauli liegt in der Simulation etwa 10 cm über der Messung. Aus diesem Grund ist die Differenz des NTnw zwischen St. Pauli und Cuxhaven in der Simulation mit -32 cm geringer als die Differenz der Messungen mit -55 cm. Ursachen dafür können im HN-Modell liegen, aber durch die Qualität der Randwerte wie z. B. die zu geringe Auflösung des Windfeldes begründet sein.

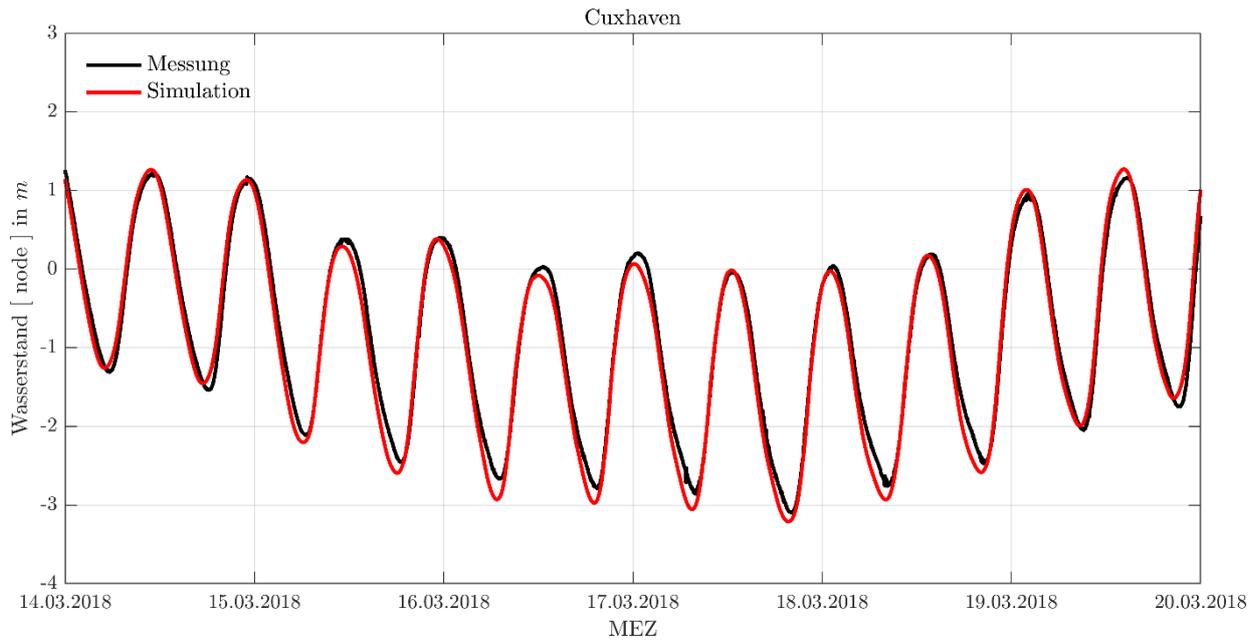


Abbildung 4-3 | Sturmeebe 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel Cuxhaven, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot).

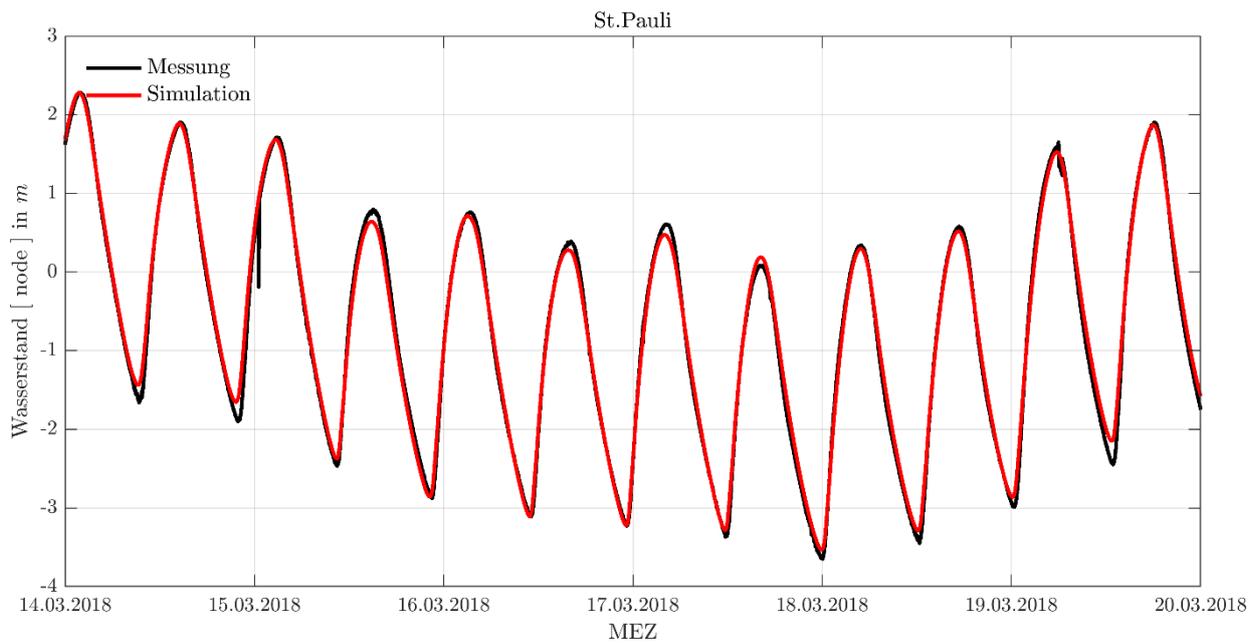


Abbildung 4-4 | Sturmeebe 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel St. Pauli, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot).

4.4.4 Szenarien zu Meeresspiegelanstieg, Abfluss und Topographieänderung

Abfluss

Durch den Klimawandel können sich die Abflussverhältnisse in die Tideelbe zukünftig verändern. Untersuchungen zur Abschätzung zukünftiger Änderungen der Abflussverhältnisse am Pegel Neu Darchau kommen zu unterschiedlichen Ergebnissen (siehe 8.2). In dieser Sensitivitätsstudie wird der Einfluss des Abflusses auf die besonders niedrigen Wasserstände während Sturmeeben untersucht. Dafür wer-

den die in Tabelle 4-5 aufgelisteten Abflusszenarien betrachtet. Es ist zu beachten, dass das Abflusszenario von $0 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Realität nicht auftreten wird. Es wird gewählt, um die größtmögliche Bandbreite abzudecken und ein besseres Systemverständnis zu entwickeln. Abflüsse höher als $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ werden hier nicht untersucht, da für die Fragestellung besonders mittlere und niedrige Abflüsse von Interesse sind. In Realität wird das Wehr in Geesthacht bei Abflüssen größer als $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ gelegt. Ein Vergleich zweier Modellläufe bei einem Abfluss von $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ zeigt, dass sich das niedrigste Tnw der Sturmebbe 1987 von der Elbmündung bis zum Elbkilometer 620 um weniger als einen Zentimeter anhebt, wenn das Wehr im Modell gelegt und nicht gestellt ist. Stromauf von Elbkilometer 630 steigt die Differenz um bis zu $5,5 \text{ cm}$ an. Untersuchungen von Kremp et al. (2012) zum Einfluss des Wehres auf das Tnw bei einem Abfluss von $400 \text{ m}^3/\text{s}$ kommen zu Ergebnissen in der gleichen Größenordnung. Aufgrund des geringen Einflusses der Wehrsteuerung auf das NTnw in dem Bereich bis Elbekilometer 620, und da insbesondere die Szenarien mit niedrigem Abfluss von Interesse sind, wird das Wehr in allen nachfolgend erläuterten Szenarien, auch bei hohem Abfluss, im Modell gestellt.

Tabelle 4-5 | Gewählte Szenarien für den Abfluss bei Neu Darchau.

Abkürzung	Abfluss in m^3/s
SE18QRef	gemessen (600-800)
SE18Q0	0
SE18Q200	200
SE18Q400	400
SE18Q600	600
SE18Q800	800
SE18Q1000	1000
SE18Q1200	1200
SE18Q1600	1600
SE18Q2000	2000

Meeresspiegelanstieg und Wattwachstum

Um sowohl die zeitliche Entwicklung des Meeresspiegelanstiegs, als auch eine Bandbreite der in IPCC (2021) beschriebenen Szenarien zu berücksichtigen (siehe 8.3), werden die in Tabelle 4-6 gelisteten Meeresspiegelanstiegsszenarien untersucht. Da die Wattgebiete der Deutschen Bucht das Potential haben, mit dem SLR mitzuwachsen (siehe auch Abschnitt 8.3), werden SLR-Szenarien in Kombination mit Wattwachstumsszenarien untersucht. Dabei ist zu beachten, dass die morphologische Entwicklung des Wattenmeers im Zuge eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs schwer vorherzusagen ist. Ein vollständiges Wattwachstum ist bei den höheren SLR-Szenarien nach bisherigen Erkenntnissen (siehe beispielsweise Becherer et al. (2018) und Dissanayake et al. (2012)) unwahrscheinlich. Die Szenarien ohne Wattwachstum und mit vollständigem Wattwachstum werden gewählt, um die größtmögliche Bandbreite abzudecken. Das in den Szenarien angenommene gleichmäßige Wattwachstum im gesam-

ten Modellgebiet ist eine vereinfachende Annahme. Die morphodynamische Entwicklung in der Deutschen Bucht wird von vielen verschiedenen Effekten und Bedingungen beeinflusst, welche sich regional unterscheiden können (Wachler et al. 2020). Das Wattwachstum wird daher vermutlich nicht im gesamten Modellgebiet gleichmäßig ausfallen, sondern regional unterschiedlich groß sein. Für die SLR-Szenarien 30, 50 und 110 cm werden jeweils drei Szenarien untersucht: ein Szenario ohne Wattwachstum, ein Szenario mit einem vollständigen Wattwachstum mit dem SLR in der Deutschen Bucht (DeBu) sowie der Elbmündung und ein Szenario mit einem vollständigen Wattwachstum in der DeBu und der gesamten Tideelbe (siehe Abbildung 4-5).

Tabelle 4-6 | Gewählte Szenarien für Meeresspiegelanstieg und Wattwachstum.

Abkürzung	Meeresspiegelanstieg in cm	Wattwachstum
SE18Ref	-	-
SE18SLR10	10	-
SE18SLR10w10db	10	10 cm in DeBu und Elbmündung
SE18SLR10w10dbelbe	10	10 cm in DeBu und gesamter Tideelbe
SE18SLR30	30	-
SE18SLR30w30db	30	30 cm in DeBu und Elbmündung
SE18SLR30w30dbelbe	30	30 cm in DeBu und gesamter Tideelbe
SE18SLR50	50	-
SE18SLR50w50db	50	50 cm in DeBu und Elbmündung
SE18SLR50w50dbelbe	50	50 cm in DeBu und gesamter Tideelbe
SE18SLR80	80	-
SE18SLR110	110	-
SE18SLR110w110db	110	110 cm in DeBu und Elbmündung
SE18SLR110w110dbelbe	110	110 cm in DeBu und gesamter Tideelbe

Die Bereiche, welche im Modellgebiet gleichmäßig erhöht werden sind in Abbildung 4-5 dargestellt. Es handelt sich dabei um die Flächen, welche über dem charakteristischen Springtideniedrigwasser eines Jahres liegen und somit bei diesem Wasserstand trockenfallen. Die hier gewählte Definition der Wattgebiete entspricht in etwa der Definition von Friedrichs (2011), der Wattgebiete als flache Gebiete bestehend aus Sedimenten ohne Bewuchs, welche zwischen dem Wasserstand der niedrigsten und der höchsten astronomischen Tide liegen, definiert. Die DIN 4049-3 : 1994-10 (1994) definiert Watt als „ausgedehntes, flaches mit Sand oder Schlick bedecktes Gebiet unter MThw oder HW, das tide- wind- oder abflussregimeabhängig überflutet wird und wieder trocken fällt und das meist durch Rinnen und Wasserläufe gegliedert ist“. Diese Definition gibt keine untere Grenze für das Gebiet an, was als Definition für die vorliegende Untersuchung nicht ausreichend ist.

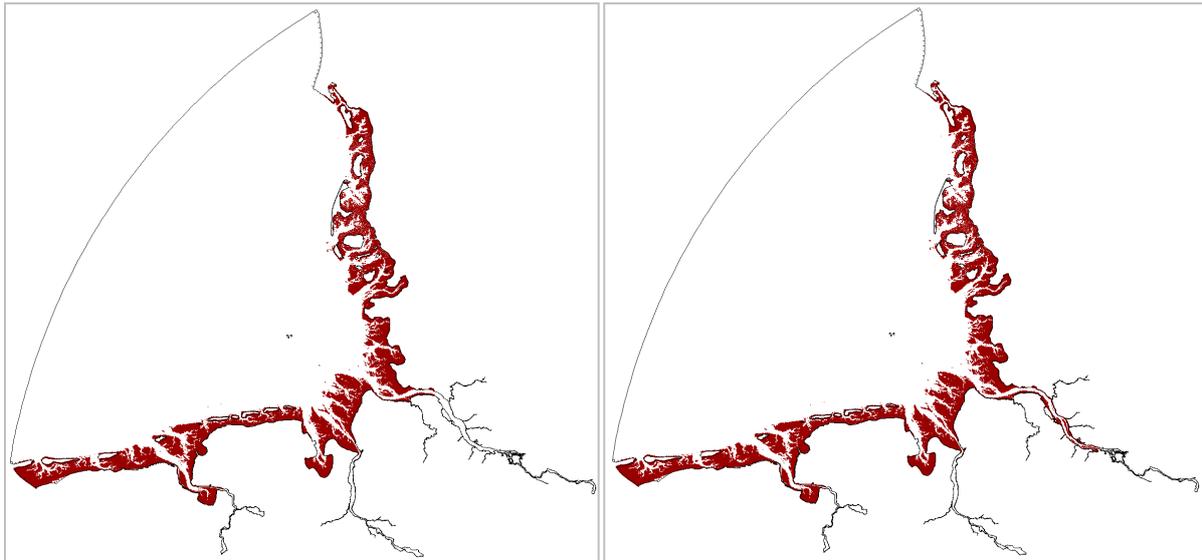


Abbildung 4-5 | Topographieerhöhung der Wattflächen im Modell in der DeBu und der Elbmündung (links) und der DeBu und der gesamten Tideelbe (rechts).

4.4.5 Hydrodynamische Analyseparameter

Die Berechnungsergebnisse der hydrodynamisch-numerischen Simulation mit UnTrim² liegen für jeden Berechnungspunkt als synoptische Daten des Wasserstands und der Strömung in Ausgabezeitschritten von 10 Minuten vor. Im Rahmen einer sich an die Modellrechnung anschließenden Auswertung der Modellergebnisse werden ausgewählte Tidekennwerte des Wasserstandes analysiert und visualisiert.

Durch eine Tidekennwertanalyse des Wasserstands wird das Tidehochwasser (Thw), Tideniedrigwasser (Tnw), sowie der Tidehub (Thb) aller Einzeltiden des analysierten Zeitraums ermittelt. Die genannten Tidekennwerte (nach DIN 4049-3 : 1994-10 (1994) Bild 10) sind in Abbildung 4-6 dargestellt.

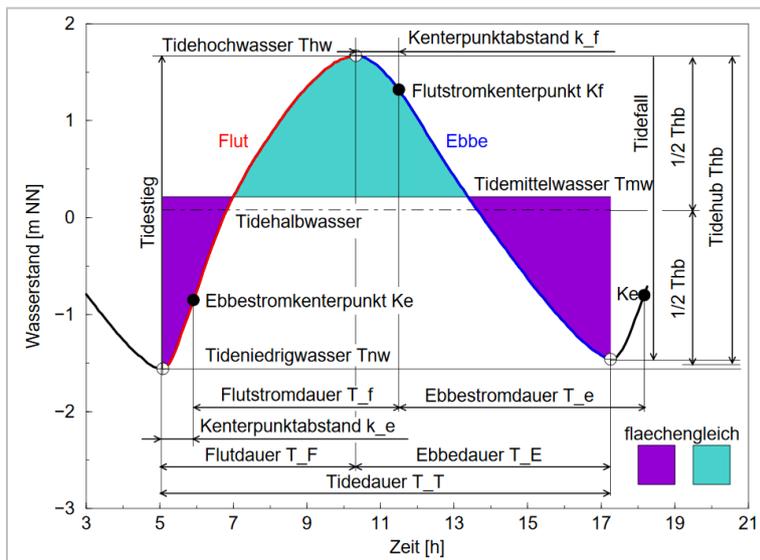


Abbildung 4-6 | Tidekennwerte des Wasserstands (Lang 2003).

Für diese Untersuchung werden in Abschnitt 9 die Analyseergebnisse für die Tide dargestellt, welche zu dem niedrigsten Tnw während der Sturmebbe (NTnw) führte. Das NTnw und der Thb dieser niedrigsten Tide werden auf einem Profil entlang der Fahrrinne der Tideelbe zwischen Bake A und Geesthacht sowie am Pegel St. Pauli visualisiert.

5 Sturmebben 1987 und 2018

Zwei Sturmebben in den Jahren 1987 und 2018 führten zu besonders niedrigen Tideniedrigwasserständen in der Tideelbe. Während der Sturmebbenkette 2018 trat ein neues NNTnw (niedrigstes jemals beobachtetes Tnw) am Pegel St. Pauli auf. Das zweitniedrigste seit 1950 gemessene Tnw am Pegel St. Pauli ereignete sich während einer Sturmebbenkette 1987, welche zu einem seitdem nicht mehr unertroffenen NNTnw bei Cuxhaven führte. Diese beiden besonders extremen Sturmebben werden im Folgenden genauer analysiert.

5.1 Sturmebbe 2018

Am 18.03.2018 kam es am Pegel St. Pauli zu einem neuen NNTnw von NHN -3,64 m (HPA 2018). In Abbildung 5-1 ist das Luftdruckfeld, sowie die LAMB-Wetterlage und die LAMB-Sturmklasse für die Tage 14. – 19.03.2018 dargestellt.

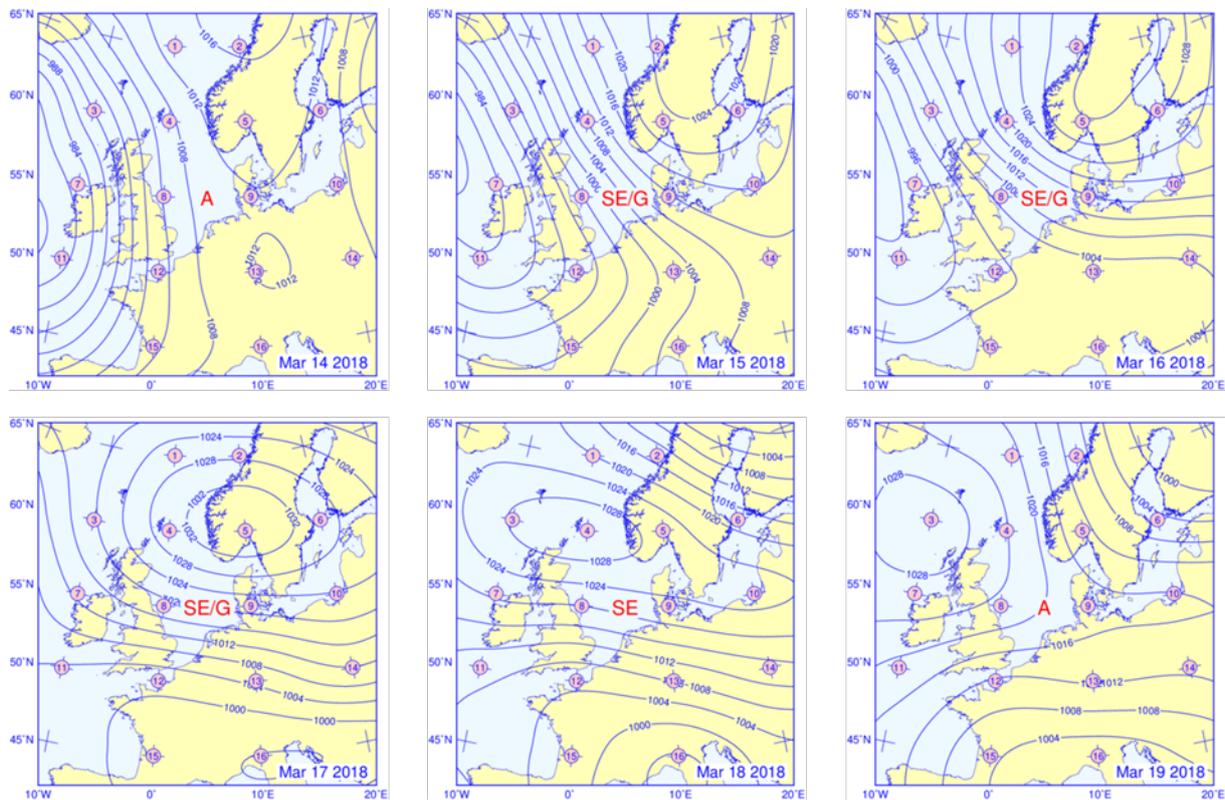


Abbildung 5-1 Luftdruckfeld 14. – 19. März 2018 mit Angaben zu LAMB-Wetterlagentyp und LAMB-Sturmklasse aus Tagesmitteln des ERA5 Luftdrucks (auf Meeressniveau).

Am 14.03.2018 reicht eine meridionale Bodenhochdruckzone von Skandinavien bis Süddeutschland, welche im Osten und Westen von Tiefs abgetrennt ist. Es liegt eine Antizyklonale (A) Wetterlage vor. Mit dem 15.03.2018 wechselt die Wetterlage auf Süd-Ost (SE) und eine Tiefdruckrinne zieht von Süd-Westen her über die Nordsee. Dadurch wird die Deutsche Bucht direkt aus Süd-Osten angeströmt. Nach der LAMB-Sturmklassifikation liegt vom 15.03. bis 17.03.2018 ein Sturm vor. Das anfängliche Hochdruckgebiet stabilisiert sich über Süd-Norwegen und steht damit einem über Südeuropa ziehenden Tiefdruckgebiet gegenüber. Insgesamt herrschen im Vorfeld des NNTnw am Pegel St. Pauli damit drei Tage lang großskalige Zirkulationsbedingungen vor, die mit starken ablandigen Winden in der

Deutschen Bucht einhergehen. Erst ab dem 19.03.2018 ändert sich dies wieder zugunsten einer Antizyklonalen Wetterlage über der Nordsee und deutlich abgeschwächten Winden.

In Abbildung 5-2 ist der gemessene Wasserstand am Pegel Cuxhaven, sowie die gemessene Windgeschwindigkeit und Windrichtung bei Scharhörn sowie der beobachtete Abfluss bei Neu Darchau vor und während des Ereignisses dargestellt. Der Abfluss während des NNTnws liegt bei etwa $700 \text{ m}^3/\text{s}$. Es ist eine Zeitspanne mit hohen Windgeschwindigkeiten ($> 15 \text{ m/s}$) und niedrigen Wasserständen zu erkennen. Dabei herrscht Ostwind (Windrichtung zwischen $70\text{-}90 \text{ Grad}$). Die Differenz zwischen dem NTnw in St. Pauli und dem entsprechenden NTnw in Cuxhaven beträgt -55 cm . Es treten in dem in Abbildung 5-2 dargestellten Zeitraum 5 Tideniedrigwasser hintereinander auf, die nach unserer Definition (siehe Abschnitt 3) als Sturmebben definiert werden. Diese sind in der Abbildung gekennzeichnet.

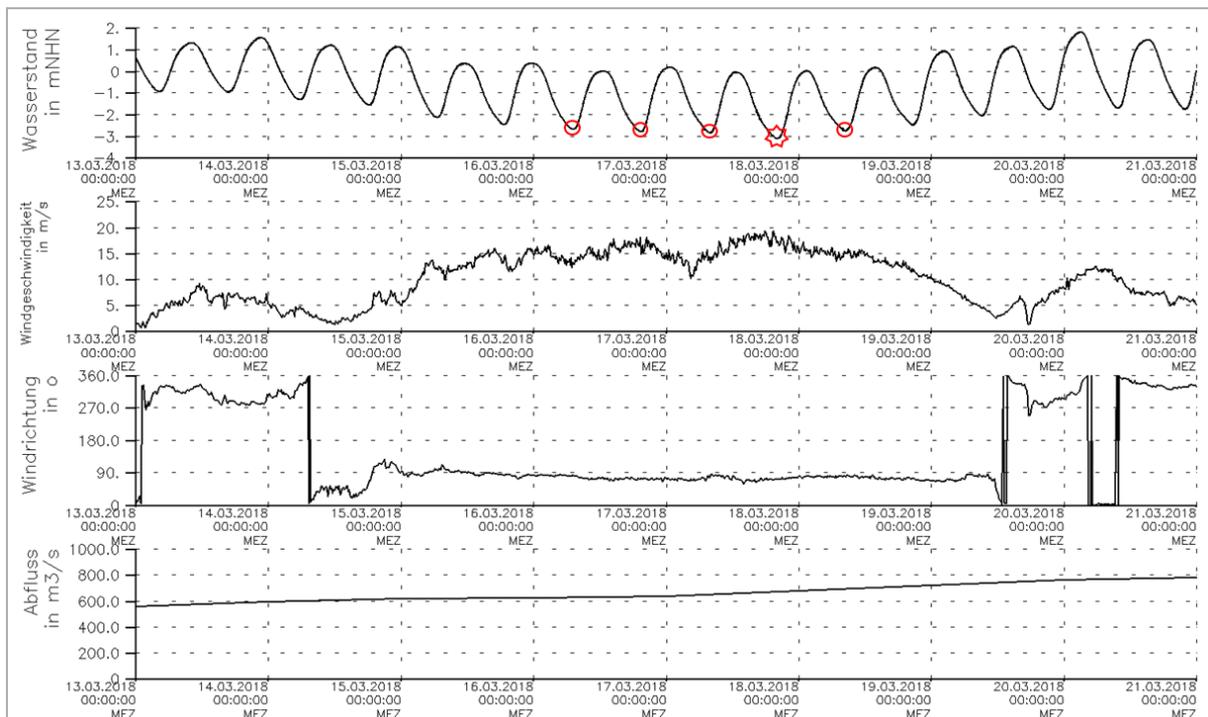


Abbildung 5-2 | Sturmebbenereignis 2018: Messungen des Wasserstandes bei Pegel Cuxhaven, der Windgeschwindigkeit und Windrichtung bei Scharhörn und des Abflusses bei Neu Darchau.

Der aus der LAMB-Klassifikation abgeleitete effektive Wind (siehe Abschnitt 4.3.3) für Cuxhaven ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Mit Beginn des 14.03.2018 treten positive Werte des effektiven Windes auf, d.h. der Wind weht ablandig und damit sturmebbenbegünstigend. In der Folge steigt der effektive Wind weiter schnell an und erreicht am frühen Morgen des 15.03.2018 bis zu 20 m/s und bleibt auch bis zum 18.03.2018 durchgängig über 10 m/s . In diesem Zeitraum kam es zu 5 Sturmebben.

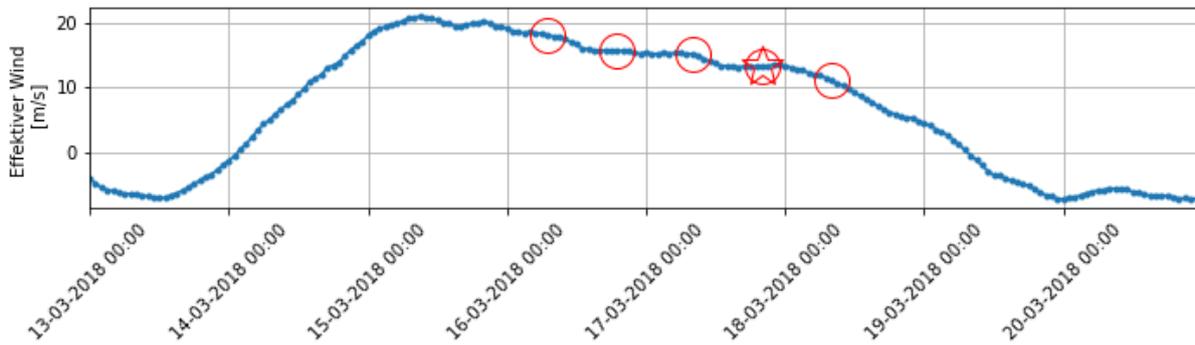


Abbildung 5-3 Effektiver Wind ermittelt aus einer Projektion der U- und V-Komponenten des geostrophischen Windes (aus LAMB Klassifikation) auf 142° für den Zeitraum 14. – 21.03.2018. Grundlage hierfür waren stündliche ERA5 Daten des Luftdrucks (auf Meeresniveau). Ebenfalls markiert (rot) sind die Sturmebben in diesem Zeitraum.

5.2 Sturmebbe 1987

Bis 2018 betrug das NNTnw am Pegel St. Pauli NHN -3,48 m und stammte von einer Sturmebbe am 02.03.1987. Das damals gemessene extrem niedrige Tnw (NHN -3.91 m) am Pegel Cuxhaven gilt dort immer noch als NNTnw und wurde seitdem nicht unterschritten. In Abbildung 5-4 ist das Luftdruckfeld, sowie die LAMB-Wetterlage und die LAMB-Sturmklasse für den Zeitraum 28. Februar 1987 – 5. März 1987 dargestellt.

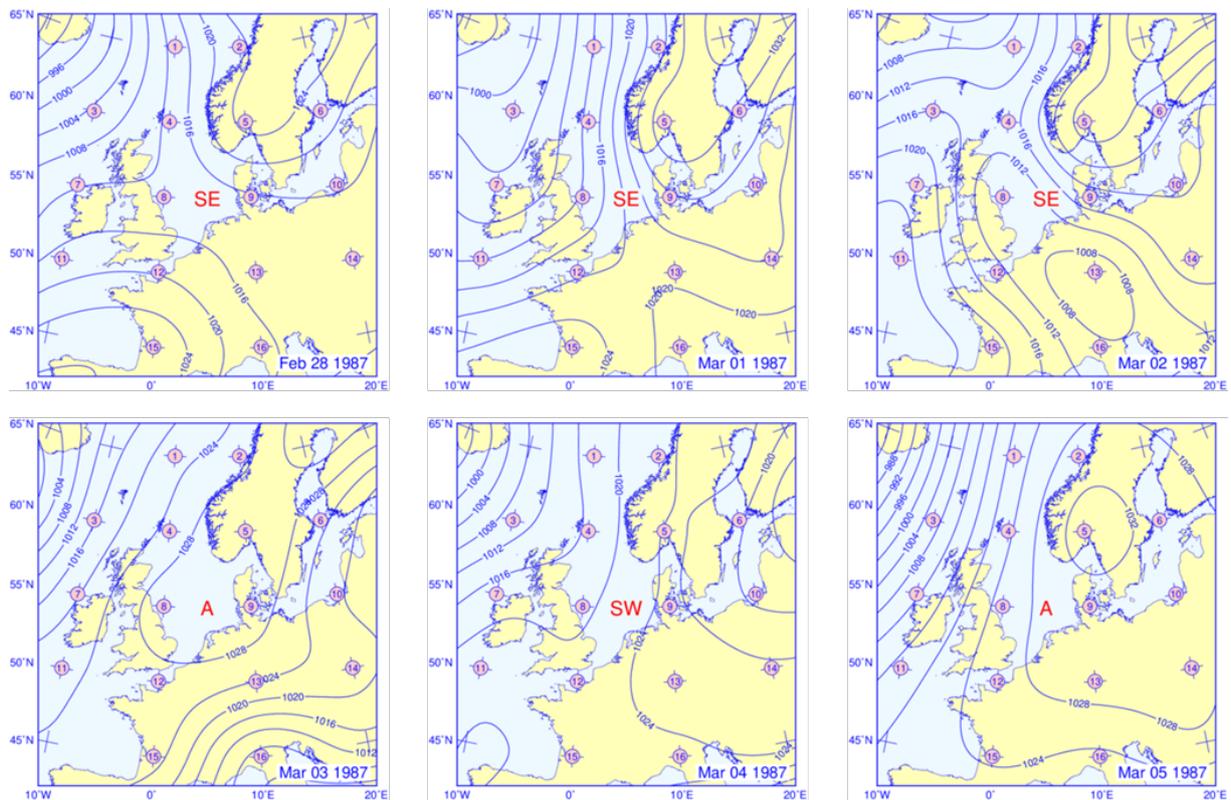


Abbildung 5-4 Luftdruckfeld 28. Februar 1987 – 5. März 1987 mit Angaben zu LAMB-Wetterlagentyp und LAMB-Sturmklasse aus Tagesmitteln des ERA5 Luftdrucks (auf Meeresniveau).

Die synoptische Lage beginnt am 28.02.1987 mit einer Süd-Ost Wetterlage. Über Skandinavien liegt ein Hochdruckrücken, der einem Tiefdruckgebiet über Island und einem weiteren Hochdruckrücken über der Iberischen Halbinsel gegenübersteht. Zu diesem Zeitpunkt herrscht schwache Anströmung aus Süd-Ost in der deutschen Bucht. Am 01.03.1987 nimmt der Druckgradient über der Nordsee stark

zu und am 02.03.1987 zieht sich ein Ausläufer des Nordwestlichen Tiefdruckgebietes von Nordwesten nach Südosten über Deutschland. Der Kern dieses Tiefdruckgebiets liegt dabei stets südlich der deutschen Bucht, sodass es für eine Verstärkung der Süd-Ost Anströmung sorgt. Danach verstärkt sich am 03.03.1987 das Hochdruckgebiet über Skandinavien unter Wetterberuhigung. Zu diesem Zeitpunkt herrscht eine Antizyklonale Wetterlage, die am 04.03.1987 durch ein Tiefdruckgebiet über dem Atlantik zu einer Südwestlichen Wetterlage gedreht wird.

In dem in Abbildung 5-5 dargestellten Zeitraum lag der Abfluss bei Neu Darchau bei etwa 1600 m³/s. Die Windgeschwindigkeiten erreichten am 02.03.1987 bis zu 22 m/s bei Scharhörn in der Elbemündung. Der Wind kam während des NTnws aus östlicher Richtung (etwa 110°). Verglichen mit der Sturmebbenkette 2018 ist die Sturmebbenkette 1987 sehr viel kürzer, die Windgeschwindigkeit ist währenddessen höher und die Windrichtung etwas südlicher. Die Differenz zwischen dem NTnw in St. Pauli und dem entsprechenden NTnw in Cuxhaven betrug +43 cm. Die drei Tideniedrigwasser in dem dargestellten Zeitraum, die nach der Definition in Abschnitt 3 als Sturmebben definiert werden, sind in Abbildung 5-5 markiert.

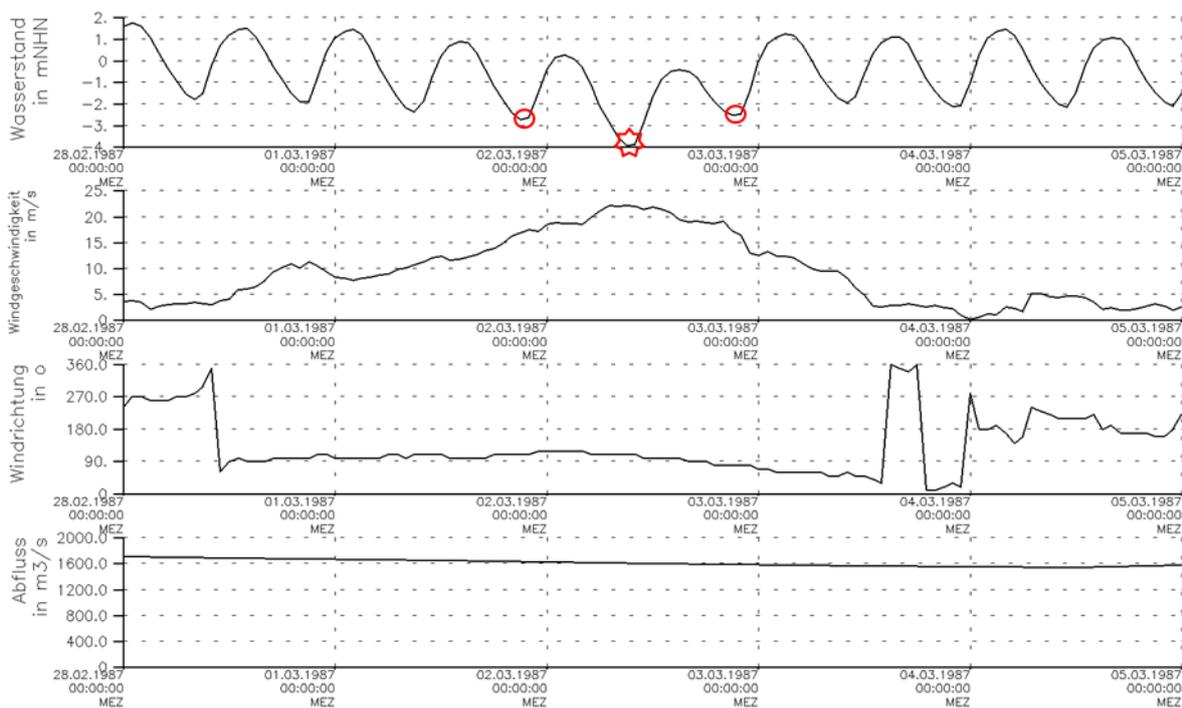


Abbildung 5-5 | Sturmebbenereignis 1987: Messungen des Wasserstandes bei Pegel Cuxhaven, der Windgeschwindigkeit und Windrichtung bei Scharhörn und des Abflusses bei Neu Darchau.

Der aus der LAMB Klassifikation abgeleitete effektive Wind (siehe Abschnitt 4.3.3) für Cuxhaven im Zeitraum vom 28.02.1987 bis 05.03.1987 ist in Abbildung 5-6 dargestellt. Ab dem 01.03.1987 steigt der effektive Wind schnell an bis er am frühen Morgen des 02.03.1987 sein Maximum von 20 m/s erreicht und innerhalb eines Tages wieder stark abnimmt und unter 5 m/s fällt. Innerhalb dieser zwei Tage kam es zu drei Sturmebben.

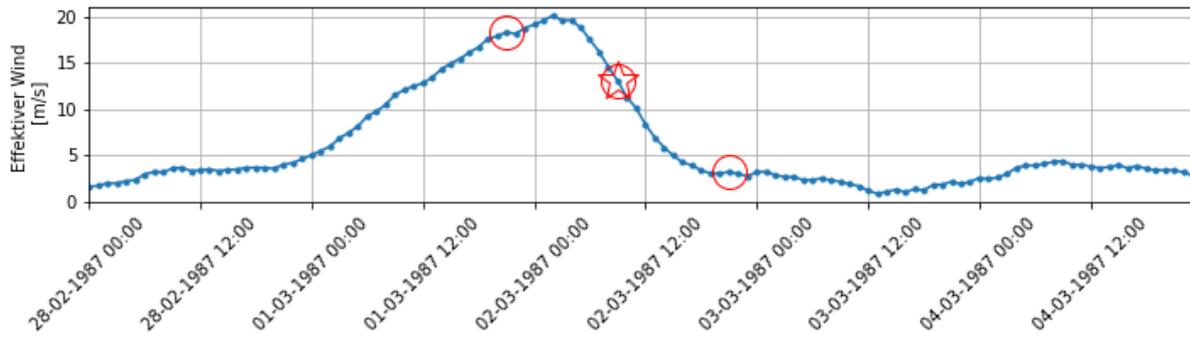


Abbildung 5-6 | Effektiver Wind ermittelt aus einer Projektion der U- und V-Komponenten des geostrophischen Windes (aus LAMB Klassifikation) auf 142° für den Zeitraum 28.02.1987 – 05.03.1987. Grundlage hierfür waren stündliche ERA5 Daten des Luftdrucks (auf Meeresniveau) Ebenfalls markiert (rot) sind die Sturmebben in diesem Zeitraum.

6 Klimatologische Analyse der meteorologischen Größen

Der, nach der Sturmeeben-Definition in Abschnitt 3 entstandene, Ereigniskatalog liefert eine Grundlage an Terminen, die eine statistische Betrachtung der meteorologischen Bedingungen vor Sturmeeben erlaubt. Hierfür werden die meteorologischen Bedingungen, abgeleitet aus der in Abschnitt 4.3.1 eingeführten LAMB-Wetterlagenklassifikation, sowohl im Mittel über die 24 Stunden vor der eingetroffenen Sturmeebe, als auch im Verlauf in den 48 Stunden vorher betrachtet.

6.1 Meteorologische Bedingungen vor Sturmeeben

Zunächst werden die Parameter im Mittel über die 24 Stunden vor den Sturmeeben betrachtet.

6.1.1 Wetterlagen

In Abbildung 6-1 sind die relativen Häufigkeiten der LAMB-Wetterlagenklassen (Abschnitt 4.3.1) berechnet aus ERA5-SLP-Daten (Luftdruck auf Meeresniveau) über den gesamten Zeitraum (1950 – 2019) unabhängig vom Auftreten einer Sturmeebe (Abbildung 6-1 links), sowie für die 24 Stunden vor den Sturmeeben (Abbildung 6-1 rechts) dargestellt.

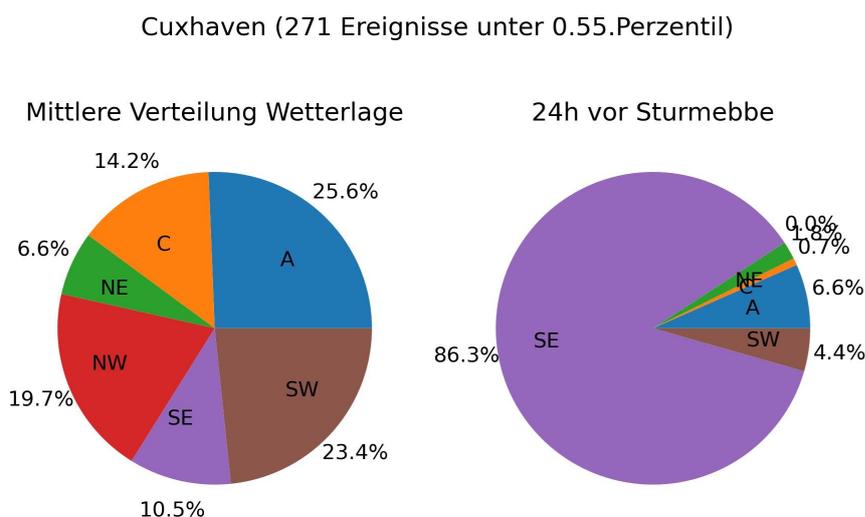


Abbildung 6-1 | **Links:** Mittlere Verteilung der LAMB Wetterlagen, ermittelt aus Tagesmitteln des ERA5 Luftdrucks auf Meeresniveau für den gesamten untersuchten Zeitraum von 1950 bis 2019. **Rechts:** Mittlere Verteilung der LAMB Wetterlagen 24 Stunden vor den Sturmeeben am Pegel Cuxhaven (Tnw unter 0,55. Perzentil aller Tnw) zwischen 1950 und 2019.

Während eine SE Wetterlage klimatologisch mit einer Wahrscheinlichkeit von 10,5 % auftritt, tritt diese direkt vor Sturmeeben mit einer Wahrscheinlichkeit von 86,3 % auf. Es gibt also eine 8-fach höhere Wahrscheinlichkeit für eine SE Wetterlage vor einem Extremereignis. Bei den anderen Wetterlagentypen nimmt diese Wahrscheinlichkeit entsprechend stark ab. Wetterlagen mit Anströmung aus nördlichen Richtungen (NW, NE) finden sich überhaupt nicht im zeitlichen Zusammenhang mit Sturmeeben. Diese statistische Analyse bestätigt die Erwartung, dass eine SE Wetterlage das Auftreten einer Sturmeebe in Cuxhaven besonders begünstigt, sind es doch Winde aus Südosten, die für Cuxhaven als ablandig betrachtet werden können.

6.1.2 Sturmstärke

Die relativen Häufigkeiten der LAMB-Sturmklassen (Abschn. 4.3.1) berechnet aus ERA5 Bodenluftdruckdaten für den gesamten Zeitraum (1950–2019) sowie für die 24 Stunden vor den Sturmebben sind in Abbildung 6-2 dargestellt.

Cuxhaven (271 Ereignisse unter 0.55.Perzentil)

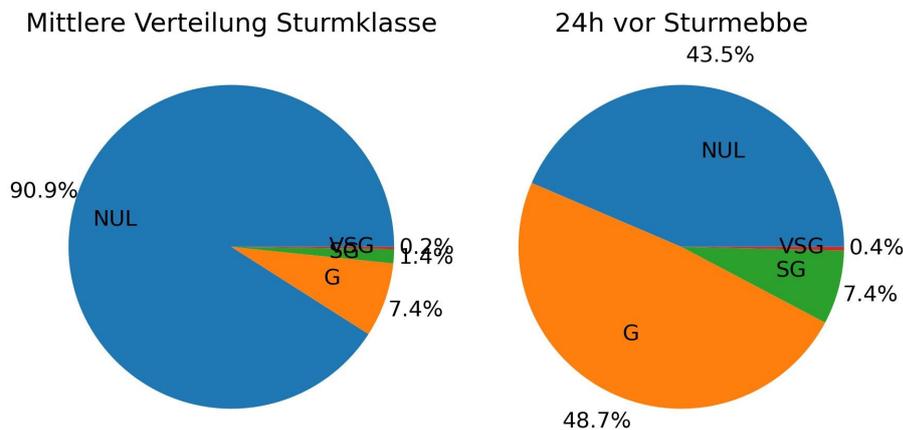


Abbildung 6-2 | **Links:** Mittlere Verteilung der LAMB Sturmklassen, ermittelt aus Tagesmitteln des ERA5 Luftdrucks auf Meeresniveau für den gesamten untersuchten Zeitraum von 1950 bis 2019. **Rechts:** Mittlere Verteilung der LAMB Sturmklassen 24 Stunden vor den Sturmebben am Pegel Cuxhaven (Tnw unter 0,55. Perzentil aller Tnw zwischen 1950 und 2019).

Während Sturm (G, SG und VSG) im Mittel mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 9 % auftritt, tritt dies im zeitlichen Zusammenhang mit Sturmebben mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 56,5 % auf. In mehr als der Hälfte der Ereignisse liegt also vor diesem Zeitpunkt ein Sturm vor, was etwa einer 5-fach höheren Wahrscheinlichkeit für Sturm entspricht und damit die Erwartungshaltung bestätigt, dass vergleichsweise hohe Windgeschwindigkeiten auf größerer räumlicher Skala nötig sind, um Sturmebben als extreme Tnw zu bewirken.

6.1.3 Effektiver Wind

Abbildung 6-3 zeigt die U- und V-Komponenten des geostrophischen Windes, so wie in der LAMB-Wetterlagenklassifikation berechnet. Zu sehen ist hier die Verteilung dieser Komponenten über alle Tagesmittel unabhängig vom Auftreten einer Sturmebbe (in schwarz) und über die 24-Stunden-Mittel (in rot) vor den 271 Sturmebben. Außerdem ist gekennzeichnet, ob zu diesem Zeitpunkt ein Sturm vorlag (gekennzeichnet mit einem ‚x‘). Hier ist bereits erkennbar, dass die Winde zu Sturmebben sich deutlich von den Winden im allgemeinen Zustand unterscheiden. Die Mittelung der Vektorkomponenten für die Sturmebben (rote Punkte) war die Grundlage für die Ableitung der Windrichtung des effektiven Windes, so wie in Abschnitt 4.3.3 erklärt.

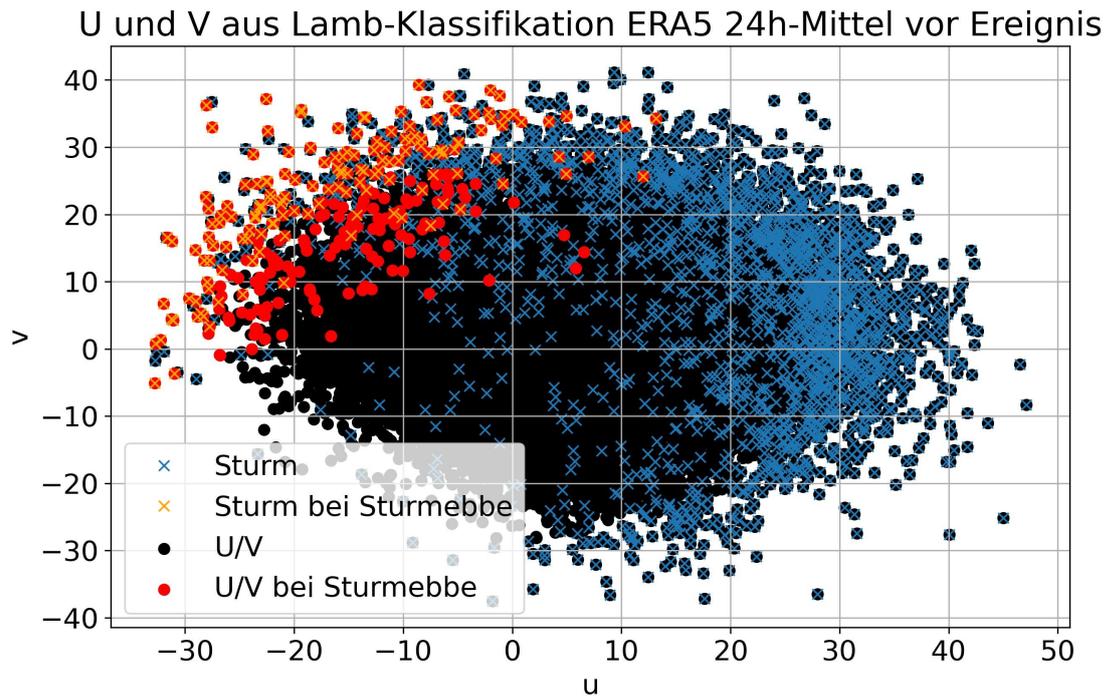


Abbildung 6-3 Verteilung der U- und V-Komponenten des geostrophischen Windes aus der LAMB Wetterlagenklassifikation für tägliche Mittel (schwarz) und für das 24 Stunden Mittel vor einem Sturmebben (rot). Außerdem gekennzeichnet ist, ob zu dieser Zeit nach LAMB ein Sturm vorlag (blaues bzw. gelbes ‚x‘).

Abbildung 6-4 zeigt die Verteilung des effektiven Windes (Abschnitt 4.3.3) als Klimatologie der Tagesmittel des gesamten Zeitraums (1950–2019) und für die 24 Stunden vor den Sturmebben dargestellt. Es ist eine deutliche Abgrenzung zwischen den beiden Datensätzen zu erkennen. Während Sturmebben war der effektive Wind immer positiv und meist auch über 10 m/s. Über den gesamten Zeitraum verteilt sich der effektive Wind von etwa -30 m/s bis 20 m/s (Mittelwert ca. -2 m/s).

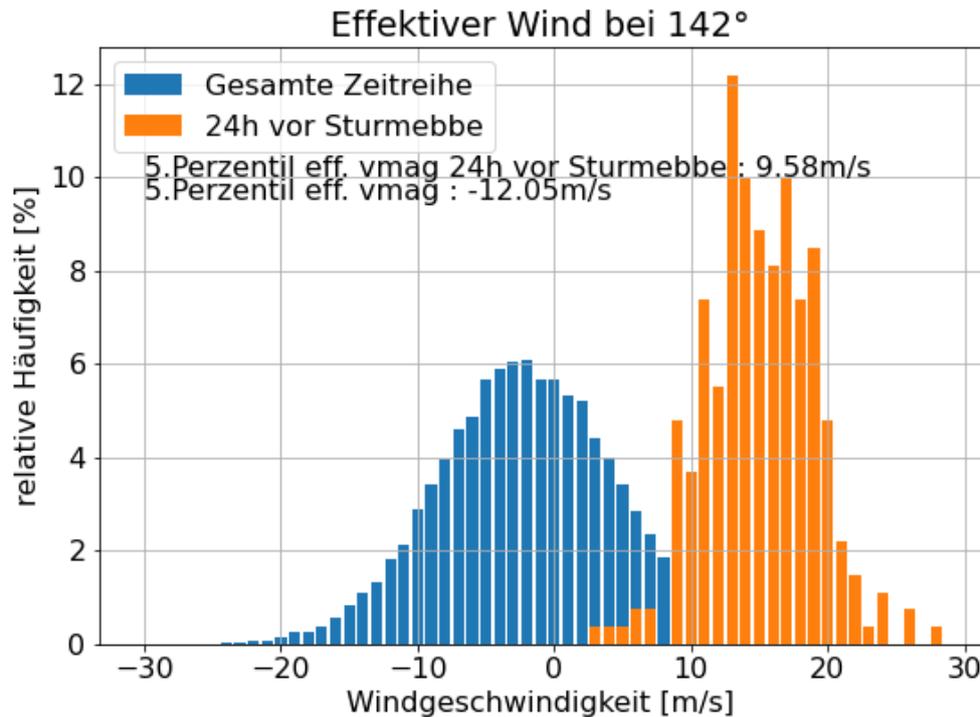


Abbildung 6-4 | Verteilung des effektiven Windes projiziert auf 142° über die Tagesmittel des gesamten Zeitraumes 1950–2019 (blau) und im 24-Stunden-Mittel vor den 271 Sturmebben(orange). Außerdem dargestellt ist das 5.Perzentil des effektiven Windes der beiden Datensätze.

Die Verteilungen des effektiven Windes als Klimatologie, sowie während der Sturmebben, jeweils aufgeteilt in 10 m/s Klassen, sind in Abbildung 6-5 dargestellt. Während der effektive Wind klimatologisch nur an 5,2 % der Tage über einem Wert von 10 m/s liegt, ist dies in den 24 Stunden vor einer Sturmebbe zu 92,6 % der Fall. Ein effektiver Wind über 10 m/s ist also ein stark begünstigender Faktor für eine Sturmebbe.

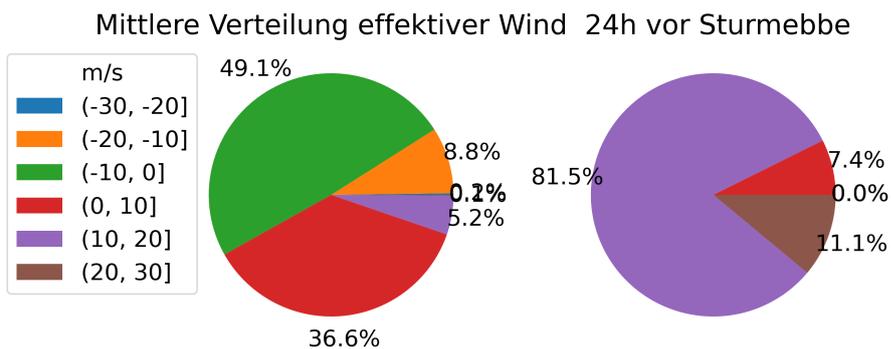


Abbildung 6-5 | **Links:** Mittlere Verteilung des effektiven Windes aus der LAMB-Wetterlagenklassifikation projiziert auf 142° eingeteilt in 10 m/s Klassen, ermittelt aus Tagesmitteln des ERA5 Luftdrucks auf Meeresniveau für den gesamten untersuchten Zeitraum von 1950 bis 2019. **Rechts:** Mittlere Verteilung des effektiven Windes aus der LAMB-Wetterlagenklassifikation projiziert auf 142° eingeteilt in 10 m/s Klassen 24 Stunden vor den Sturmebben am Pegel Cuxhaven (Tnw unter 0,55. Perzentil aller Tnw) zwischen 1950 und 2019.

6.2 Zeitliche Entwicklung im Vorfeld von Sturmebben

Die bisherigen Untersuchungen bezogen sich nur auf das Mittel über die 24 Stunden vor den jeweiligen Sturmebben. Im Folgenden wird der erweiterte Vorlauf der gegebenen Größen in den 48 Stunden vor

den Sturmebben betrachtet. Ziel dieser Untersuchung ist ein besseres Prozessverständnis hinsichtlich Sturmebben begünstigender Situation und deren zeitlicher Entwicklung. Dafür werden die LAMB Wetterlagen auf der Basis von stündlichen Luftdruckdaten der ERA5 Reanalyse berechnet.

In Abbildung 6-6 wird die Verteilung der LAMB Wetterklassen in den 48 Stunden vor dem Sturmebben dargestellt. Bereits 48 Stunden vor dem Höhepunkt der Sturmebbe ist die SE-Wetterlage mit etwa 50 % überdurchschnittlich oft vertreten. Die Wetterlage A ist zu diesem Zeitpunkt leicht überdurchschnittlich oft vertreten, dies nimmt jedoch ab ca. 40 Stunden vor dem Ereignis deutlich ab. Zwischen 10 bis 5 Stunden vor der Sturmebbe hat der SE-Wetterlage ihren Höhepunkt in den Häufigkeiten und beginnt danach etwas seltener aufzutreten. Die anderen 4 Wetterlagentypen sind in den 48 Stunden vorher kaum bis gar nicht vertreten.

Wetterlage bei Sturmebbe in Cux (271 Ereignisse unter 0,55-tem Perzentil)

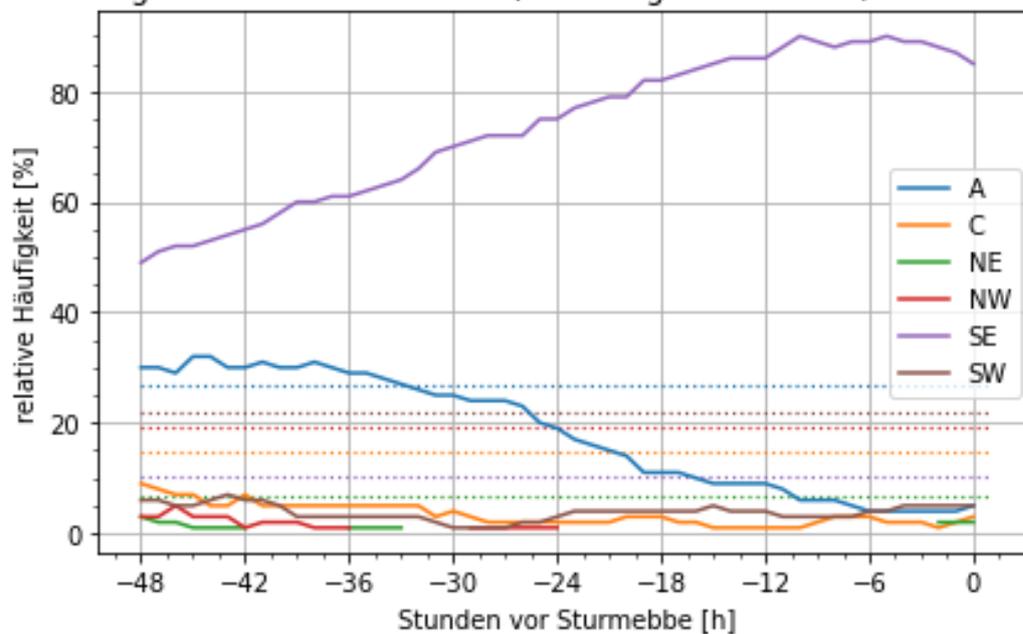


Abbildung 6-6 | Verteilung der LAMB Wetterlagen aus ERA5 in den 48 Stunden vor dem Tnw. Die gepunktete Linie kennzeichnet die mittlere Häufigkeit der jeweiligen Wetterlage im Zeitraum 1950–2019.

Auch die Sturmklasse G („Sturm“) ist bereits 48 Stunden vor dem Sturmebben deutlich häufiger vertreten, als im langjährigen Mittel (siehe Abbildung 6-7). Im Gegenzug dazu ist die Sturmklasse NUL („Kein Sturm“) zu diesem Zeitpunkt etwas seltener vertreten als gemäß der klimatologischen Häufigkeitsverteilung zu erwarten wäre. Etwa 10 Stunden vor der Sturmebbe erreichen beide ihren Hoch- bzw. Tiefpunkt. Die Sturmklasse SG („schwerer Sturm“) tritt ab 40 Stunden vor der Sturmebbe leicht

überdurchschnittlich und ab etwa 20 Stunden vorher deutlich häufiger auf. Dies erklärt auch den stagnierenden Anstieg der G-Sturmklasse kurz vor der Sturmeebe.

Sturmklasse bei Sturmeebe in Cux (271 Ereignisse unter 0,55-tem Perzentil)

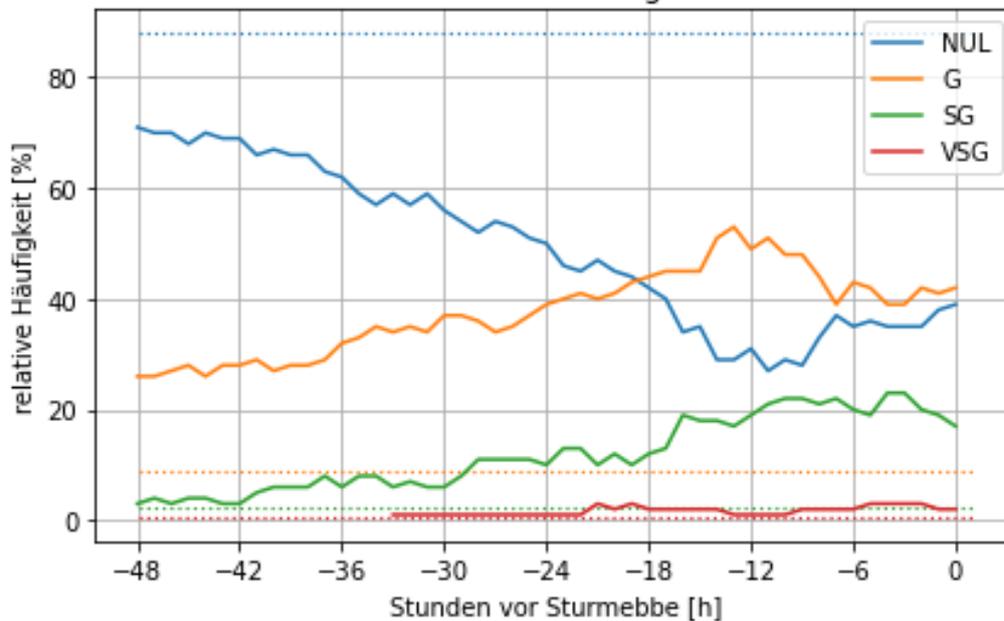


Abbildung 6-7 | Verteilung der LAMB Sturmklasse aus ERA5 in den 48 Stunden vor dem Tnw. Die gepunktete Linie kennzeichnet die mittlere Häufigkeit der jeweiligen Größe im Zeitraum 1950–2019.

Der Verlauf des effektiven Windes (Abschnitt 4.3.3) in den 48 Stunden vor den 271 Sturmeeben ist in Abbildung 6-8 dargestellt. Die Standardabweichung des Effektiven Windes zu Beginn der 48 Stunden ist mit 7.6 m/s etwas höher als im klimatologischen Mittel (7.2 m/s), d.h. dass bei derart großem zeitlichen Vorlauf noch vergleichsweise hohe Diversität hinsichtlich der Anströmungsverhältnisse in den betrachteten 271 Sturmeeben festzustellen ist. Dennoch liegt auch hier schon das Mittel des effektiven Windes über alle 271 Sturmeeben mit etwa 10 m/s deutlich höher als das klimatologische Mittel von ca. -2 m/s. Es ist deutlich zu erkennen, dass in allen 271 Fällen der effektive Wind zur Sturmeebe hin zunimmt und im Mittel etwa 10 Stunden vor der Sturmeebe seinen Höhepunkt erreicht. Zu diesem Zeitpunkt liegt auch die Standardabweichung der 271 Sturmeeben mit 4.1 m/s am niedrigsten und es gibt keine Sturmeebe bei dem der effektive Wind 10 Stunden vorher unter 5 m/s lag.

Effektiver Wind bei Sturmeebe in Cux (271 Ereignisse unter 0,55-tem Perzentil)

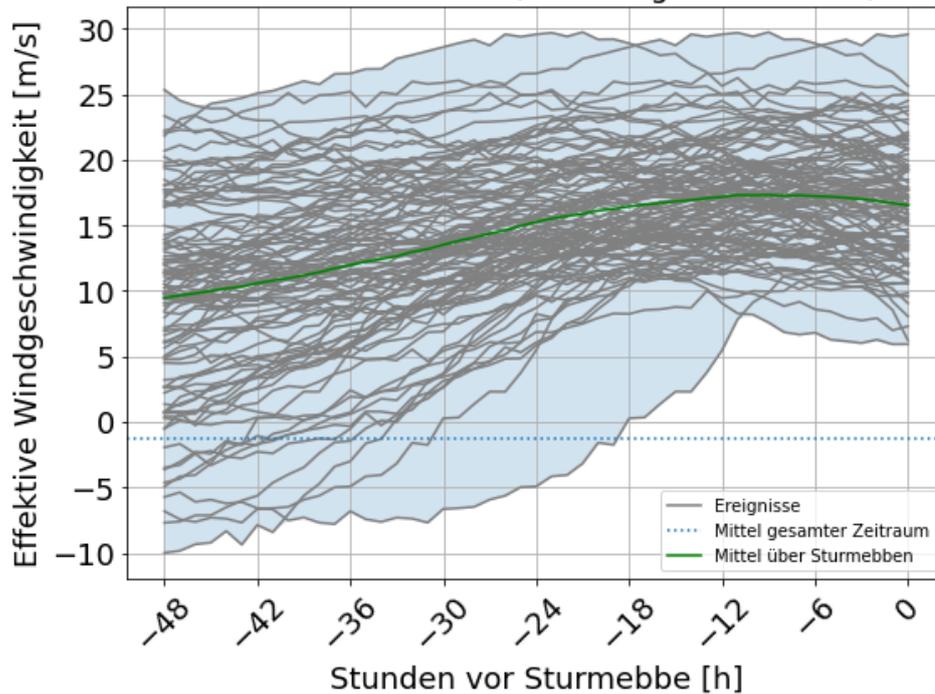


Abbildung 6-8 | Zeitreihen des Effektiver Windes [m/s] ermittelt aus U- und V-Komponenten der LAMB Wetterlagenklassifikation aus ERA5 projiziert auf 142° 48 Stunden vor Sturmeeben.

Alle drei gezeigten Größen sind in den Stunden vor dem extremen Niedrigwasser überdurchschnittlich häufig vertreten bzw. stark ausgeprägt. Dies bestätigt die getroffene Auswahl an Diagnostiken und Variablen zur Identifikation und Analyse meteorologischer Situationen, die zu Sturmeeben führen. Entsprechend werden diese Diagnostiken und Variablen auch für weitergehende Arbeiten hinsichtlich potentieller Änderungen von Sturmeeben im Klimawandel verwendet.

7 Hydrographische Betrachtung der Vergangenheit

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer Literaturrecherche zur Entwicklung der Einflussfaktoren Abfluss und Meeresspiegelanstieg, sowie der mittleren Tidekennwerte in der Tideelbe in der Vergangenheit zusammengefasst. Zudem werden die Ergebnisse der Pegeldatenanalyse zur Entwicklung besonders niedriger Tideniedrigwasserstände in der Vergangenheit dargestellt.

7.1 Abflussentwicklung der Tideelbe

Der Abfluss aus der Mittelelbe beeinflusst die Wasserstände der Tideelbe, wobei der Einfluss des Abflusses auf die Tidewasserstände stromab abnimmt (Siefert 1998). Der Verlauf des mittleren monatlichen Abflusses (MQ) bei Neu Darchau von 1926–2015 (90 Jahre) (Abbildung 7-1) zeigt auf Grund des Einzugsgebietes der Elbe einen deutlichen Jahresgang. Die höchsten mittleren Abflüsse treten im Frühjahr mit Beginn der Schneeschmelze in den Mittelgebirgen, wie z. B. dem Erzgebirge auf. In den niederschlagsarmen Sommermonaten sind die mittleren Abflüsse deutlich niedriger (IKSE 2005). Nach den Erkenntnissen aus Abschnitt 3 Abbildung 3-2 treten die meisten Sturmebben in den Monaten Januar, Februar und März auf, in denen nach Abbildung 7-1 durchschnittlich höhere Abflüsse auftreten.

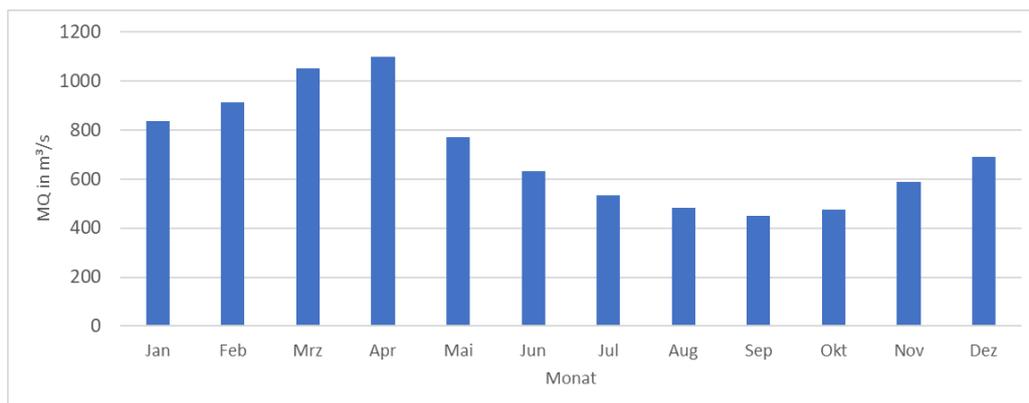


Abbildung 7-1 | Mittlerer monatlicher Abfluss Neu Darchau in [m³/s] 1926–2015 (basierend auf [BfG \(2015\)](#)).

Der mittlere jährliche Abfluss (MQ) der Elbe gemessen am Pegel Neu Darchau unterliegt starken Schwankungen (siehe Abbildung 7-2). In der Abbildung ist der jährliche MQ von 1952 bis 2013 am Pegel Neu Darchau dargestellt (DGJ 2013). Es sind dort regelmäßig Phasen mit besonders niedrigem MQ zu erkennen, die längste Phase in dem dargestellten Zeitraum reicht von 1989–1993 (5 Jahre).

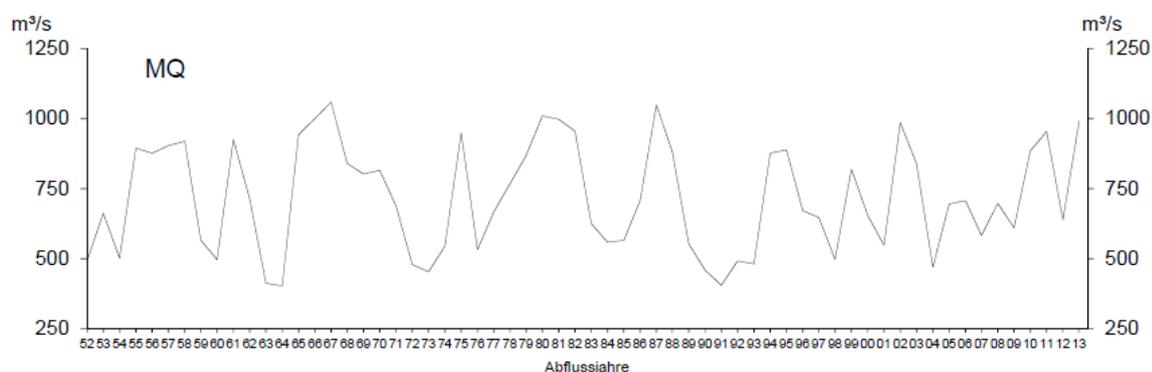


Abbildung 7-2 | Mittlerer jährlicher Abfluss Neu Darchau in [m³/s] 1952–2013 (DGJ 2013).

Der MQ beträgt im Referenzzeitraum (1971 bis 2000) 697 m³/s und nimmt in der Gegenwart (1989–2018) bezogen auf den Referenzzeitraum um 6 % ab, der mittlere niedrigste jährliche Abfluss (MNQ) beträgt im Referenzzeitraum 297 m³/s und nimmt in der Gegenwart um -15 % ab. Der mittlere höchste jährliche Abfluss (MHQ) beträgt im Referenzzeitraum 1784 m³/s und nimmt in der Gegenwart um 9 % zu ([DAS Basisdienst Klima und Wasser 2021](#)). Seit dem Jahrhunderthochwasser im Sommer 2013 mit einem Abfluss bei Neu Darchau von HHQ = 4080 m/s³ befindet sich der Abfluss der Elbe auf einem in Relation zum langjährigen statistischen Mittel sehr geringen Niveau (siehe Abbildung 7-3) (Weilbeer et al. 2021). Der MQ des Jahres 2020 liegt bei 386 m³/s, und bleibt damit weiterhin auf dem sehr geringen Niveau (HPA 2020).

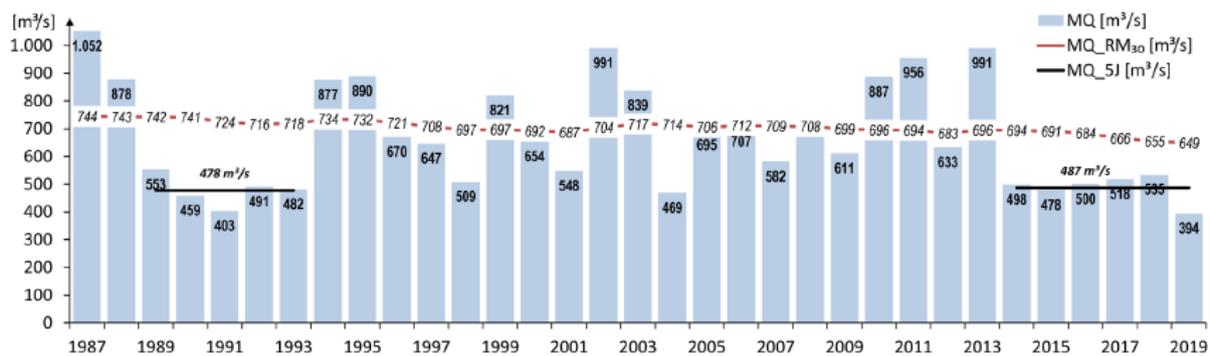


Abbildung 7-3 | Mittlerer Abfluss Neu Darchau in [m³/s] 1987–2019 (Gewässerkundliche Jahre vom 01.11. bis 31.10.) (Weilbeer et al. 2021).

7.2 Meeresspiegelanstieg

Der beobachtete Anstieg des globalen mittleren Meeresspiegels in der Vergangenheit mit der jeweiligen sehr wahrscheinlichen Bandbreite wird für verschiedene Zeiträume in dem neuesten IPCC-Report (IPCC 2021) zusammengefasst und ist in Tabelle 7-1 gelistet.

Tabelle 7-1 | Beobachteter globaler mittlerer Meeresspiegelanstieg (IPCC 2021).

Zeitraum	1901–1990	1971–2018	1993–2018	2006–2018	1901–2018
beobachtete Rate in mm/Jahr	1.35 [0.78 bis 1.92]	2.33 [1.55 bis 3.12]	3.25 [2.88 bis 3.61]	3.69 [3.21 bis 4.17]	1.73 [1.28 bis 2.17]

Der regionale Meeresspiegelanstieg weicht vielerorts von den globalen mittleren Werten ab. Am Pegel Cuxhaven wird seit 1843 ein Anstieg von 2,37 mm/Jahr im mittleren Tidemittelwasser (MTmw) gemessen (siehe Abbildung 7-4).

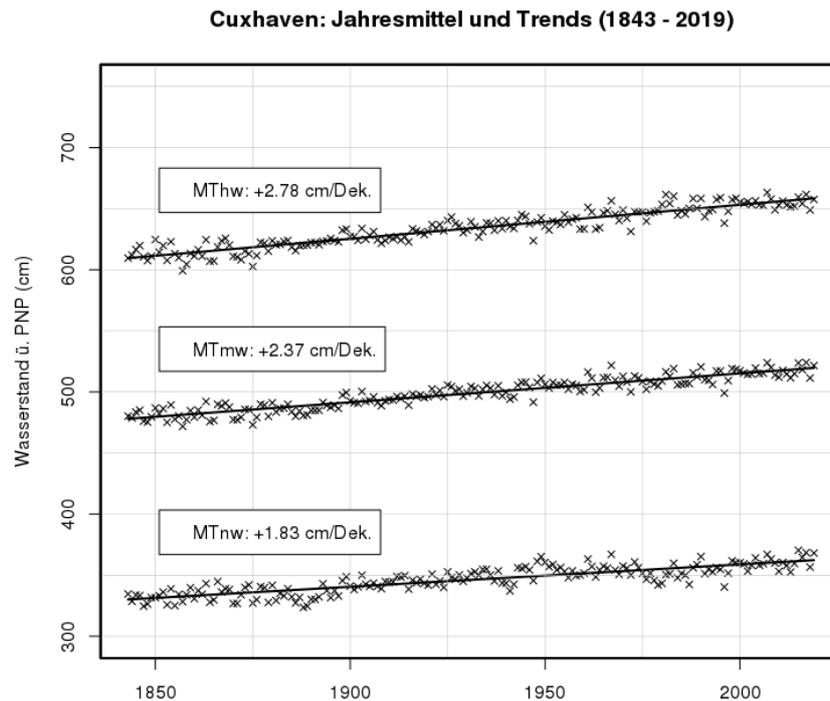


Abbildung 7-4 | Jährliche Entwicklung der Tidewasserstände in Cuxhaven zwischen 1843 und 2019 mit Trendangaben in cm pro Dekade (Darstellung: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie; Datenquelle: WSA Cuxhaven und HPA Hamburg).

7.3 Wasserstände in der Tideelbe

Abbildung 7-5 zeigt die Entwicklung des mittleren Tidehochwassers (MThw) und des mittleren Tide-niedrigwassers (MTnw) am Pegel St. Pauli im Zeitraum von 1870–2020. Das MThw steigt am Pegel St. Pauli im Laufe der Jahre an, das MTnw sinkt ab, somit vergrößert sich der mittlere Tidehub (MThb). Ursache sind vor allem Geometrieänderungen der Tideelbe durch anthropogene Eingriffe sowie durch natürliche morphologische Änderungen, was für den Zeitraum (1950–1997) von Siefert (1998) analysiert wurde. Von 2003–2019 fanden keine großen anthropogenen Eingriffe mehr in der Tideelbe statt (Weilbeer et al. 2021), dennoch kommt es am Pegel St. Pauli zu einem Absinken des MTnw und einer Vergrößerung des MThb. Die hydrologische und morphologische Entwicklung der Tideelbe in dem Zeitraum von 2013–2018 wurde von Weilbeer et al. (2021) untersucht: Seit 2013 befindet sich der Oberwasserzufluss der Elbe auf einem in Relation zum langjährigen statistischen Mittel sehr geringen Niveau (siehe Abbildung 7-3). In diesem Zeitraum wurden erhöhte Sedimentationsraten, ein Wandel im Sedimentinventar und eine Glättung morphologischer Sohlstrukturen beobachtet. Der Tidehub stieg in diesem Zeitraum stark an und es wurde eine Erhöhung von Strömungsgeschwindigkeit und Trübung gemessen. Vermutete Ursachen für diese Veränderungen sind morphologische Veränderungen in der Elbmündung, sowie die unterdurchschnittlich niedrigen Oberwasserzuflüsse und ein unzureichend angepasstes Sedimentmanagement, was zu geringerer Turbulenz durch erhöhte Schwebstoffkonzentration führte (Weilbeer et al. 2021).

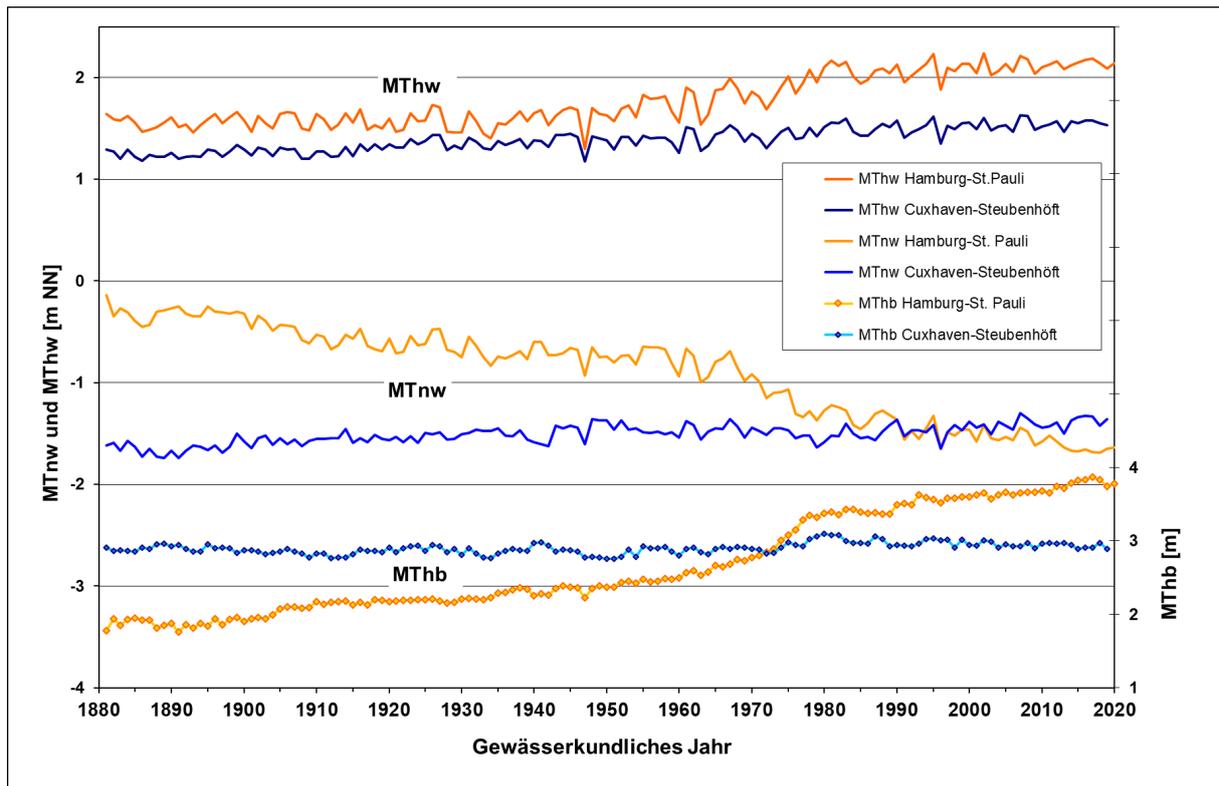


Abbildung 7-5 | Entwicklung des MThw, MThb und MTnw an den Pegeln St. Pauli und Cuxhaven zwischen 1880 und 2020 (Boehlich und Strotmann 2019).

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Analyse von gemessenen Pegel­daten (siehe Abschnitt 4.1.1) in der Tideelbe zusammengefasst. In Abbildung 7-6 ist das NTnw (niedrigstes Tnw innerhalb eines definierten Zeitraums) eines jeden Kalenderjahres für den Zeitraum von 1950–2020 an den Pegel Cuxhaven in der Elbmündung und ca. 100 km stromauf am Pegel St. Pauli im Hamburger Hafen dargestellt. In Rot markiert ist das NNTnw (niedrigstes beobachtetes Tideniedrigwasser) am Pegel Cuxhaven im Jahr 1987, sowie das NNTnw am Pegel St. Pauli im Jahr 2018.

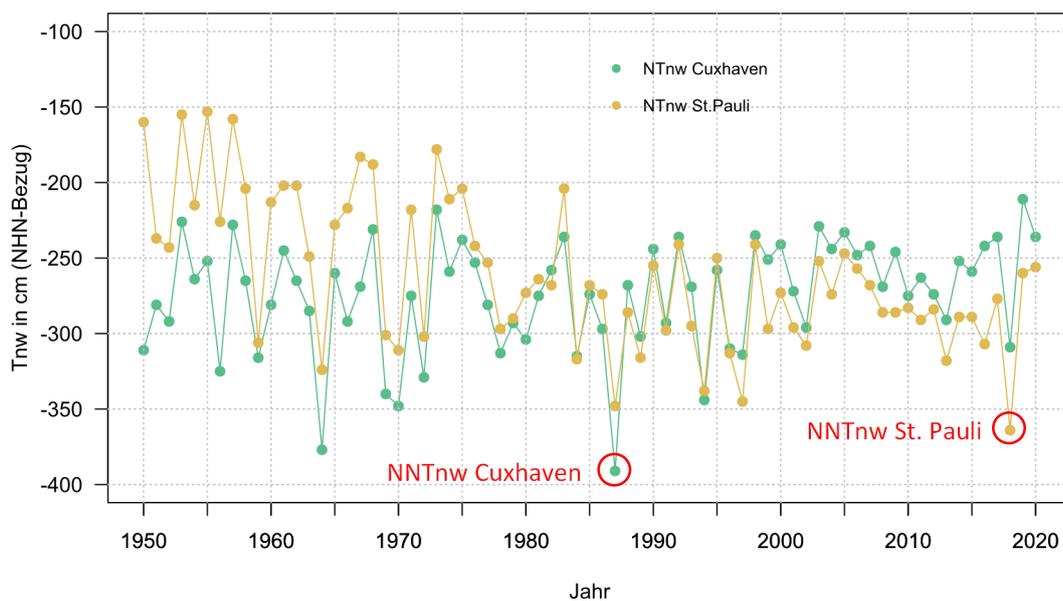


Abbildung 7-6 | Niedrigstes Tnw (NTnw) (0. Perzentil) des jeweiligen Jahres bei Cuxhaven und St. Pauli.

In Abbildung 7-7 sind das 0,55. und das 50. Perzentil (Median) des Tnw eines jeden Jahres für den Zeitraum von 1950–2020 bei den Pegel Cuxhaven und St. Pauli dargestellt. Der Median des Tnw bei St. Pauli sinkt, aus den zuvor genannten Ursachen (Baumaßnahmen, natürliche morphologische Änderungen etc.) im Laufe der Jahre ab. Für das 0,55. Perzentil des Tnw ist im Grundsatz eine ähnliche Entwicklung zu erkennen: Das 0,55. Perzentil am Pegel in St. Pauli liegt zunächst noch über dem 0,55. Perzentil des Tnw von Cuxhaven und sinkt dann im Laufe der Jahre weiter ab. Ab 1995 liegt das 0,55. Perzentil des Tnw in St. Pauli unter dem in Cuxhaven.

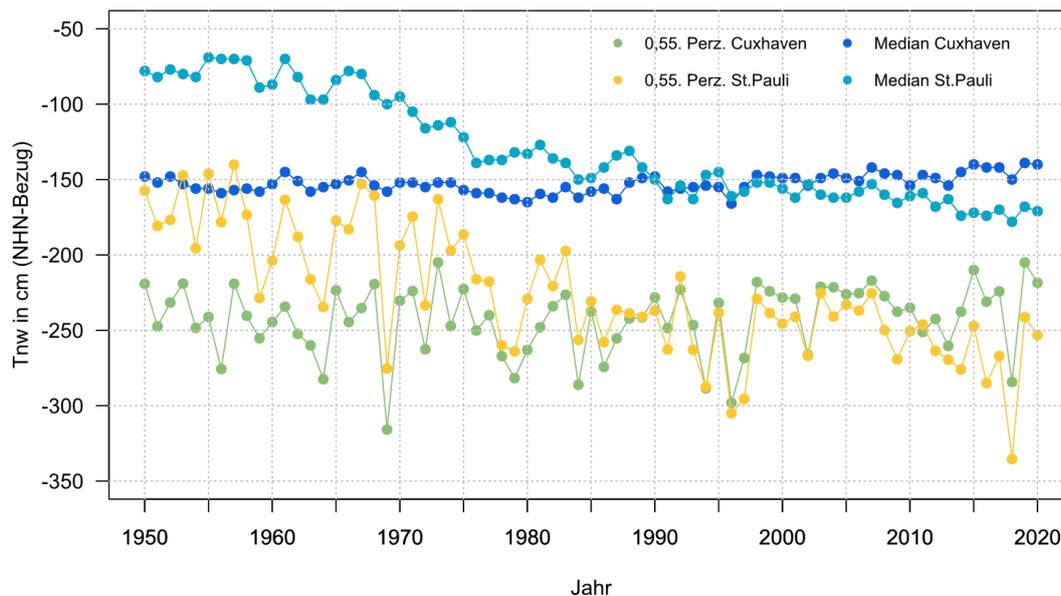


Abbildung 7-7 | Perzentile des Tnw der jeweiligen Jahre bei Cuxhaven und St. Pauli: 50. Perzentil: blau- St. Pauli, dunkelblau- Cuxhaven; 0,55. Perzentil (niedrigstes Tnw des jeweiligen Jahres): gelb - St. Pauli, grün: Cuxhaven.

In Abbildung 7-8 ist die Differenz des Tideniedrigwassers zwischen St. Pauli und Cuxhaven für den Median und das 0,55. Perzentil eines jeden Jahres dargestellt. Diese Differenz sinkt im Zeitraum von 1963–2003 sowohl für den Median, als auch für das 0,55. Perzentil vom positiven in den negativen Bereich ab. Ab 2003 fand keine größere Baumaßnahme in der Tideelbe statt (Weilbeer et al. 2021). Betrachtet man den Zeitraum von 2004–2013 so liegt dort eine mittlere Differenz von -12,7 cm (mit einer Standardabweichung: $\sigma=4,3$ cm) für den Median und von -14 cm ($\sigma=10,2$ cm) für das 0,55. Perzentil vor. In den Jahren 2014–2020 erreicht die Tnw-Differenz zwischen St. Pauli und Cuxhaven die bisher größten negativen Werte. Im Zeitraum 2014–2020 liegt eine mittlere Differenz von -30 cm ($\sigma=1,8$ cm) für den Median und von -42 cm ($\sigma=7,7$ cm) für das 0,55. Perzentil vor.

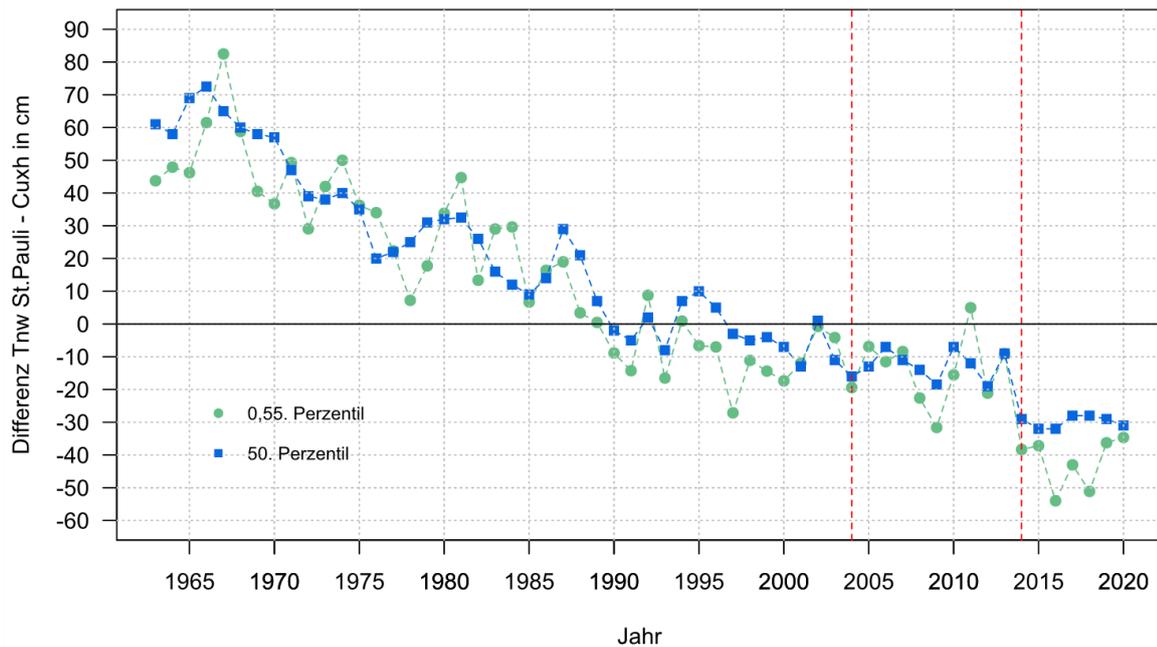


Abbildung 7-8 | Differenzen der Tnw Perzentile der jeweiligen Jahre St. Pauli - Cuxhaven: 50. Perzentil: blau; 0.55. Perzentil: grün.

Die Entwicklung der Tidedynamik in der Tideelbe ab 2013 ist (wie bereits beschrieben) vermutlich durch eine Überlagerung verschiedener Prozesse verursacht, die unter anderem durch natürliche morphologische Veränderungen, niedrige Abflüsse und unangepasstes Sedimentmanagement ausgelöst wurden (Weilbeer et al. 2021). Diese Entwicklung der Tidedynamik führte zu dem Absinken des Tnw bei St. Pauli relativ zu Cuxhaven ab 2013. Die Auswirkung zukünftiger Sturmfluten auf die Wasserstände in der Tideelbe ist somit unter anderem von der schwer zu beantwortenden Frage abhängig, wie sich die Tidedynamik in der Tideelbe in Abhängigkeit der genannten Prozesse in Zukunft weiterentwickelt. Mögliche zukünftige morphologische Änderungen in der Tideelbe, welche die Tidedynamik beeinflussen könnten, sind zum Beispiel eine Verlandung der Nebelbecken, Änderungen im Mündungstrichter der Elbe (z. B. Aufweitung der Fahrrinne) sowie eine Verringerung der Sohlrauheit. Diese möglichen zukünftigen Änderungen sowie deren Auswirkungen auf die Wasserstände bei Sturmfluten vorherzusagen liegt außerhalb der Zielsetzung dieser Untersuchung. Der Vollständigkeit halber und zur besseren Einordnung der Ergebnisse sowie der Abschätzung der möglichen zukünftigen Entwicklung von Sturmfluten werden diese Aspekte aber hier zumindest genannt.

In dieser Untersuchung wird der Fokus auf klimawandelbedingte Einflussfaktoren gelegt. Es wird der Einfluss des zukünftigen Meeresspiegelanstiegs, eines Wattwachstums und eines möglichen veränderten Abflusses auf Sturmfluten in der Tideelbe untersucht. Außerdem wird untersucht, welche Auswirkungen das meteorologische Ereignis von 1987 bei heutiger Topographie (Jahr 2019) der Tideelbe und niedrigerem Abfluss auf das NTnw bei St. Pauli hätte.

8 Klimawandelbedingte Änderungen wichtiger Einflussfaktoren

8.1 Zukünftige Änderungen der meteorologischen Einflussfaktoren

Wie in Abschnitt 6 gezeigt stellen die Wetterlagen einen großen Einflussfaktor auf den Wasserstand in der Tideelbe dar. Die globale Erderwärmung hat auch einen Einfluss auf die großräumige Zirkulation der mittleren Breiten und so auch auf die Wetterlagen über der Nordsee. Entsprechende eigene Analysen im Expertennetzwerk des BMDV laufen aktuell, im Folgenden wird ein Überblick von in der wissenschaftlichen Fachliteratur veröffentlichten Ergebnissen vorgestellt.

Studien, welche zukünftige Änderungen dynamischer Prozesse und Variabilitätsmuster im Klimasystem untersuchen, können ausschließlich mithilfe von globalen oder regionalen Klimamodellen durchgeführt werden. Riediger et al. (2014) konnten bereits zeigen, dass Globalmodelle die Häufigkeiten beobachteter Zirkulationsmuster, in diesem Fall ermittelt aus objektiven Wetterklassen (Bissolli und Dittmann 2001) gut reproduzieren können. Herrera-Lormendez et. al. (2021) bestätigten dies mit einer über Deutschland verschobenen Klassifizierung nach Jenkinson und Collison (1977) und erweiterten diese Aussage, in dem sie nachwiesen, dass Globalmodelle die interannuale Variabilität von Zirkulationsmustern und deren klimatologischen Frequenzen erfassen können.

Einige Studien zeigten, dass in den letzten Jahrzehnten besonders im Winter die zonalen Strömungen auf Kosten der meridionalen Strömungen zugenommen haben (Kučerová et al. 2017).

Um Aussagen für zukünftige Änderungen zu treffen, werden mit Klimamodellen Experimente für verschiedene Zukunftsszenarien gerechnet, welche als Projektionen bezeichnet werden. Ergebnisse aus Analysen solcher Projektionen deuten darauf hin, dass sich dieser Trend hin zu mehr zonalen Strömungen in Zukunft fortsetzen wird (Stryhal und Huth 2018).

Diese Verschiebungen sind verbunden mit einer Zunahme von westlichen Anströmungen über Zentraleuropa. Eine solche Entwicklung ist sowohl in den Projektionen der Globalmodelle (Huguenin et al. 2020; Donat et al. 2010), als auch den höher auflösenden Regionalmodellen (Plavcová und Kyselý 2013) zu erkennen. Diese Zunahme der westlichen Wetterlagen geht einher mit einer deutlichen Abnahme der östlichen Anströmungen im Winter. Die Zunahme von West- bzw. die Abnahme von Ostwetterlagen ist robust in den Klimaprojektionen der Globalmodelle (Stryhal und Huth 2018; Demuzere et al. 2009), sowie den Regionalmodellen projiziert (Riediger und Gratzki 2014). Eine solche Abnahme der östlichen Wetterlagen würde bedeuten, dass ein wesentlicher Einflussfaktor für eine Sturmeebe in der Tideelbe in Zukunft seltener gegeben sein wird.

Weitere Merkmale der atmosphärischen Zirkulation, die Sturmeeben beeinflussen, sind die Stärke und die Zugbahnen von Stürmen. Änderungssignale zu Sturmtiefs, so wie die Intensitäten der Stürme sind noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Dennoch deutet sich an, dass ein wärmeres Klima die Zugbahnen der Sturmtiefs und damit auch die Niederschlagszonen in Richtung Pol verschieben (Wu et al. 2010; Schneider und Mbengue 2013; Polvani und Barnes 2013; Hodges et al 2006). Europa liegt am „Ausgang“ des nordatlantischen „stormtracks“, also jenem Bereich, welcher klimatologisch ein lokales Maximum von durchziehenden intensiven Tiefdruckgebieten aufweist. Eine Vielzahl von Klimamodellen weist für die Region um die Britischen Inseln, die Nordsee und das nördliche Mitteleuropa für die

Zukunft eine Zunahme in Intensität und Häufigkeit von Stürmen für diese Region aus (Donat et al. 2010; Zappa und Shepherd 2017).

Im Rahmen des Expertennetzwerkes wurden bereits erste Analysen zu dem Verhalten der LAMB-Wetterlagenklassen in einzelnen Klimaprojektionen von Regionalmodellen der 5. Phase von CMIP durchgeführt (Jensen 2019). Die Ergebnisse dieser Arbeiten ergaben ebenfalls, dass eine Süd-Ost(SE) Wetterlage in Zukunft seltener auftreten wird. Tiefgehendere Analysen zu der großräumigen Zirkulation in einer Auswahl von CMIP6-Globalmodellen sind in Arbeit und werden in einem späteren Bericht veröffentlicht.

8.2 Änderung der Abflussverhältnisse der Tideelbe

Verschiedene Untersuchungen kamen zu unterschiedlichen Ergebnissen bezüglich der zukünftigen Abflussentwicklung in der Elbe. Nach Ergebnissen des Projektes KLIWAS (KLIWAS 2015) deuten Projektionen unter Annahme des A1B-Szenarios (IPCC 2014) für die nahe Zukunft (2021–2050) für die mittleren Abflüsse im Sommerhalbjahr mit -15 % und +5 % auf leichte Abnahmen hin, während sich die Änderungen für das Winterhalbjahr sowie das Jahresmittel und auch die Niedrigwasserabflüsse indifferent zeigen. Für die ferne Zukunft (2071–2100) zeichnet sich für den mittleren Abfluss im Jahresmittel und im Sommerhalbjahr eine abnehmende Tendenz von -30 % bis +10 % ab. Für das Winterhalbjahr gibt es keinen klaren Trend, die Bandbreite möglicher Zustände vergrößert sich jedoch um -30 % und +15 %. Für die Niedrigwasserabflüsse liegt diese Bandbreite in der fernen Zukunft zwischen -35 % und +10 %. Bei der Bewertung dieser Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass der Wasserhaushalt im Elbeeinzugsgebiet seit den 1960er Jahren verstärkt durch Talsperren und Wasserüberleitungen beeinflusst wird. Die Talsperrensteuerung sowie die Wasserbewirtschaftung im Braunkohletagebau haben einen großen Einfluss auf die Abflussmengen und erschweren so die Analyse klimawandelbedingter Veränderungen. Die Einflüsse der Wasserbewirtschaftung können größer sein, als das Signal einer Klimaveränderung (KLIWAS 2015).

Nach neueren Untersuchungen (Brienen et al. 2020; DAS Basisdienst Klima und Wasser 2021), in denen der Abfluss bei Neu Darchau unter Annahme des RCP-8,5 Szenarios für die Zukunft projiziert wurde, nimmt der mittlere jährliche Abfluss (MQ) relativ zum Bezugszeitraum (1971–2000) in naher Zukunft (2031–2060) im Median um 10 % und in ferner Zukunft (2071–2100) 15 % zu. Der mittlere niedrigste jährliche Abfluss (MNQ) ändert sich diesen Untersuchungen nach in naher Zukunft nicht und nimmt in ferner Zukunft im Median um 5 % ab. Die Abweichungen der neueren Ergebnisse von Brienen et al. (2020) zu den Ergebnissen von KLIWAS (2015) ist noch nicht geklärt (Brienen et al. 2020). Aufgrund der großen Unsicherheiten in der Abschätzung der zukünftigen Abflussentwicklung in die Tideelbe, wird in dieser Untersuchung zu Sturmeeben eine Bandbreite von Abflussszenarien bezüglich des Einflusses auf Wasserstände bei Sturmeeben untersucht (siehe Abschnitt 4.4.3).

8.3 Zukünftiger Meeresspiegelanstieg und Wattwachstum

Tabelle 8-1 fasst für einige *gemeinsame Sozioökonomische Entwicklungspfade (SSP)* die im Bericht des IPCC (IPCC 2021) angegebenen Projektionen des globalen mittleren Meeresspiegelanstiegs (SLR) relativ zum Referenzzeitraum (1995–2014) bzw. mittlere Meeresspiegelanstiegsraten für zwei Zeiträume zusammen. Es ist jeweils der Median, sowie die wahrscheinliche Bandbreite (66% Konfidenzintervall) angegeben.

Tabelle 8-1 | Projektionen des globalen mittlerer Meeresspiegelanstiegs für verschiedene SSP Szenarien relativ zum Referenzzeitraum 1995-2014 sowie Meeresspiegelanstiegsraten.

Sozioökonomischer Entwicklungspfad	SSP1-2.6 (nachhaltig)	SSP2-4.5 (Mittelweg)	SSP5-8.5 (Fossiler Weg)
Total 2030 in m	0.09 (0.08 -- 0.12)	0.09 (0.08-- 0.12)	0.10 (0.09 -- 0.12)
Total 2050 in m	0.19 (0.16-- 0.25)	0.20 (0.17-- 0.26)	0.23 (0.20-- 0.29)
Total 2100 in m	0.44 (0.32-- 0.62)	0.56 (0.44-- 0.76)	0.77 (0.63-- 1.01)
Total 2150 in m	0.68 (0.46-- 0.99)	0.92 (0.66-- 1.33)	1.32 (0.98-- 1.88)
Rate (2040–2060) in mm/Jahr	4.8 (3.5-6.8)	5.8 (4.4-8.0)	7.2 (5.6-9.7)
Rate (2080–2100) in mm/Jahr	5.2 (3.2-8.0)	7.7 (5.2-11.6)	12.1 (8.6-17.6)

Laut IPCC (2021) liegt der Median des zukünftigen regionalen mittleren Meeresspiegelanstieg im 21. Jahrhundert bei der Mehrheit der Küstenregionen weltweit in einem Bereich von ± 20 cm den Median des zukünftigen globalen mittleren SLR. Die in dem Bericht vom IPCC (2021) dargestellte räumliche globale Verteilung des zukünftigen SLR für das Jahr 2100, lässt, für die in Tabelle 8-1 betrachteten Szenarien, für die Nordsee keine deutliche Abweichung vom globalen Wert erkennen. Es wird daher angenommen, dass die globalen Werte auch für die Deutsche Bucht gültig sind.

Eine Veränderung des Meeresspiegels kann nicht nur die Tidedynamik, sondern infolgedessen auch die Topographie eines Küstengebiets beeinflussen, da das Küstenprofil ein morphodynamisches Gleichgewicht mit den hydrodynamischen Kräften anstrebt (Friedrichs 2011). Bei einem SLR können die Wattflächen, bei ausreichender Sedimentverfügbarkeit, zu einem gewissen Anteil mit dem Meeresspiegel mitwachsen (Becherer et al. 2018, van der Wegen 2013, Dissanayake et al. 2012, Benninghoff und Winter 2019). Inwieweit dieses Wattwachstum mit dem zukünftigen beschleunigten SLR mithalten kann, ist jedoch schwer zu quantifizieren und noch unzureichend erforscht.

Für diese Untersuchung zum Einfluss des SLR und eines Wattwachstums auf Sturmebben in der Tideelbe wird wie in Abschnitt 4.4.3 erläutert eine Bandbreite von Meeresspiegelanstiegsszenarien untersucht, um verschiedene mögliche Szenarien sowie die zeitliche Entwicklung abzudecken. Es werden Szenarien ohne sowie mit vollständig mit dem SLR mitgewachsenen Wattflächen untersucht.

9 Hydrodynamische Sensitivitätsstudie mittels Modellierung zweier Sturmbeben

Die Auswirkung möglicher zukünftiger Veränderungen der Einflussfaktoren Abfluss, Meeresspiegelanstieg und Topographieänderung auf Sturmbeben in der Tideelbe wird in einer Sensitivitätsstudie mittels hydrodynamisch-numerischer Modellierung ausgewählter Extremereignisse untersucht. Es werden dafür zwei Sturmbebenketten aus den Jahren 2018 und 1987 ausgewählt und in verschiedenen Szenarien mit variierten Einflussfaktoren simuliert. Die Einflussfaktoren werden einzeln sowie in Kombination bezüglich ihres Effekts auf die NTnw der Sturmbebenketten untersucht. Anhand der Ergebnisse können Wenn-Dann-Aussagen zur Änderung der NTnw bei Änderung der Einflussfaktoren getroffen werden. Details zu dem verwendeten Modell, der Analyse der Simulationsergebnisse, den eingesteuerten Randwerten und den gewählten Szenarien sind in Abschnitt 4.4 beschrieben.

9.1 Ergebnisse der Sensitivitätsstudie Sturmbebe 2018

9.1.1 Änderung durch Abflussvariation

Durch eine Sensitivitätsstudie mit verschiedenen Szenarien mit variiertem Abfluss soll ermittelt werden, wie das NTnw der Sturmbebenkette von 2018 in der Tideelbe durch den Abfluss beeinflusst wird. Es kann somit die Frage beantwortet werden, wie viel niedriger oder höher das NNTnw von 2018 hätte ausfallen können, wenn ein anderer Abfluss vorgelegen hätte.

Die Simulationsergebnisse des niedrigsten Tnw im Analysezeitraum (NTnw) (25.02. bis 26.03.2018) entlang der Tideelbe bei verschiedenen Abflussszenarien sind in Abbildung 9-1 dargestellt.

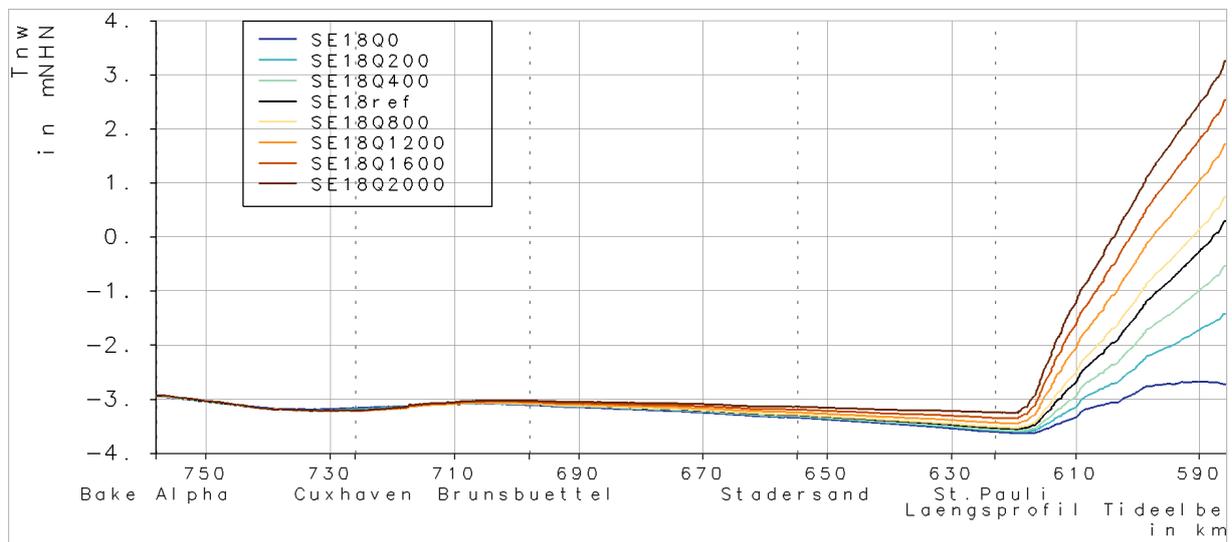


Abbildung 9-1 | Sturmbebe 2018: NTnw entlang der Tideelbe bei gemessenem Referenzabfluss (schwarz) und variiertem Abfluss bei Neu Darchau.

Abbildung 9-2 zeigt die Differenz zu dem während des Ereignisses gemessenen Referenzabfluss von 600-700 m³/s.

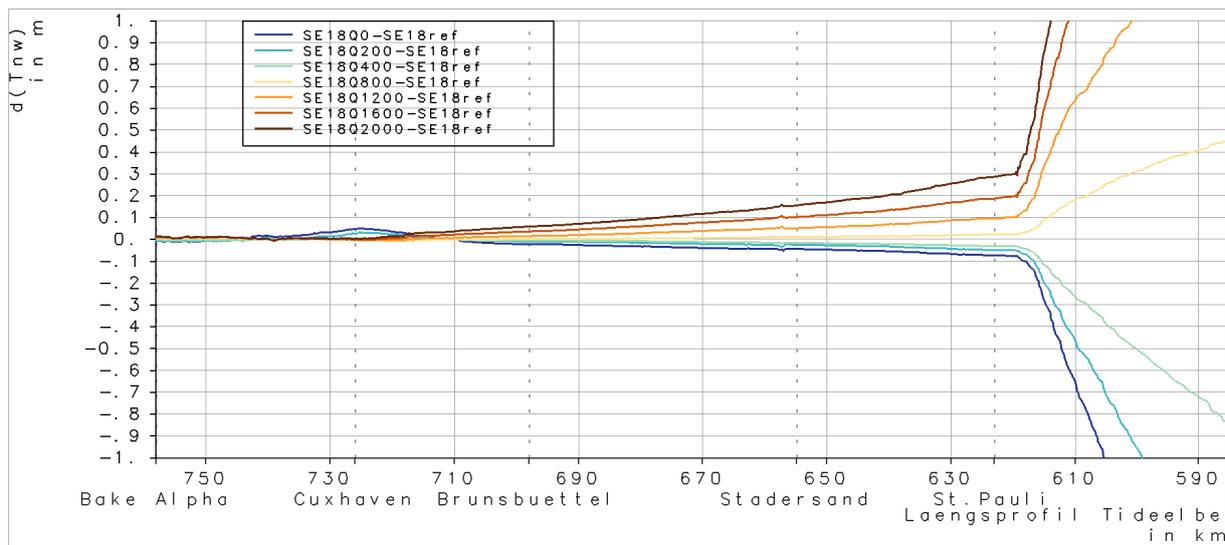


Abbildung 9-2 | Sturmebbe 2018: Änderung des NTnw entlang der Tideelbe relativ zum Referenzabfluss (600-700 m^3/s) bei variiertem Abfluss.

Wie in Abbildung 9-1 und Abbildung 9-2 dargestellt, nimmt der Einfluss des Abflusses stromauf zu. Stromab der Elbbrücken (Elbe-km 620) hat der Abfluss nur noch einen geringen Einfluss auf die Tidewasserstände. Die Abbildungen zeigen, dass ein niedrigerer Abfluss während der Sturmebbe 2018 das NTnw stromab von Elbe-km 620 um weniger als 10 cm gesenkt hätte.

Der Pegel St. Pauli ist von besonderem Interesse, da die Tidekennwerte dort charakteristisch für den Bereich des Hamburger Hafens sind und Änderungen somit die Verkehrsinfrastruktur, wie u.a. Wasserbauwerke, deutlich beeinflussen können. Außerdem kommt es in diesem Bereich zum größten MThb innerhalb der Tideelbe und zu einem deutlichen Einfluss des Abflusses auf die Tidekennwerte. Der Einfluss des Abflusses auf das NTnw am Pegel St. Pauli wird deshalb im Folgenden genauer analysiert.

Das NTnw der Sturmbebenkette 2018 am Pegel St. Pauli in Abhängigkeit von Abfluss und Meeresspiegel ist in Abbildung 9-3 dargestellt. Abbildung 9-4 zeigt die Änderung des NTnw relativ zu einem Abfluss von $0 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel St. Pauli bei verschiedenen Abflussszenarien. Der untersuchte Abfluss von $0 \text{ m}^3/\text{s}$ wird gewählt, um mithilfe einer Regression eine Abschätzung für jeden Abfluss ermitteln zu können. Es werden zwei lineare Regressionen (siehe Abbildung 9-4) für den Bereich $0-1000 \text{ m}^3/\text{s}$ sowie $1000-2000 \text{ m}^3/\text{s}$ gewählt. Für einen Abfluss unter $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ändert sich der Einfluss des Abflusses auf das NTnw durch einen Meeresspiegelanstieg kaum und liegt bei allen drei Szenarien bei etwa $1,3 \text{ cm}$ pro $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Ab einem Abfluss von $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ wird der Einfluss auf das NTnw größer und liegt für den aktuellen Meeresspiegel bei $2,3 \text{ cm}$ pro $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Durch einen Meeresspiegelanstieg verringert sich der Einfluss in diesem Bereich etwas und liegt bei einem SLR von 110 cm nur noch bei etwa 2 cm pro $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

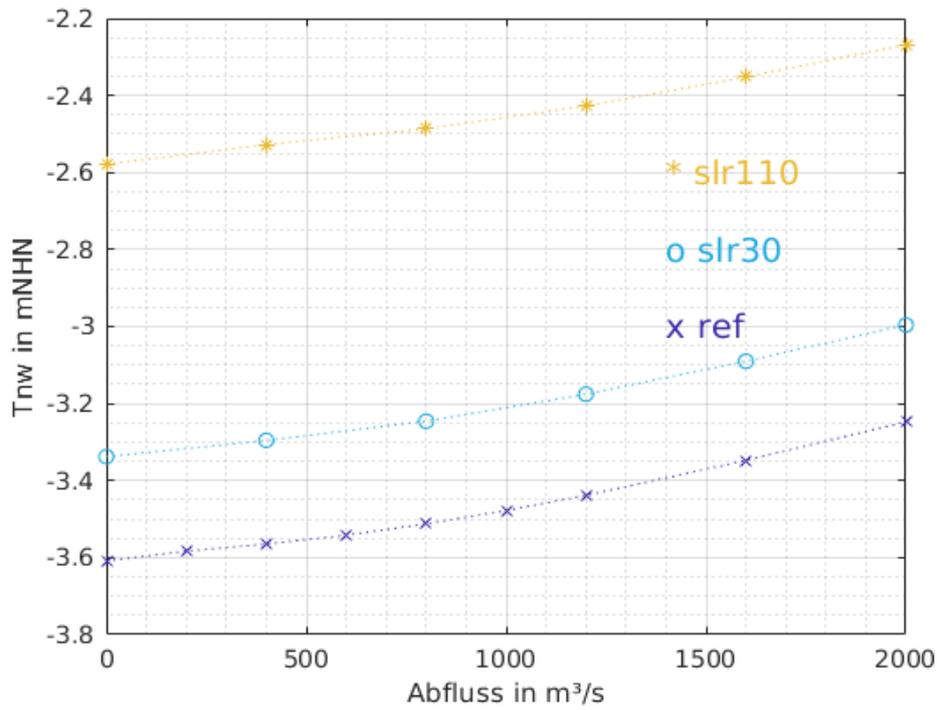


Abbildung 9-3 | Sturmebbe 2018: NTnw am Pegel St. Pauli bei verschiedenen Abflusssszenarien bei Referenzmeerspiegel (lila) sowie einem Meeresspiegelanstieg von 30 (blau) und 110 cm (gelb).

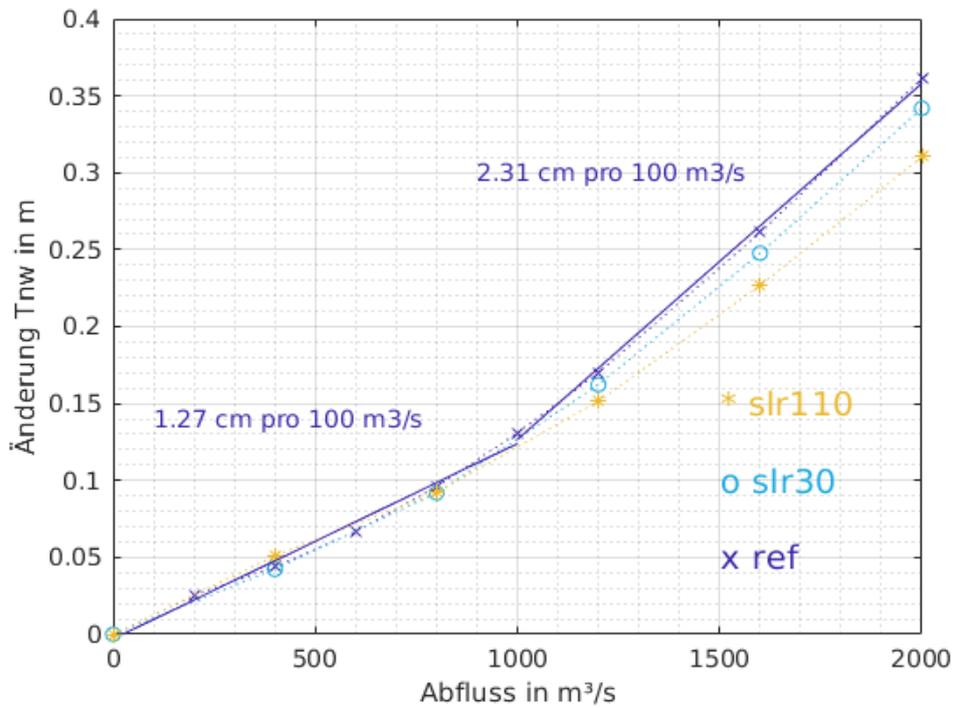


Abbildung 9-4 | Sturmebbe 2018: Änderung des NTnw am Pegel St. Pauli bei verschiedenen Abflusssszenarien bei Referenzmeerspiegel (lila) sowie einem Meeresspiegelanstieg von 30 (blau) und 110 cm (gelb), für Referenzmeerspiegel abgeschätzt mittels zweier Regressionsgeraden.

Der gemessene Abfluss während der Sturmbebe 2018, welche zu dem neuen NNTnw bei St. Pauli führte lag zwischen 600 und 700 m³/s. Ein besonders niedriger Abfluss in diesem Zeitraum von beispielsweise 200 m³/s hätte am Pegel St. Pauli zu einem 5-6 cm niedrigeren Tideniedrigwasser geführt.

Eine Betrachtung des Tidehubs der niedrigsten Sturmbebettide am Pegel St Pauli (Abbildung 9-5) zeigt, dass sich der Tidehub bis zu einem Abfluss von etwa 1200 m³/s mit steigendem Abfluss vergrößert. Bei Abflüssen über 1200 m³/s wird der Tidehub mit steigendem Abfluss wieder reduziert.

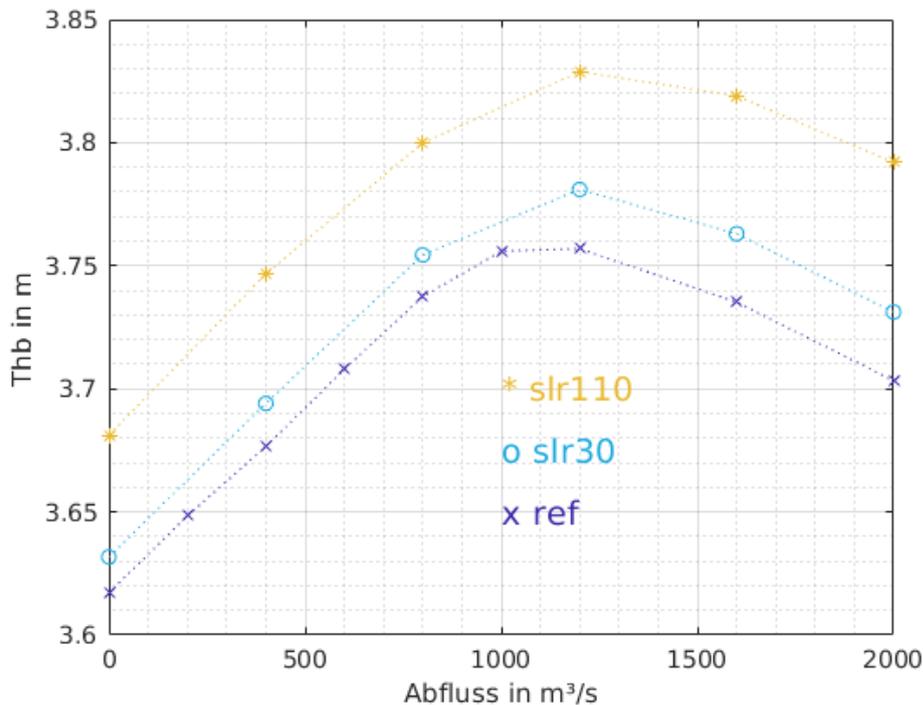


Abbildung 9-5 | Sturmbebe 2018: Thb der niedrigsten Tide am Pegel St. Pauli bei verschiedenen Abflussszenarien bei Referenzmeeresspiegel (lila) sowie einem Meeresspiegelanstieg von 30 (blau) und 110 cm (gelb).

9.1.2 Änderung durch Meeresspiegelanstieg mit sowie ohne Wattwachstum

Es gibt nach IPCC (2021) je nach Zeitraum und SSP-Szenario verschiedene Abschätzungen für den zukünftigen Meeresspiegelanstieg (siehe Abschnitt 8.3). Der Meeresspiegelanstieg wird grundsätzlich alle Wasserstände und somit auch extrem niedrige Wasserstände, die während Sturmbeben auftreten, in der Tideelbe anheben. Wie stark der Einfluss verschiedener hier gewählter Meeresspiegelanstiegsszenarien (siehe Abschnitt 4.4.3) auf das NNTnw der Sturmbebenkette 2018 ist, wird zunächst ohne eine Topographieänderung durch Wattwachstum untersucht.

Die Simulationsergebnisse des NNTnw im Analysezeitraum (25.02. bis 26.03.2018) entlang der Tideelbe bei verschiedenen Meeresspiegelanstiegsszenarien sind in Abbildung 9-6 dargestellt. Abbildung 9-7 darunter zeigt die Differenz zum Referenzzustand. Wie in den beiden Abbildungen zu erkennen ist, hebt sich das niedrigste Tnw durch die Meeresspiegelanstiegsszenarien in der Tideelbe von Bake A bis ca. Elbe-km 620 in der Größenordnung des jeweiligen am Modellrand eingesteuerten Meeresspiegelanstiegs an. Der Anstieg des Tnw ist in allen Szenarien etwas geringer als der am Rand eingesteuerte SLR. Stromauf von ca. Elbe-km 625 nimmt der Einfluss des Meeresspiegelanstiegs auf das NNTnw immer weiter ab.

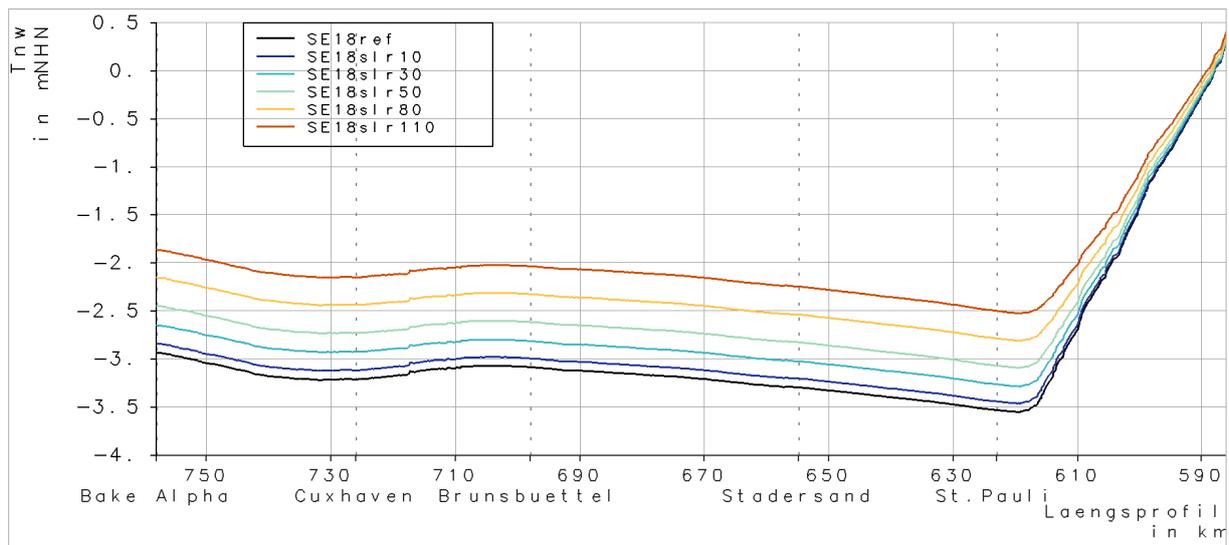


Abbildung 9-6 | Sturmeebe 2018: NTnw entlang der Tideelbe ohne SLR (schwarz) und bei verschiedenen SLR-Szenarien mit Referenzabfluss.

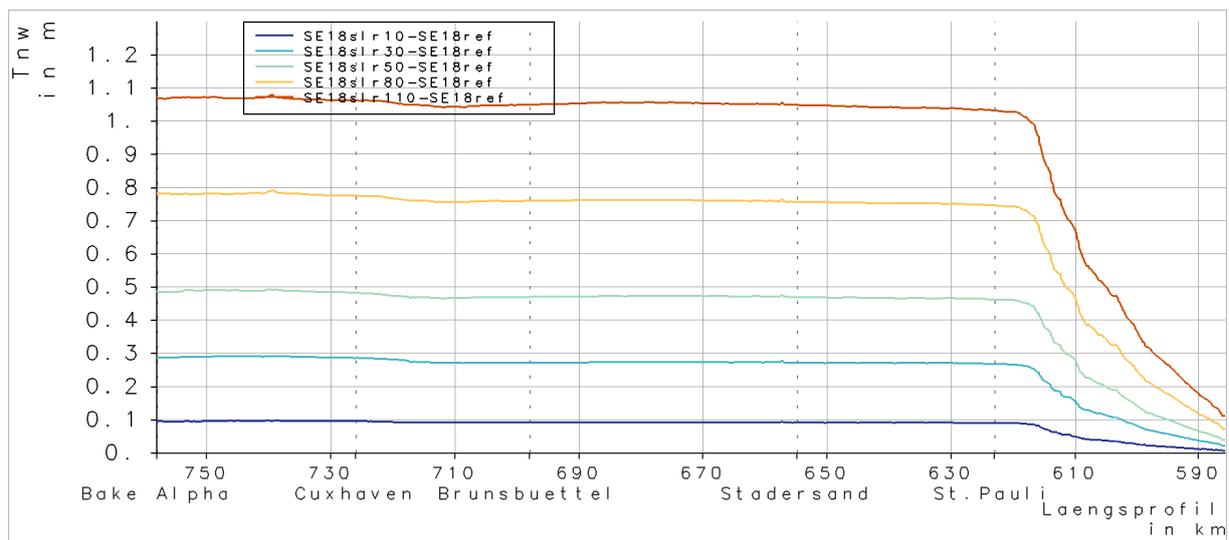


Abbildung 9-7 | Sturmeebe 2018: Änderung des niedrigsten NTnw entlang der Tideelbe zum Referenzzustand ohne SLR bei verschiedenen SLR-Szenarien mit Referenzabfluss.

Das NTnw am Pegel St. Pauli bei unterschiedlichen Meeresspiegelanstiegsszenarien für den Referenzabfluss ($600\text{--}700\text{ m}^3/\text{s}$) sowie einen Abfluss von 0 und $2000\text{ m}^3/\text{s}$ ist in Abbildung 9-9 dargestellt. Abbildung 9-9 zeigt die Änderung des NTnw am Pegel St. Pauli bei den Meeresspiegelanstiegsszenarien relativ zum Referenzzustand. Es wird deutlich, dass das NTnw bei SLR im Bereich von 83–94 % des SLR ansteigt. Dieser Anstieg ist bei einem Abfluss von $2000\text{ m}^3/\text{s}$ geringer als bei kleinerem Abfluss. Bei dem Szenario mit Referenzabfluss ($600\text{--}700\text{ m}^3/\text{s}$) und einem SLR von 30 cm steigt das NTnw um 27 cm an (89 % des SLR) an.

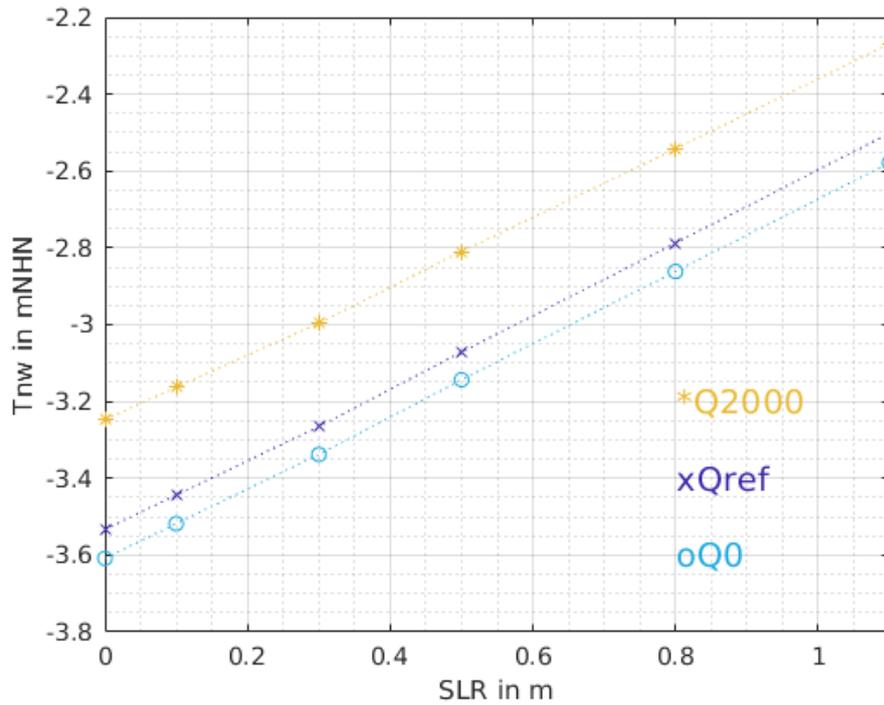


Abbildung 9-8 | Sturmebbe 2018: NTnw am Pegel St. Pauli bei verschiedenen Meeresspiegelanstiegsszenarien bei Referenzabfluss (lila) sowie bei einem Abfluss von 0 (blau) und 2000 m³/s (gelb).

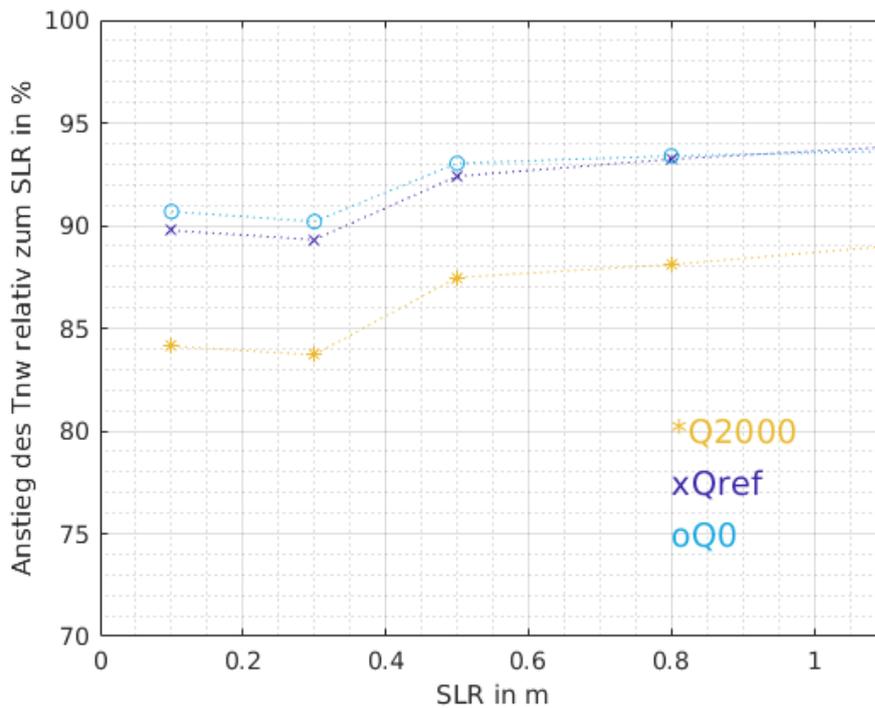


Abbildung 9-9 | Sturmebbe 2018: Änderung des NTnw am Pegel St. Pauli bei verschiedenen Meeresspiegelanstiegsszenarien bei Referenzabfluss (lila) sowie bei einem Abfluss von 0 (blau) und 2000 m³/s (gelb).

Eine Betrachtung des Tidehubs der niedrigsten Sturmebbentide am Pegel St Pauli (siehe Abbildung 9-10) zeigt, dass der Tidehub sich bei steigendem SLR vergrößert. Die Änderungen liegen bei bis zu 10 % des eingesteuerten SLR. Dieser Anstieg des Tidehubs der niedrigsten Sturmebbentide durch den SLR erklärt, warum das NTnw sich weniger als der SLR erhöht.

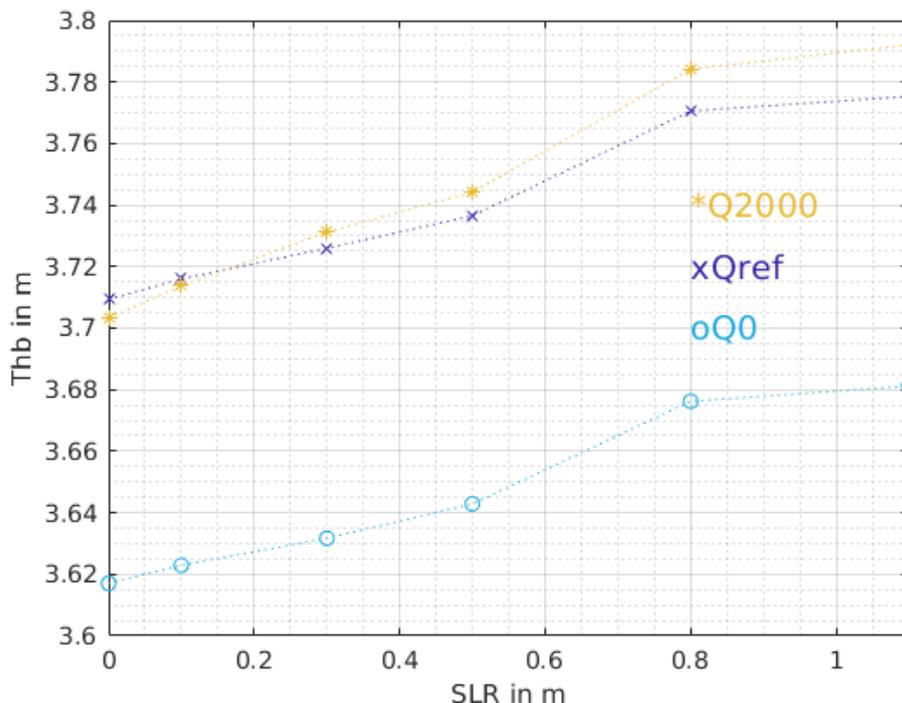


Abbildung 9-10 | Sturmeebe 2018: Thb der niedrigsten Tide am Pegel St. Pauli bei verschiedenen Meeresspiegelanstiegsszenarien bei Referenzabfluss (lila) sowie bei einem Abfluss von 0 (blau) und 2000 m³/s (gelb).

In den nachfolgenden Abbildungen wird der Einfluss der Wattwachstumsszenarien zusammen mit dem jeweiligen Meeresspiegelanstiegsszenario auf das NTnw entlang der Tideelbe dargestellt. Abbildung 9-12 und Abbildung 9-11 zeigen, dass das Wattwachstum mit dem SLR in der Deutschen Bucht und der Elbmündung zu einem leichten Anstieg des NTnw in der Größenordnung von etwa 10 % des jeweiligen SLR relativ zu den Szenarien ohne Wattwachstum in der Elbmündung führt, stromauf aber kaum einen Einfluss hat. Bei dem angenommenen Wattwachstum in der Deutschen Bucht sowie in der gesamten Tideelbe kommt es stromauf der Elbmündung zu einem leichten Absinken des NTnw in der Größenordnung von etwa 5 % des jeweiligen SLR relativ zu den Szenarien ohne Wattwachstum.

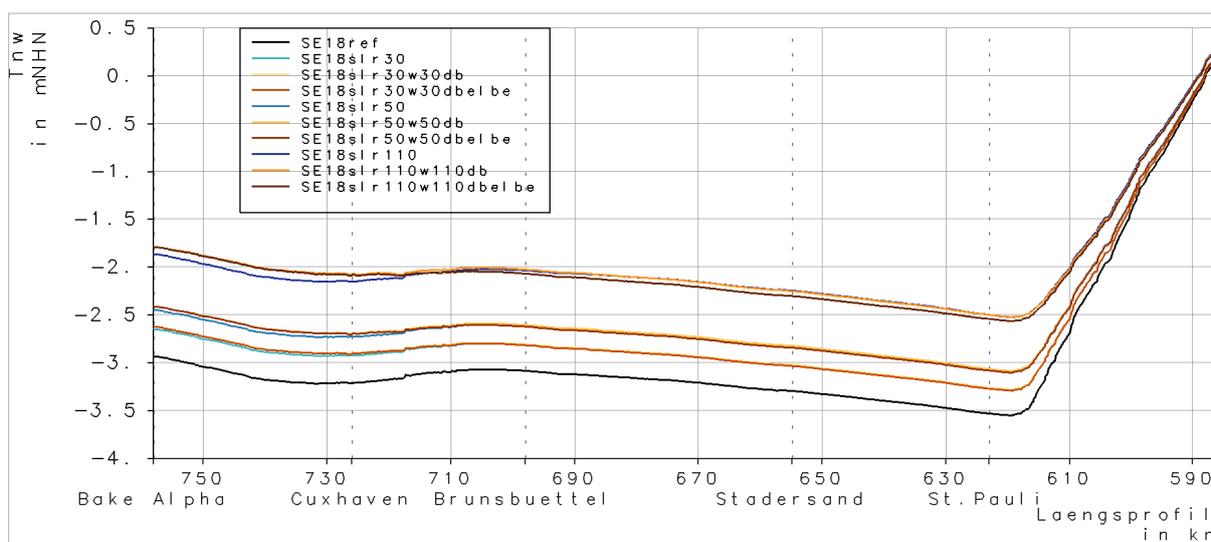


Abbildung 9-11 | Sturmeebe 2018: NTnw entlang der Tideelbe ohne SLR (schwarz), und bei verschiedenen SLR- und Wattwachstumsszenarien.

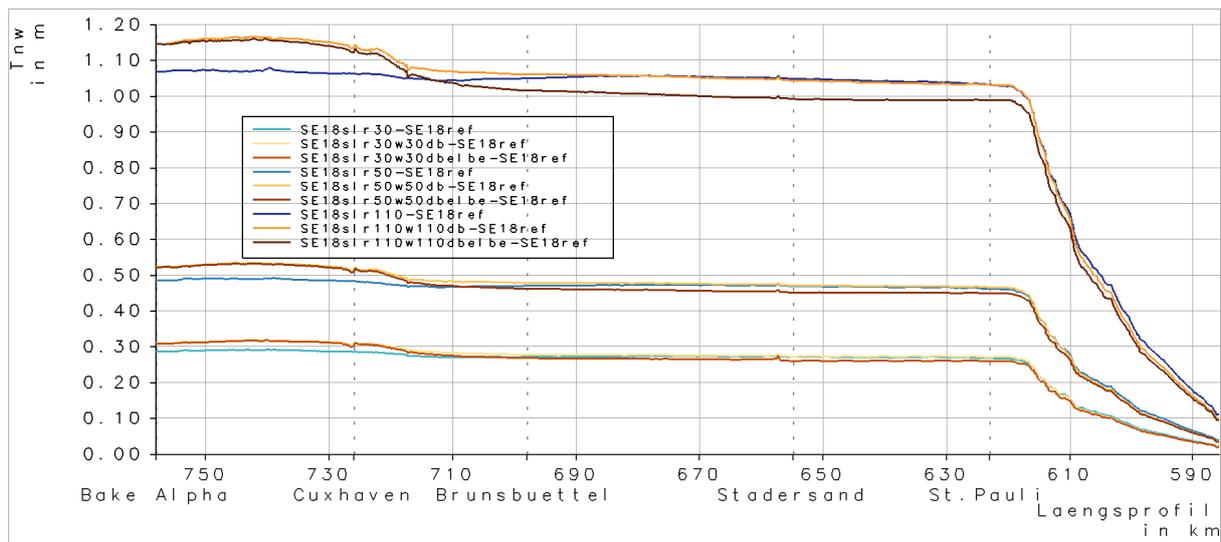


Abbildung 9-12 | Sturmflut 2018: Änderung des NTnw entlang der Tideelbe zum Referenzzustand bei verschiedenen SLR- und Wattwachstumsszenarien.

Das NTnw am Pegel St. Pauli bei drei SLR-Szenarien ohne und mit einem vollständigen Wattwachstum für den Referenzabfluss ($600-700 \text{ m}^3/\text{s}$) ist in Abbildung 9-13 dargestellt. Abbildung 9-14 zeigt die Änderung des niedrigsten Tnw am Pegel St. Pauli bei den Meeresspiegelanstiegsszenarien relativ zum Referenzzustand ohne SLR. Es wird deutlich, dass es am Pegel St. Pauli durch ein Wattwachstum bei SLR nur zu geringen Unterschieden im NTnw im Vergleich zu einem alleinigen SLR ohne Wattwachstum kommt. Durch ein Wattwachstum mit dem SLR in der DeBu und der gesamten Tideelbe steigt das NTnw etwas weniger stark an, als bei alleinigem SLR ohne Wattwachstum. Mit 86 % des SLR steigt das extreme Tnw am geringsten in dem betrachteten Szenario von 10 cm SLR mit vollständigem Wattwachstum in der gesamten Deutschen Bucht und der gesamten Tideelbe an. Bei allen hier untersuchten SLR-Szenarien (10, 30, 50 und 110 cm) kommt es, bei Referenzabfluss ($600-700 \text{ m}^3/\text{s}$) zu einem Anstieg des extremen Tnw von mindestens 85 % des SLR.

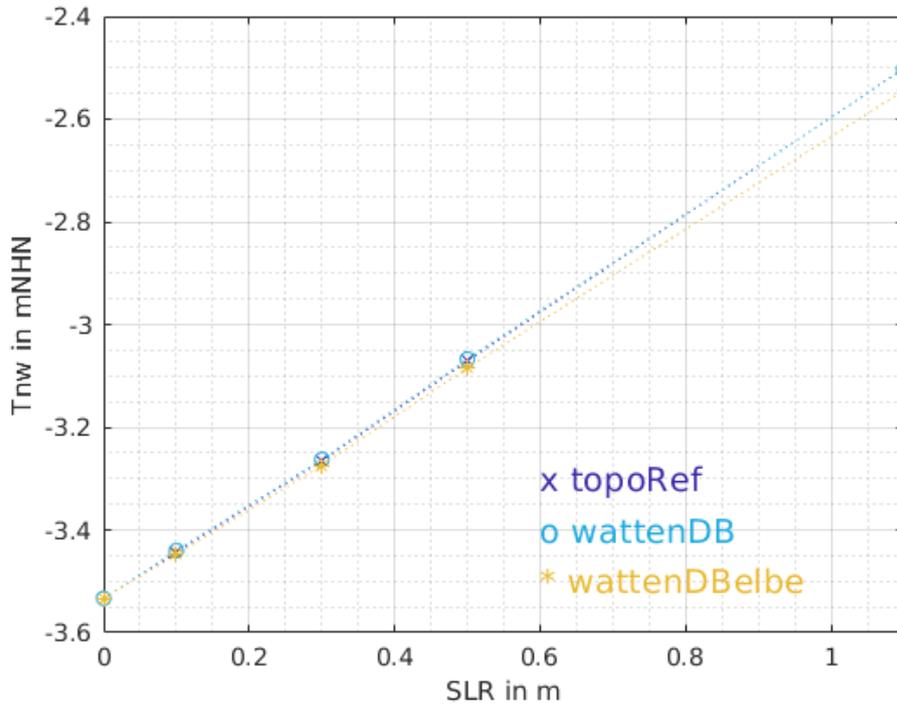


Abbildung 9-13 | Sturmflut 2018: NTnw am Pegel St. Pauli bei verschiedenen Meeresspiegelanstiegsszenarien mit Referenztopographie (lila), mit vollständigem Wattwachstum in der Deutschen Bucht und Elbemündung (blau) und mit vollständigem Wattwachstum in der Deutschen Bucht und der gesamten Tideelbe (gelb).

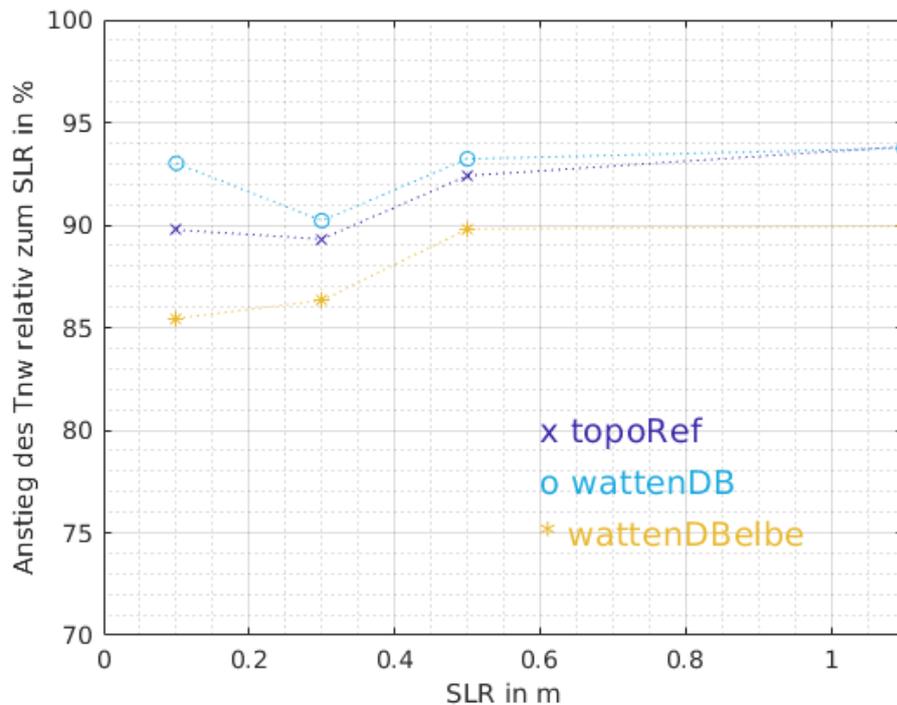


Abbildung 9-14 | Sturmflut 2018: Änderung des NTnw am Pegel St. Pauli relativ zum SLR bei verschiedenen Meeresspiegelanstiegsszenarien bei Referenztopographie (lila), mit vollständigem Wattwachstum in der Deutschen Bucht und Elbemündung (blau) und mit vollständigem Wattwachstum in der Deutschen Bucht und der gesamten Tideelbe (gelb).

In der Abbildung 9-15 ist der Tidehub der niedrigsten Tide der Sturmflutenkette 2018 am Pegel St. Pauli bei verschiedenen SLR-Szenarien mit und ohne Wattwachstum dargestellt. Es wird deutlich, dass ein vollständiges Wattwachstum in der Deutschen Bucht mit dem SLR kaum einen Einfluss auf den Thb hat, während der Thb deutlich stärker zunimmt, wenn auch die Wattgebiete in der gesamten Tideelbe mit dem SLR mitwachsen. Das erklärt, warum das NTnw in dem Szenario mit Wattwachstum in der gesamten Tideelbe weniger stark ansteigt, als in dem Szenario mit alleinigem SLR ohne Wattwachstum.

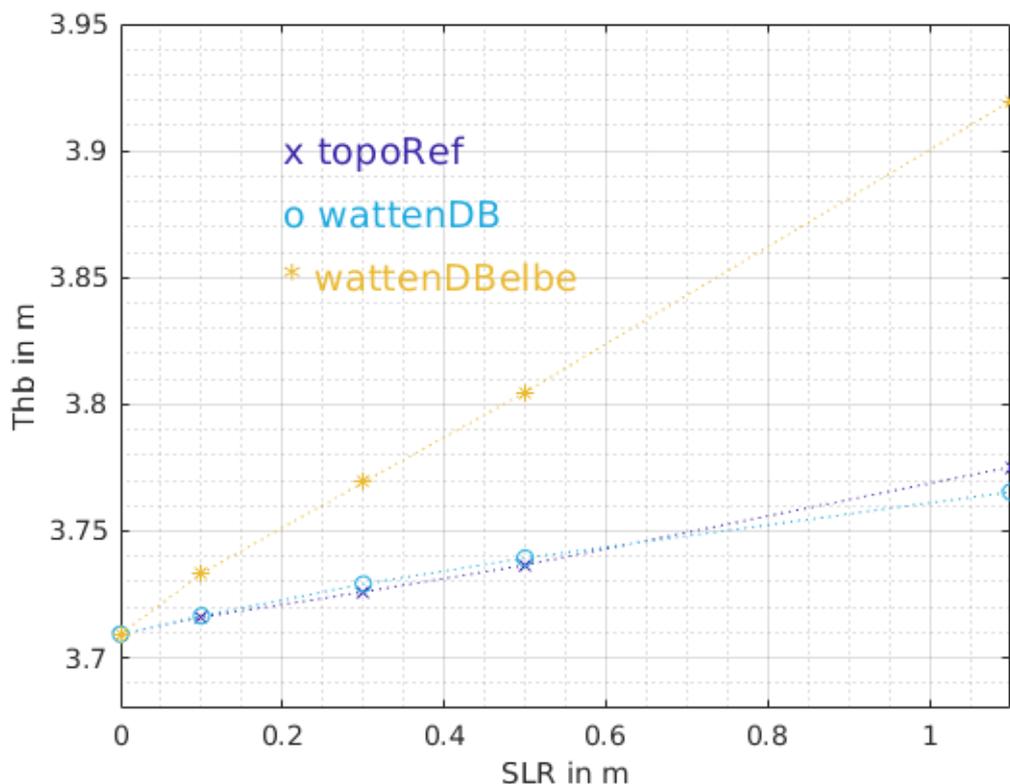


Abbildung 9-15 | Sturmflut 2018: Thb der niedrigsten Tide der Sturmflut 2018 am Pegel St. Pauli bei Referenztopographie (lila), mit vollständigem Wattwachstum in der Deutschen Bucht und Elbemündung (blau) und mit vollständigem Wattwachstum in der Deutschen Bucht und der gesamten Tideelbe (gelb).

9.2 Ergebnisse des Sturmflutenszenarios 1987

Ziel dieser Untersuchung ist es zu ermitteln, wie das NTnw am Pegel St. Pauli ausfallen würde, wenn sich das meteorologische Ereignis, welches zur Sturmflut 1987 führte, im heutigen topographischen Zustand der Elbe und bei niedrigerem Abfluss wiederholen würde. Seit 1987 stieg Meeresspiegel bei Cuxhaven um etwa 5-10 cm an (siehe Abschnitt 7.2). Gleichzeitig kam es in der Deutschen Bucht und in der Tideelbe zu morphologischen Änderungen, weshalb sich sowohl die heutige Topographie als auch die Tidedynamik von dem Zustand im Jahr 1987 unterscheidet. Wie in Abschnitt 7.3 erwähnt, wurden in dem Zeitraum seit 1987 außerdem mehreren Baumaßnahmen in der Tideelbe durchgeführt, welche zu einer deutlichen Veränderung der Tidedynamik führten. Die Simulation der Sturmflut 1987 wird in der vorliegenden Untersuchung mit aktueller (Jahr 2019) Modelltopographie sowie mit aktuellem Meeresspiegel durchgeführt. Eine Abweichung der Simulationsergebnisse zu den gemessenen Wasserständen ist daher zu erwarten. Da ein hochauflöser und vollständiger Topographiedatensatz aus dem Jahr 1987 nicht vorliegt, können die Simulationsergebnisse der Sturmflut 1987 nicht validiert

werden. Eine Unterschätzung des Einflusses der Windgeschwindigkeit auf die Wasserstände durch das grob aufgelöste Windfeld ist daher nicht auszuschließen.

In Abbildung 9-16 ist das NTnw der Sturmflut 1987 entlang der Tideelbe für das Simulationsergebnis mit Referenzabfluss (ca. 1600 m³/s), sowie mit reduziertem Abfluss von 400 und 200 m³/s dargestellt. An einigen Pegeln entlang der Elbe ist außerdem der 1987 gemessene Wasserstand eingezeichnet. Das NTnw der Simulation liegt bis etwa Stadersand über dem gemessenen Wert. Bei Cuxhaven liegt die Abweichung 10 cm über dem damals gemessenen NNTnw von NHN -3.91 m. Mögliche Ursachen sind, wie schon erwähnt, der Meeresspiegelanstieg seit 1987 sowie die veränderte Topographie, das grob aufgelöste Windfeld sowie Modellunsicherheiten³ des Deutsche Bucht Modells und des übergeordneten Modells. Stromauf von Stadersand liegt das NTnw in der Simulation unter dem der Messungen. Bei St. Pauli wird in der Simulation ein NTnw von NHN -3,63 m erreicht, welches damit 18 cm über dem von Cuxhaven liegt. Im Vergleich dazu lag im Jahr 1987 das gemessene NTnw bei St. Pauli bei NHN -3,48 m und damit 43 cm über dem von Cuxhaven. Wie aufgrund der vorangegangenen Analyse in Abschnitt 7.3 zu erwarten, liegt das NTnw bei St. Pauli verglichen mit den Messungen niedriger, wenn das meteorologische Ereignis der Sturmflut von 1987 bei aktueller Topographie auf die Wasserstände wirkt.

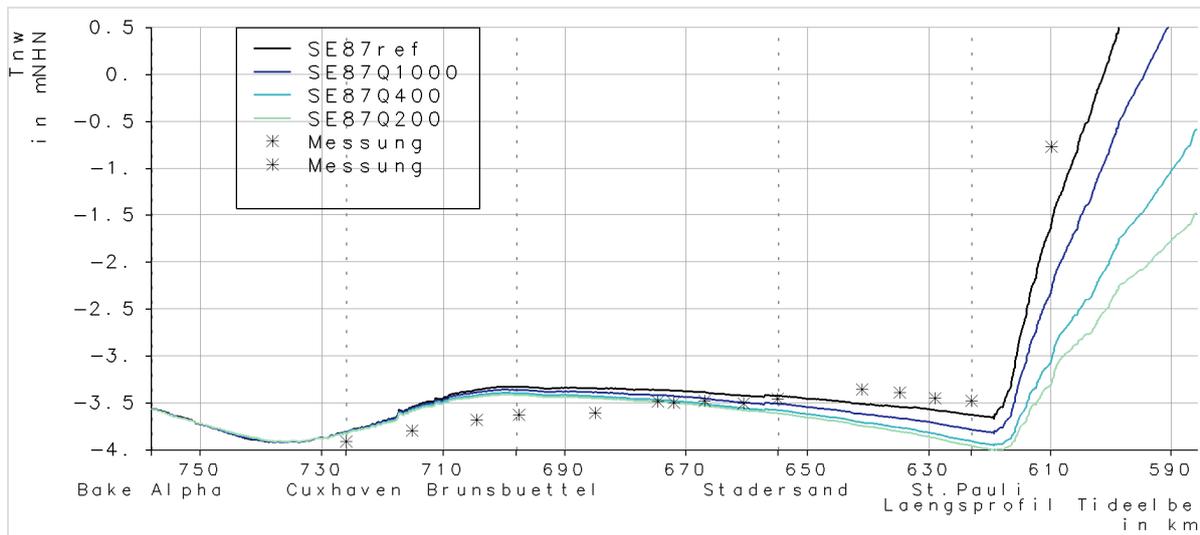


Abbildung 9-16 | Sturmflut 1987: NTnw der Sturmflut 1987 entlang der Tideelbe: grün: Simulationsergebnis bei gemessenem Abfluss (ca. 1600 m³/s), blau: Simulationsergebnis bei einem Abfluss von 400 m³/s, grau: Simulationsergebnis bei einem Abfluss von 200 m³/s, schwarze Marker: Messung.

Abbildung 9-17 zeigt die Differenz des NTnw bei variiertem Abfluss zum Szenario mit gemessenem Abfluss. Bei einem reduzierten Abfluss von 1000 m³/s sinkt das NTnw bei St. Pauli um 16 cm relativ zum Referenzabfluss. Bei einem Abfluss von 400 m³/s sinkt das NTnw bei St. Pauli um 28 cm und liegt bei NHN -3,91 m. Ein Abfluss von 200 m³/s führt zu einem Absinken des NTnw um 33 cm relativ zum Referenzabfluss, sodass sich bei St. Pauli ein NTnw von NHN -3,96 m ergibt. Der Einfluss des Abflusses auf das NTnw der Sturmflut 1987 ist somit deutlich größer, als bei der Sturmflut 2018. Das NTnw 1987 verändert sich somit bei Abflüssen größer als 1000 m³/s um etwa 2,7 cm pro 100m³/s und bei Abflüssen kleiner als 1000 m³/s um etwa 2,1 cm pro 100 m³/s.

³ Jedes Modell enthält Unsicherheiten, da es die Realität niemals exakt abbilden kann. Modellunsicherheiten entstehen z. B. aufgrund der diskreten Auflösung und der notwendigen vereinfachten Darstellung bestimmter physikalischer Prozesse (Parametrisierungen).

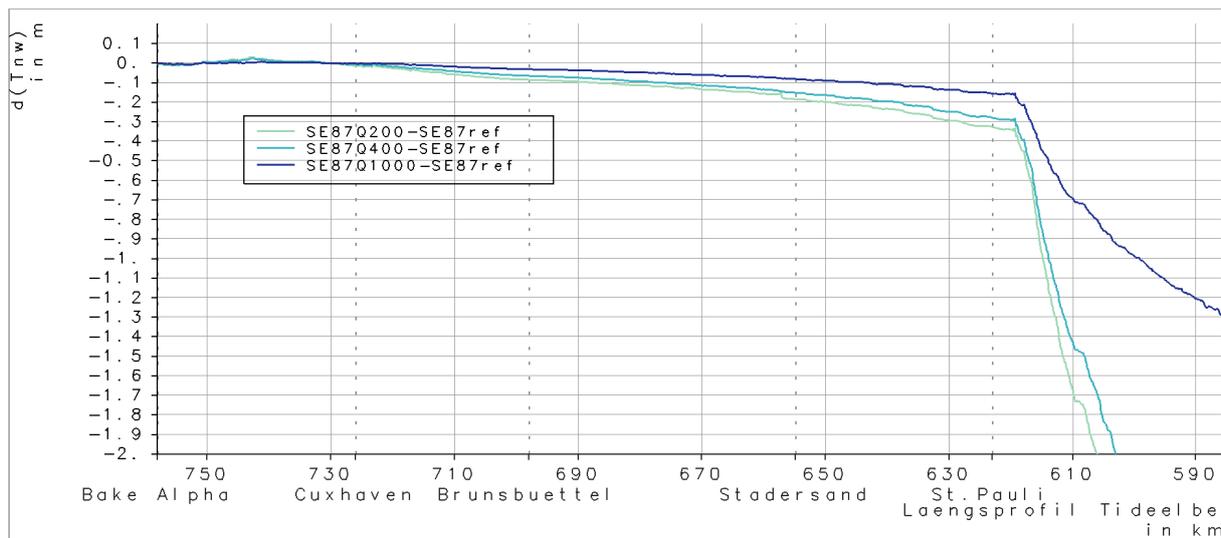


Abbildung 9-17 | Sturmflut 1987: Differenz des NTnw der Sturmflut 1987 entlang der Tidelbe zum Szenario mit gemessenem Abfluss ($1600\text{m}^3/\text{s}$): blau: Simulationsergebnis bei einem Abfluss von $400\text{ m}^3/\text{s}$, grau: Simulationsergebnis bei einem Abfluss von $200\text{ m}^3/\text{s}$.

9.3 Zusammenfassung und Diskussion der Hydrodynamischen Sensitivitätsstudie

9.3.1 Sensitivitätsstudie Sturmflut 2018

Die Sensitivitätsstudie mittels Modellierung der Sturmflutenkette 2018 zeigt, wie sich das NTnw in Zukunft bei verschiedenen Abfluss- und Meeresspiegelanstiegsszenarien verändern würde. Die Höhe des NTnw am Pegel St. Pauli verändert sich bei einem Abfluss unter $1000\text{ m}^3/\text{s}$ um etwa $1,3\text{ cm}$ pro $100\text{ m}^3/\text{s}$. Ab einem Abfluss von über $1000\text{ m}^3/\text{s}$ wird der Einfluss auf das NTnw größer und liegt für den aktuellen Meeresspiegel bei etwa $2,3\text{ cm}$ pro $100\text{ m}^3/\text{s}$. Für die Meeresspiegelanstiegsszenarien zeigen die Simulationsergebnisse, dass das NTnw der Sturmflutenkette 2018 am Pegel St. Pauli bei den untersuchten Szenarien mit $10, 30, 50, 80$ und 110 cm SLR ohne sowie mit Wattwachstum um $84\text{--}94\%$ des SLR ansteigt.

Untersuchungen zu den mittleren Verhältnissen (BAW 2018) zeigen bei einem Abfluss unter $1000\text{ m}^3/\text{s}$ eine Änderung des MTnw am Pegel St. Pauli von etwa $1,4\text{ cm}$ pro $100\text{ m}^3/\text{s}$. Zwischen $1000\text{ m}^3/\text{s}$ und $2000\text{ m}^3/\text{s}$ beträgt die Änderung des MTnw bei St. Pauli etwa $1,7\text{ cm}$ pro $100\text{ m}^3/\text{s}$. Der Einfluss des Abflusses auf das hier untersuchte NTnw ist somit ähnlich groß wie der Einfluss auf das MTnw. Die Abhängigkeit des NTnw vom Abfluss variiert jedoch stärker zwischen niedrigeren und höheren Abflüssen als beim MTnw. Unter $1000\text{ m}^3/\text{s}$ ist der Einfluss etwas geringer und zwischen $1000\text{ m}^3/\text{s}$ und $2000\text{ m}^3/\text{s}$ etwas größer als beim MTnw.

Die Untersuchungen zu den mittleren Verhältnissen (BAW 2018) zeigen außerdem, dass das MTnw am Pegel St. Pauli bei Szenarien mit einem Abfluss von $276\text{--}2000\text{ m}^3/\text{s}$ und einem SLR von 0 bis 115 cm ohne Wattwachstum um $91\text{--}95\%$ des SLR ansteigt. Vorangegangene Untersuchungen im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerk (BAW 2020) ermittelten für ein Szenario mit SLR 110 cm und einem vollständiges Mitwachsen der Wattflächen in der Deutschen Bucht und der gesamten Tidelbe bei einem Abfluss von $600\text{ m}^3/\text{s}$ einen Anstieg des MTnw von 86% bei St. Pauli. Das hier untersuchte NTnw steigt

verglichen mit dem MTnw bei alleinigem SLR ohne Wattwachstum somit etwas geringer an, der Anstieg des NTnw bei SLR und vollständigem Wattwachstum ist jedoch etwas höher verglichen mit dem MTnw.

9.3.2 Sturmebbenszenario 1987

In diesem Szenario wird untersucht, welche Auswirkungen das meteorologische Ereignis von 1987 auf die Wasserstände in der Tideelbe haben könnte, wenn es in der heutigen Topographie (Jahr 2019) und bei niedrigerem Abfluss noch einmal auftreten würde. Da das meteorologische Ereignis von 1987 im Modell mit aktueller Topographie simuliert wurde, sind Abweichungen zwischen dem gemessenen Wasserstand und den Simulationsergebnissen zu erwarten. Bei Referenzabfluss liegt das NTnw am Pegel St. Pauli im Modell mit NHN -3,63 m 15 cm unter der Messung und die Differenz zu Cuxhaven ist in der Simulation mit 18 cm deutlich kleiner als die gemessene Differenz von 43 cm. Bei einem reduzierten Abfluss von 400 m³/s liegt das NTnw bei St. Pauli in der Modellsimulation bei NHN -3,91 m und bei einem Abfluss von 200 m³/s bei NHN -3,96 m. Das NTnw bei St. Pauli unterschreitet somit, in diesen Szenarien mit reduziertem Abfluss das bisherige beobachtete NNTnw an dem Pegel (NHN -3,64 m am 18.03.2018) um ca. 30 cm. Dabei ist zu beachten, dass das NTnw 2018 bei St. Pauli im Modell im Vergleich mit den Messungen etwas zu hoch ausfällt (Kap 4.4.3), sodass das NNTnw in dem erläuterten Szenario in Realität auch noch tiefer liegen könnte.

In den Simulationsergebnissen beträgt die Differenz der NTnws zwischen den Pegeln St. Pauli und Cuxhaven bei der Sturmebbe 2018 bei einem Abfluss von 400 m³/s etwa -35 cm und bei der Sturmebbe 1987 bei gleichem Abfluss nur -9 cm. Mögliche Ursachen liegen in den bei Sturmebbe 1987 deutlich niedrigeren Wasserständen. Am Pegel Cuxhaven liegt das NTnw 1987 in der Simulation mit einem Abfluss von 400 m³/s dort etwa 60 cm tiefer als das NTnw 2018 bei gleichem Abfluss. Dadurch kommt es möglicherweise zu einer stärkeren Dämpfung der Tidewelle durch Sohlreibung. Zudem könnte der niedrigere Wasserstand in der Elbmündung zu einer reduzierten Konvergenz der Durchflussfläche der Elbe in Richtung stromauf führen. Nach Gurumurthy et al. (2019) verursachen konvergente Küstenlinien nicht nur eine Amplifikation von Sturmfluten, sondern auch von Sturmebben (*negative storm surges*), was sie als *inverse coastal funneling* bezeichnen.

Der Einfluss des Abflusses ist bei dem simulierten Sturmebbenszenario 1987 bei über 1000 m³/s mit 2,7 cm pro 100 m³/s und unter 1000 m³/s mit 2,1 cm pro 100 m³/s größer, als bei der Sensitivitätsstudie der Sturmebbe 2018 jeweils ermittelten 2,3 und 1,3 cm pro 100 m³/s. Ursache könnte auch hier der bei Sturmebbe 1987 niedrigere Wasserstand sein. Bedingt durch die Querschnittsgeometrie der Rinnen ist der Durchflussquerschnitt bei niedrigeren Wasserständen kleiner, sodass eine veränderte Abflussmenge die Höhe des Wasserstandes stärker beeinflusst.

10 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In diesem Bericht wurde untersucht, welchen Einfluss der Klimawandel zukünftig auf Sturmebben in der Tideelbe haben könnte. Die Einflussfaktoren die dabei betrachtet wurden, sind die meteorologischen Bedingungen, welche Sturmebben begünstigen können, der Meeresspiegelanstieg und ein potentiell dadurch verursachtes Wattwachstum, sowie der Abfluss in die Tideelbe.

Nach unserem Erkenntnisstand gibt es bisher keine offizielle Definition zu Sturmebben. In diesem Bericht wurde eine Definition für Sturmebben in der Tideelbe entwickelt (siehe Abschnitt 3), die allein auf der klimatologischen Auftrittswahrscheinlichkeit beruht, welche der von Sturmfluten in der Deutschen Bucht entspricht und in der Anwendung für den Zeitraum 1950–2019 zu einem Ereigniskatalog von 271 Sturmebben führt.

Mithilfe dieses Ereigniskataloges wurde anschließend untersucht, welche meteorologischen Bedingungen diese Sturmebben begünstigen. Zunächst wurden verschiedene Parameter vor einer Sturmebbe betrachtet, um zu analysieren, welche atmosphärischen Bedingungen (Wetterlage, Sturmstärke und effektiver Wind) vor einem solchen Extremereignis vorherrschen. Die Untersuchungen ergeben, dass die Wetterlage Süd-Ost um ein 8-faches und auch „Sturm“ um ein 5-faches häufiger vor einer Sturmebbe vertreten sind, als klimatologisch zu erwarten wäre. Auch der für Sturmebben in der Tideelbe relevante effektive Wind von über 10 m/s ist um ein 17-faches häufiger vertreten, als im klimatologischen Mittel.

In einer weiteren Analyse wurde die Entwicklung sehr niedriger Wasserstände in der Tideelbe in der Vergangenheit untersucht. Eine Analyse von Pegeldata (Abschnitt 7) zeigt, dass extrem niedrige Tideniedrigwasserstände am Pegel St. Pauli in der Vergangenheit eine ähnliche Entwicklung wie das mittlere Tideniedrigwasser zeigen, und zwischen 1950–2020 relativ zum Pegel Cuxhaven deutlich abgesunken sind.

Eine Zusammenfassung der in der Fachliteratur präsentierten Abschätzungen zur zukünftigen Entwicklung der betrachteten Einflussfaktoren im Klimawandel zeigt mit welchen Veränderungen dieser Einflussfaktoren zu rechnen ist und verdeutlicht die Unsicherheiten, die insbesondere bei den Projektionen des zukünftigen Meeresspiegelanstiegs bestehen. Abschätzungen zur Entwicklung der Wetterlagen im Klimawandel deuten darauf hin, dass Süd-Ost-Wetterlagen, welche zu Sturmebben führen können, in Zukunft seltener werden (siehe Abschnitt 8.1). Die zukünftigen Änderungen für Stürme sind noch mit großen Unsicherheiten behaftet, eine Vielzahl von Klimamodellen weist jedoch für die Region um die Britischen Inseln, die Nordsee und das nördliche Mitteleuropa für die Zukunft eine Zunahme in Intensität und Häufigkeit von Stürmen aus (siehe Abschnitt 8.1). Die betrachteten Abschätzungen zur zukünftigen Abflussentwicklung (siehe Abschnitt 8.2) sind nicht eindeutig. Die neueren Untersuchungen (Brienen et al. (2020), (DAS Basisdienst Klima und Wasser 2021)) deuten nicht auf eine Abnahme des mittleren jährlichen Abflusses in naher und ferner Zukunft hin und nur auf eine geringe Abnahme des niedrigsten jährlichen Abflusses (MNQ) in der fernen Zukunft. Da der Abfluss in die Tideelbe jedoch einer hohen Variabilität unterliegt, können schon heute und auch in Zukunft niedrige Abflüsse zusammen mit einer Sturmebbe auftreten. Die Projektionen des IPCC (2021) zum zukünftigen globalen mittleren Meeresspiegelanstieg liegen für das Ende der erste Hälfte des 21. Jahrhunderts in einem Bereich zwischen 16 und 29 cm (für SSP1-2.6, SSP2-4.5 und SSP5-8.5). Zum Ende des Jahrhunderts unterscheiden sich die Abschätzungen stärker je nach sozioökonomischem Entwicklungspfad, sodass sich eine Bandbreite zwischen 32 und 101 cm ergibt (siehe Abschnitt 8.3).

Um den Einfluss möglicher Meeresspiegelanstiegs-, Wattwachstums- und Abflusszenarien auf Sturm-ebben in der Tideelbe zu untersuchen, wurde eine Sensitivitätsstudie mittels hydrodynamisch-numerischer Modellierung zweier Sturmebbenketten durchgeführt. Die gewählten Sturmebbenketten ereigneten sich 1987 sowie 2018 und führten jeweils zum niedrigsten jemals beobachteten Tideniedrigwasser (NNTnw) am Pegel Cuxhaven bzw. St. Pauli. Die Simulationsergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass durch einen Meeresspiegelanstieg zwischen 10 und 110 cm das niedrigste Tideniedrigwasser der Sturmebbe 2018 (NTnw) am Pegel St. Pauli um 84-94 % mit dem jeweiligen SLR-Szenario ansteigt. Die Ergebnisse der Simulationen mit Abflussvariation zeigen, dass sich die Höhe des NTnw der beiden untersuchten Sturmebben am Pegel St. Pauli bei einem Abfluss unter 1000 m³/s um etwa 1-2 cm pro 100 m³/s verändert. Ab einem Abfluss von über 1000 m³/s wird der Einfluss auf das NTnw größer und liegt für den aktuellen Meeresspiegel bei etwa 2-3 cm pro 100 m³/s. Würde das meteorologische Ereignis vom März 1987, welches damals zusammen mit einem Abfluss von 1600 m³/s auftrat, im heutigem Zustand⁴ bei einem geringeren Abfluss von nur 400 m³/s auftreten, so deuten die Simulationsergebnisse darauf hin, dass das aktuelle NNTnw bei St. Pauli (NHN -3,64 m am 18.03.2018) um etwa 30 cm untertroffen werden könnte.

Nach den Erkenntnissen dieser Untersuchung wird es langfristig im Klimawandel zu einer geringeren Beeinträchtigung durch Sturmebben in der Tideelbe kommen. Wetterlagen, welche Sturmebben verursachen können, werden in Zukunft wahrscheinlich seltener auftreten. Abschätzungen zur Abflussentwicklung deuten nicht auf eine Abnahme des mittleren jährlichen Abflusses hin. Zudem wird der Meeresspiegelanstieg die Wasserstände, auch bei Sturmebbenbedingungen anheben. Sturmebben werden somit, insbesondere durch den Meeresspiegelanstieg, zukünftig seltener vorkommen und höher ausfallen. In naher Zukunft können jedoch bisherige extrem niedrige Wasserstände in der Tideelbe untertroffen werden, bevor der Meeresspiegelanstieg überwiegt. Eine genauere zeitliche Einordnung und quantitative Einschätzung der zukünftigen Entwicklung von Sturmebben in der Tideelbe ist aufgrund der Unsicherheiten in der Abschätzung der Entwicklung der Einflussgrößen nicht möglich.

⁴ Topographie von 2019 in der Tideelbe

11 Ausblick

Im Rahmen des BMDV-Expertennetzwerkes sind weitere Arbeiten zu dem Thema Wetterlagen und ihrem Einfluss auf die Tideelbe geplant. Stürmen kommt dabei auch weiterhin eine große Bedeutung zu, besonderer Fokus der Arbeiten wird dabei auf den Wirkungsketten im Zusammenhang mit Sturmfluten liegen. Des Weiteren ist ein Vergabeprojekt „Stresstest Küste“ geplant, das in Anlehnung an bereits im BMDV-Expertennetzwerk durchgeführte Stresstests, den Einfluss von Extremsituationen auf das Verkehrsnetz untersucht. Am Beispiel des Auftretens von Sturmflutketten in Kombination mit einem klimawandelinduzierten Meeresspiegelanstieg soll untersucht werden, wie sich mögliche Extremereignisse bzw. die Kombination von verschiedenen, individuell nicht notwendigerweise extremen Bedingungen im Klimawandel (z. B. Meeresspiegelanstieg und erhöhte Niederschläge/Binnenabflüsse) auf die Verkehrsströme auswirken.

Außerdem werden die meteorologischen Betrachtungen dieses Berichts um die Analyse von Klimaprojektionen erweitert. Hierfür ist geplant, die in diesem Bericht entwickelten Ansätze im Hinblick auf die Wetterlagenklassifikation und Sturmidentifikation als Kennwerte der großskaligen Zirkulation, sowie die Betrachtung des effektiven Windes im Zusammenhang mit dem Risiko für Sturmebben auf ein Multi-Modell-Ensemble von globalen Klimasimulationen der neuesten Generation (CMIP6) auszudehnen.

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1 Häufigkeit der Sturmebben am Pegel Cuxhaven pro Jahr (gekennzeichnet durch Sterne) und im Mittel (gekennzeichnet durch die gestrichelte Linie) für den Zeitraum 1950–2019.	3
Abbildung 3-2 Verteilung der 271 Sturmebben am Pegel Cuxhaven auf die einzelnen Monate und Jahreszeiten (Winter=DJF, Frühling =MAM, Sommer = JJA, Herbst = SON) im Zeitraum 1950–2019. ...	4
Abbildung 4-1 Lage der 16 Gitterpunkte, die zur Berechnung der Lamb-Wetterlagen verwendet werden.	7
Abbildung 4-2 Topographie des Deutsche Bucht Modells.	10
Abbildung 4-3 Sturmebbe 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel Cuxhaven, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot).....	13
Abbildung 4-4 Sturmebbe 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel St. Pauli, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot).....	13
Abbildung 4-5 Topographieerhöhung der Wattflächen im Modell in der DeBu und der Elbmündung (links) und der DeBu und der gesamten Tideelbe (rechts).	16
Abbildung 4-6 Tidekennwerte des Wasserstands (Lang 2003).	16
Abbildung 5-1 Luftdruckfeld 14. – 19. März 2018 mit Angaben zu LAMB-Wetterlagentyp und LAMB-Sturmklasse aus Tagesmitteln des ERA5 Luftdrucks (auf Meeresniveau).....	17
Abbildung 5-2 Sturmebbenereignis 2018: Messungen des Wasserstandes bei Pegel Cuxhaven, der Windgeschwindigkeit und Windrichtung bei Scharhörn und des Abflusses bei Neu Darchau.....	18
Abbildung 5-3 Effektiver Wind ermittelt aus einer Projektion der U- und V-Komponenten des geostrophischen Windes (aus LAMB Klassifikation) auf 142° für den Zeitraum 14. – 21.03.2018.Grundlage hierfür waren stündliche ERA5 Daten des Luftdrucks (auf Meeresniveau). Ebenfalls markiert (rot) sind die Sturmebben in diesem Zeitraum.....	19
Abbildung 5-4 Luftdruckfeld 28. Februar 1987 – 5. März 1987 mit Angaben zu LAMB-Wetterlagentyp und LAMB-Sturmklasse aus Tagesmitteln des ERA5 Luftdrucks (auf Meeresniveau).....	19
Abbildung 5-5 Sturmebbenereignis 1987: Messungen des Wasserstandes bei Pegel Cuxhaven, der Windgeschwindigkeit und Windrichtung bei Scharhörn und des Abflusses bei Neu Darchau.....	20
Abbildung 5-6 Effektiver Wind ermittelt aus einer Projektion der U- und V-Komponenten des geostrophischen Windes (aus LAMB Klassifikation) auf 142° für den Zeitraum 28.02.1987 – 05.03.1987.Grundlage hierfür waren stündliche ERA5 Daten des Luftdrucks (auf Meeresniveau) Ebenfalls markiert (rot) sind die Sturmebben in diesem Zeitraum.....	21
Abbildung 6-1 Links: Mittlere Verteilung der LAMB Wetterlagen, ermittelt aus Tagesmitteln des ERA5 Luftdrucks auf Meeresniveau für den gesamten untersuchten Zeitraum von 1950 bis 2019. Rechts: Mittlere Verteilung der LAMB Wetterlagen 24 Stunden vor den Sturmebben am Pegel Cuxhaven (Tnw unter 0,55. Perzentil aller Tnw) zwischen 1950 und 2019.	22

Abbildung 6-2 Links: Mittlere Verteilung der LAMB Sturmklassen, ermittelt aus Tagesmitteln des ERA5 Luftdrucks auf Meeresniveau für den gesamten untersuchten Zeitraum von 1950 bis 2019. Rechts: Mittlere Verteilung der LAMB Sturmklassen 24 Stunden vor den Sturmebben am Pegel Cuxhaven (Tnw unter 0,55. Perzentil aller Tnw) zwischen 1950 und 2019.	23
Abbildung 6-3 Verteilung der U- und V-Komponenten des geostrophischen Windes aus der LAMB Wetterlagenklassifikation für tägliche Mittel (schwarz) und für das 24 Stunden Mittel vor einem Sturmebben (rot). Außerdem gekennzeichnet ist, ob zu dieser Zeit nach LAMB ein Sturm vorlag (blaues bzw. gelbes ,x').	24
Abbildung 6-4 Verteilung des effektiven Windes projiziert auf 142° über die Tagesmittel des gesamten Zeitraumes 1950–2019 (blau) und im 24-Stunden-Mittel vor den 271 Sturmebben(orange). Außerdem dargestellt ist das 5.Perzentil des effektiven Windes der beiden Datensätze.....	25
Abbildung 6-5 Links: Mittlere Verteilung des effektiven Windes aus der LAMB-Wetterlagenklassifikation projiziert auf 142° eingeteilt in 10 m/s Klassen, ermittelt aus Tagesmitteln des ERA5 Luftdrucks auf Meeresniveau für den gesamten untersuchten Zeitraum von 1950 bis 2019. Rechts: Mittlere Verteilung des effektiven Windes aus der LAMB-Wetterlagenklassifikation projiziert auf 142° eingeteilt in 10 m/s Klassen 24 Stunden vor den Sturmebben am Pegel Cuxhaven (Tnw unter 0,55. Perzentil aller Tnw) zwischen 1950 und 2019.....	25
Abbildung 6-6 Verteilung der LAMB Wetterlagen aus ERA5 in den 48 Stunden vor dem Tnw. Die gepunktete Linie kennzeichnet die mittlere Häufigkeit der jeweiligen Wetterlage im Zeitraum 1950–2019.....	26
Abbildung 6-7 Verteilung der LAMB Sturmklasse aus ERA5 in den 48 Stunden vor dem Tnw. Die gepunktete Linie kennzeichnet die mittlere Häufigkeit der jeweiligen Größe im Zeitraum 1950–2019.	27
Abbildung 6-8 Zeitreihen des Effektiver Windes [m/s] ermittelt aus U- und V-Komponenten der LAMB Wetterlagenklassifikation aus ERA5 projiziert auf 142° 48 Stunden vor Sturmebben.	28
Abbildung 7-1 Mittlerer monatlicher Abfluss Neu Darchau in [m ³ /s] 1926–2015 (basierend auf BfG (2015)).	29
Abbildung 7-2 Mittlerer jährlicher Abfluss Neu Darchau in [m ³ /s] 1952–2013 (DGJ 2013).....	29
Abbildung 7-3 Mittlerer Abfluss Neu Darchau in [m ³ /s] 1987–2019 (Gewässerkundliche Jahre vom 01.11. bis 31.10.) (Weilbeer et al. 2021).	30
Abbildung 7-4 Jährliche Entwicklung der Tidewasserstände in Cuxhaven zwischen 1843 und 2019 mit Trendangaben in cm pro Dekade (Darstellung: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie; Datenquelle: WSA Cuxhaven und HPA Hamburg).....	31
Abbildung 7-5 Entwicklung des MThw, MThb und MTnw an den Pegeln St. Pauli und Cuxhaven zwischen 1880 und 2020 (Boehlich und Strotmann 2019).	32
Abbildung 7-6 Niedrigstes Tnw (NTnw) (0. Perzentil) des jeweiligen Jahres bei Cuxhaven und St. Pauli.	32
Abbildung 7-7 Perzentile des Tnw der jeweiligen Jahre bei Cuxhaven und St. Pauli: 50. Perzentil: blau-St. Pauli , dunkelblau- Cuxhaven; 0,55. Perzentil (niedrigstes Tnw des jeweiligen Jahres): gelb - St. Pauli , grün: Cuxhaven.....	33

Abbildung 7-8 Differenzen der Tnw Perzentile der jeweiligen Jahre St. Pauli - Cuxhaven: 50. Perzentil: blau; 0,55. Perzentil: grün.	34
Abbildung 9-1 Sturmeebbe 2018: NTnw entlang der Tideelbe bei gemessenem Referenzabfluss (schwarz) und variiertem Abfluss bei Neu Darchau.	38
Abbildung 9-2 Sturmeebbe 2018: Änderung des NTnw entlang der Tideelbe relativ zum Referenzabfluss (600-700 m ³ /s) bei variiertem Abfluss.	39
Abbildung 9-3 Sturmeebbe 2018: NTnw am Pegel St. Pauli bei verschiedenen Abflussszenarien bei Referenzmeeresspiegel (lila) sowie einem Meeresspiegelanstieg von 30 (blau) und 110 cm (gelb). ..	40
Abbildung 9-4 Sturmeebbe 2018: Änderung des NTnw am Pegel St. Pauli bei verschiedenen Abflussszenarien bei Referenzmeeresspiegel (lila) sowie einem Meeresspiegelanstieg von 30 (blau) und 110 cm (gelb), für Referenzmeeresspiegel abgeschätzt mittels zweier Regressionsgeraden.	40
Abbildung 9-5 Sturmeebbe 2018: Thb der niedrigsten Tide am Pegel St. Pauli bei verschiedenen Abflussszenarien bei Referenzmeeresspiegel (lila) sowie einem Meeresspiegelanstieg von 30 (blau) und 110 cm (gelb).	41
Abbildung 9-6 Sturmeebbe 2018: NTnw entlang der Tideelbe ohne SLR (schwarz) und bei verschiedenen SLR-Szenarien mit Referenzabfluss.	42
Abbildung 9-7 Sturmeebbe 2018: Änderung des niedrigstes Tnw entlang der Tideelbe zum Referenzzustand ohne SLR bei verschiedenen SLR-Szenarien mit Referenzabfluss.	42
Abbildung 9-8 Sturmeebbe 2018: NTnw am Pegel St. Pauli bei verschiedenen Meeresspiegelanstiegsszenarien bei Referenzabfluss (lila) sowie bei einem Abfluss von 0 (blau) und 2000 m ³ /s (gelb).	43
Abbildung 9-9 Sturmeebbe 2018: Änderung des NTnw am Pegel St. Pauli bei verschiedenen Meeresspiegelanstiegsszenarien bei Referenzabfluss (lila) sowie bei einem Abfluss von 0 (blau) und 2000 m ³ /s (gelb).	43
Abbildung 9-10 Sturmeebbe 2018: Thb der niedrigsten Tide am Pegel St. Pauli bei verschiedenen Meeresspiegelanstiegsszenarien bei Referenzabfluss (lila) sowie bei einem Abfluss von 0 (blau) und 2000 m ³ /s (gelb).	44
Abbildung 9-11 Sturmeebbe 2018: NTnw entlang der Tideelbe ohne SLR (schwarz), und bei verschiedenen SLR- und Wattwachstumsszenarien.	44
Abbildung 9-12 Sturmeebbe 2018: Änderung des NTnw entlang der Tideelbe zum Referenzzustand bei verschiedenen SLR- und Wattwachstumsszenarien.	45
Abbildung 9-13 Sturmeebbe 2018: NTnw am Pegel St. Pauli bei verschiedenen Meeresspiegelanstiegsszenarien mit Referenztopographie (lila), mit vollständigem Wattwachstum in der Deutschen Bucht und Elbemündung (blau) und mit vollständigem Wattwachstum in der Deutschen Bucht und der gesamten Tideelbe (gelb).	46
Abbildung 9-14 Sturmeebbe 2018: Änderung des NTnw am Pegel St. Pauli relativ zum SLR bei verschiedenen Meeresspiegelanstiegsszenarien bei Referenztopographie (lila), mit vollständigem Wattwachstum in der Deutschen Bucht und Elbemündung (blau) und mit vollständigem Wattwachstum in der Deutschen Bucht und der gesamten Tideelbe (gelb).	46

Abbildung 9-15 Sturmeebbe 2018: Thb der niedrigsten Tide der Sturmeebbe 2018 am Pegel St. Pauli bei Referenztopographie (lila), mit vollständigem Wattwachstum in der Deutschen Bucht und Elbemündung (blau) und mit vollständigem Wattwachstum in der Deutschen Bucht und der gesamten Tideelbe (gelb).....	47
Abbildung 9-16 Sturmeebbe 1987: NTnw der Sturmeebbe 1987 entlang der Tideelbe: grün: Simulationsergebnis bei gemessenem Abfluss (ca. 1600 m ³ /s), blau: Simulationsergebnis bei einem Abfluss von 400 m ³ /s, grau: Simulationsergebnis bei einem Abfluss von 400 m ³ /s, schwarze Marker: Messung.	48
Abbildung 9-17 Sturmeebbe 1987: Differenz des NTnw der Sturmeebbe 1987 entlang der Tideelbe zum Szenario mit gemessenem Abfluss (1600m ³ /s): blau: Simulationsergebnis bei einem Abfluss von 400 m ³ /s, grau: Simulationsergebnis bei einem Abfluss von 200 m ³ /s.	49
Abbildung 13-1 Sturmeebbe 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel Helgoland, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot).....	61
Abbildung 13-2 Sturmeebbe 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel Bake Alpha, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot).	61
Abbildung 13-3 Sturmeebbe 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel Brunsbüttel, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot).	62
Abbildung 13-4 Sturmeebbe 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel Glücksstadt, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot).	62
Abbildung 13-5 Sturmeebbe 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel Bunthaus, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot).....	63
Abbildung 13-6 Sturmeebbe 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel Zollenspieker, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot).	63
Abbildung 13-7 Sturmeebbe 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel Geesthacht UP, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot)	64

13 Literatur

- BAW (2004) Mathematical Model UnTRIM Validation Document. BAW. https://wiki.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/Simulationsverfahren_Kueste_validation_document-untrim-2004.pdf
- BAW (2020) BAWBildatlas. Sturmflutereignisse in der Tideelbe; Eine Sensitivitätsstudie zu Meeresspiegelanstieg und Topographieänderung der Wattflächen. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107318>. Zugegriffen: 11. Februar 2022
- Becherer J, Hofstede J, Gräwe U, Purkiani K, Schulz E, Burchard H (2018) The Wadden Sea in transition - consequences of sea level rise. *Ocean Dynamics* 68:131–151. doi:10.1007/s10236-017-1117-5
- Benninghoff M, Winter C (2019) Recent morphologic evolution of the German Wadden Sea. *Scientific reports* 9:9293. doi:10.1038/s41598-019-45683-1
- Bissolli P, Dittmann E (2001): The objective weather type classification of the German Weather Service and its possibilities of application to environmental and meteorological investigations. – *Meteorol. Z.* 10, 253–260.
- BfG (2015) DGJ 2015; Elbegebiet, Teil III. http://dgi-daten.bafg.de/Elbe/Neu%20Darchau/5930010_WQ.pdf
- Boehlich MJ, Strotmann T (2019) Das Elbeästuar. *Die Küste* 87:319–341. doi:10.18171/1.087106
- Bollmeyer C, Keller JD, Ohlwein C, Wahl S, Crewell S, Friederichs P, Hense A, Keune J, Kneifel S, Pscheidt I, Redl S, Steinke S (2015) Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 141:1–15. doi:10.1002/qj.2486
- Brienen S, Walter A, Brendel C, Fleischer C, Ganske A, Haller M, Helms M, Höpp S, Jensen C, Jochumsen K, Möller J, Krähenmann S, Nilson E, Rauthe M, Razafimaharo C, Rudolph E, Rybka H, Schade N, Stanley K (2020) Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre; Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerk. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107364>
- BSH (2020) Sturmfluten. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/sturmfluten_node.html. Zugegriffen: 12. Mai 2020
- Bundesanstalt für Wasserbau (2018) BAWBildatlas. Eine Sensitivitätsstudie vor dem Hintergrund des Klimawandels. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105573>. Zugegriffen: 13. Mai 2020
- Casulli V (2008) A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 60:391–408. doi:10.1002/fld.1896
- DAS Basisdienst Klima und Wasser (2021) WS-Klimaportal. BfG. <https://ws-klimaportal.bafg.de>. Zugegriffen: 14. Februar 2022
- Demuzere M et al. (2009). An analysis of present and future ECHAM5 pressure fields using a classification of circulation patterns. *International Journal of Climatology* 29(12): 1796-1810.
- DGJ (2013) Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch; Elbegebiet Teil III Untere Elbe ab der Havelmündung. Freie und Hansestadt Hamburg; Hamburg Port Authority
- DIN 4049-3 : 1994-10 (1994) Hydrologie Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie, Berlin
- Dissanayake DMPK, Ranasinghe R, Roelvink JA (2012) The morphological response of large tidal inlet/basin systems to relative sea level rise. *Climatic Change* 113:253–276. doi:10.1007/s10584-012-0402-z
- Donat MG et al. (2009). Examination of wind storms over Central Europe with respect to circulation weather types and NAO phases. *International Journal of Climatology*: 29(12): 1796-1810.
- Donat MG et al. (2010). European storminess and associated circulation weather types: future changes deduced from a multi-model ensemble of GCM simulations. *Climate Research* 42(1): 27-43.
- EAU (2021) Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" Häfen und Wasserstraßen EAU 2020. Ernst & Sohn, Berlin
- ECMWF (2021): "ERA5", <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5> (letzter Zugriff 08.12.2021)
- Friedrichs CT (2011) 3.06-Tidal Flat Morphodynamics; A Synthesis. Virginia Institute of Marine Science: Gloucester Point, VA, USA:137–170. doi:10.1016/B978-0-12-374711-2.00307-7
- Ganske A et al. (2018): Identification of extreme storm surges with high-impact potential along the German North Sea coastline. *Ocean Dynamics*, 68(10): 1371-1382. DOI: 10.1007/s10236-018-1190-4

- Gerber M, Ganske A, Müller-Navarra SH, Rosenhagen G (2016) Categorisation of Meteorological Conditions for Storm Tide Episodes in the German Bight. *metz* 25:447–462. doi:10.1127/metz/2016/0660
- Gönnert G, Dube SK, Murthy T, Siefert W (Hrsg) (2001) *Global Storm Surges*; Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee. Bundesanst. für Wasserbau (BAW), Karlsruhe
- Gurumurthy P, Orton PM, Talke SA, Georgas N, Booth JF (2019) Mechanics and Historical Evolution of Sea Level Blowouts in New York Harbor. *JMSE* 7:160. doi:10.3390/jmse7050160
- Hagen R, Freund J, Plüß A, Ihde R (2019) Validierungsdokument EasyGSH-DB Nordseemodell. Teil. UnTRIM2 – SediMorph – UnK
- Herrera-Lormendez P et al. (2021). Synoptic circulation changes over Central Europe from 1900 to 2100: Reanalyses and Coupled Model Intercomparison Project phase 6. *International Journal of Climatology*. Zur Veröffentlichung angenommen.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabatero J, Thépaut J N (2020): The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- Hodges K I, et al. (2006). Storm Tracks and Climate Change. *Journal Of Climate* 19(15): 3518-3543.
- HPA (2018) *Gewässerkundliche Information Pegel Hamburg-St. Pauli; Gewässerkundliches Jahr 2018*
- HPA (2020) *Gewässerkundliche Information; Gewässerkundliches Jahr 2020 Pegel Hamburg-St. Pauli*
- Huguenin M F et al. (2020). Lack of Change in the Projected Frequency and Persistence of Atmospheric Circulation Types Over Central Europe. *Geophysical Research Letters* 47(9).
- IKSE (2005) Die Elbe und ihr Einzugsgebiet; Ein geographisch-hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Überblick. https://www.ikse-mkol.org/fileadmin/media/user_upload/D/06_Publikationen/07_Verschiedenes/2005_IKSE-Elbe-und-ihr-Einzugsgebiet.pdf
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*
- IPCC (2021) *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate*
- Jenkinson A F and Collison F K (1977): An initial climatology of gales over the North Sea, *Synoptic Climatology Branch Memorandum*, 62, 18 pp., UK Met Office, Bracknell.
- Jensen (2019): *Wetterlagen über der Nordsee., Bericht zum Meilenstein M108b-2 des SP-108 im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks.*
- Jensen J, Mudersbach C, Müller-Navarra SH, Bork I, Koziar C, Renner V (2006) Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. *Die Küste* 71:123–167
- Jordan C, Visscher J, Schlurmann T (2021) Projected Responses of Tidal Dynamics in the North Sea to Sea-Level Rise and Morphological Changes in the Wadden Sea. *Front. Mar. Sci.* 8:40171. doi:10.3389/fmars.2021.685758
- Khojasteh D, Glamore W, Heimhuber V, Felder S (2021) Sea level rise impacts on estuarine dynamics; A review. *The Science of the total environment* 780:146470. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.146470
- KLIWAS (2015) *KLIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland; Abschlussbericht des BMVI Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen des Forschungsprogramms KLIWAS.* <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105424>
- Koziar C, Renner V (2005): Numerische Berechnung physikalisch konsistenter Wetterlagen mit Atmosphärenmodellen. Abschlussbericht KFKI-Projekt MUSE, DWD, Offenbach.
- Kremp C, Rudolph E, Sehili A (2012) OPTEL-C: Entwicklung eines operationellen Tidemodells der Elbe sowie einer Modellkopplung mit dem BSH-Vorhersagemodell der Nordsee. *Die Küste* 79:141–168
- Kučerová M et al. (2017). Trends in frequency and persistence of atmospheric circulation types over Europe derived from a multitude of classifications. *International Journal of Climatology* 37(5): 2502-2521.
- Lamb H H (1950): Types and spells of weather around the year in the British Isles: annual trends, seasonal structure of the year, singularities, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 76(330), 393-429. <https://doi.org/10.1002/qj.49707633005> (letzter Zugriff: 21.11.2019)
- Lang G (2003) *Analyse von HN-Modell-Ergebnissen im Tidegebiet. Bundesanstalt für Wasserbau.* https://wiki.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pre_postpr/pdf/analyse_von_hn_modellergebnisse_im_tidegebiet.pdf

- Löwe P (Ed.) (2005): Nordseezustand 2003, Berichte des BSH, Nr. 38, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock, 220 pp. <https://www.bsh.de/download/Berichte-des-BSH-38.pdf> (letzter Zugriff: 15.10.2019)
- Löwe P (Ed.) (2009), System Nordsee – Zustand 2005 im Kontext langzeitlicher Entwicklungen. Berichte des BSH, Nr. 44, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock. <https://www.bsh.de/download/Berichte-des-BSH-44.pdf>
- Löwe P, H. Klein, S. Weigelt-Krenz (Ed.) (2013): System Nordsee – 2006 & 2007: Zustand und Entwicklungen. Berichte des BSH, Nr. 49, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock. <https://www.bsh.de/download/Berichte-des-BSH-49.pdf>
- LSBG, HPA (2013) Richtlinie: Berechnungsgrundsätze für Hochwasserschutzwände, Flutschutzanlagen und Uferbauwerke im Bereich der Tideelbe der Freien und Hansestadt Hamburg; BHFU. LSBG; HPA
- Milbradt P, Jennifer Valerius, Zeiler M (2015) Das Funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie. *Die Küste* 83:19–38
- Plavcová E, Kyselý J (2013). Projected evolution of circulation types and their temperatures over Central Europe in climate models. *Theoretical and Applied Climatology* 114(3-4): 625-634.
- Polvani L., Barnes E A (2013). Response of the Midlatitude Jets, and of Their Variability, to Increased Greenhouse Gases in the CMIP5 Models. *Journal Of Climate* 26(18): 7117-7135.
- Rasquin C, Seiffert R, Wachler B, Winkel N (2020) The significance of coastal bathymetry representation for modelling the tidal response to mean sea level rise in the German Bight. *Ocean Sci.* 16:31–44. doi:10.5194/os-16-31-2020
- Riediger U, Gratzki A (2014). Future weather types and their influence on mean and extreme climate indices for precipitation and temperature in Central Europe. *Meteorologische Zeitschrift* 23(3): 231-252.
- Schneider T, Mbengue C (2013). Storm Track Shifts under Climate Change: What Can Be Learned from Large-Scale Dry Dynamics. *Journal Of Climate* 26(24): 9923-9930.
- Smith SD, Banke EG (1975) Variation of the surface drag coefficient with wind speed. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 101:656–673
- Sehili A, Lang G, Lippert C (2014) High-resolution subgrid models; Background, grid generation, and implementation. *Ocean Dynamics* 64:519–535. doi:10.1007/s10236-014-0693-x
- Siefert W (1998) Tiden und Sturmfluten in der Elbe und ihren Nebenflüssen Die Entwicklung von 1950 bis 1997 und ihre Ursachen. *Die Küste* 60:1–115
- SMHI (2017) Deliverable D2.7; HARMONIE reanalysis report of results and dataset. SMHI. <http://uerra.eu/component/dpattachments/?task=attachment.download&id=296>. Zugegriffen: 2021
- SMHI (2018) Documentation of the RRA system: UERRA. SMHI. https://datastore.copernicus-climate.eu/documents/uerra/D322_Lot1.1.1.2_Documentation_of_the_RRA_system_UERRA_v2.pdf. Zugegriffen: 26. Juli 2021
- Stryhal J, Huth R (2018). Trends in winter circulation over the British Isles and central Europe in twenty-first century projections by 25 CMIP5 GCMs. *CLIMATE DYNAMICS* 52(1-2): 1063-1075.
- van der Wegen M (2013) Numerical modeling of the impact of sea level rise on tidal basin morphodynamics. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 118:447–460. doi:10.1002/jgrf.20034
- Wachler B, Seiffert R, Rasquin C, Kösters F (2020) Tidal response to sea level rise and bathymetric changes in the German Wadden Sea. *Ocean Dynamics* 70:1033–1052. doi:10.1007/s10236-020-01383-3
- Weilbeer H, Winterscheid A, Strotmann T, Entelmann I, Shaikh S, Vaessen B (2021) Analyse der hydrologischen und morphologischen Entwicklungen in der Tideelbe für den Zeitraum 2013-2018. *Die Küste*. doi:10.18171/1.089104
- Wu Y et al. (2010). Changes in storm tracks and energy transports in a warmer climate simulated by the GFDL CM2.1 model. *CLIMATE DYNAMICS* 37(1-2): 53-72.
- Zappa G, Shepherd T G (2017). Storylines of Atmospheric Circulation Change for European Regional Climate Impact Assessment. *Journal Of Climate* 30(16): 6561-6577.
- Zijl F, Verlaan M, Gerritsen H (2013) Improved water-level forecasting for the Northwest European Shelf and North Sea through direct modelling of tide, surge and non-linear interaction. *Ocean Dynamics* 63:823–847. doi:10.1007/s10236-013-0624-2
- Zijl F, Sumihar J, Verlaan M (2015) Application of data assimilation for improved operational water level forecasting on the northwest European shelf and North Sea. *Ocean Dynamics* 65:1699–1716. doi:10.1007/s10236-015-0898-7

14 Anhang

14.1 Modellvalidierung - weitere Pegel

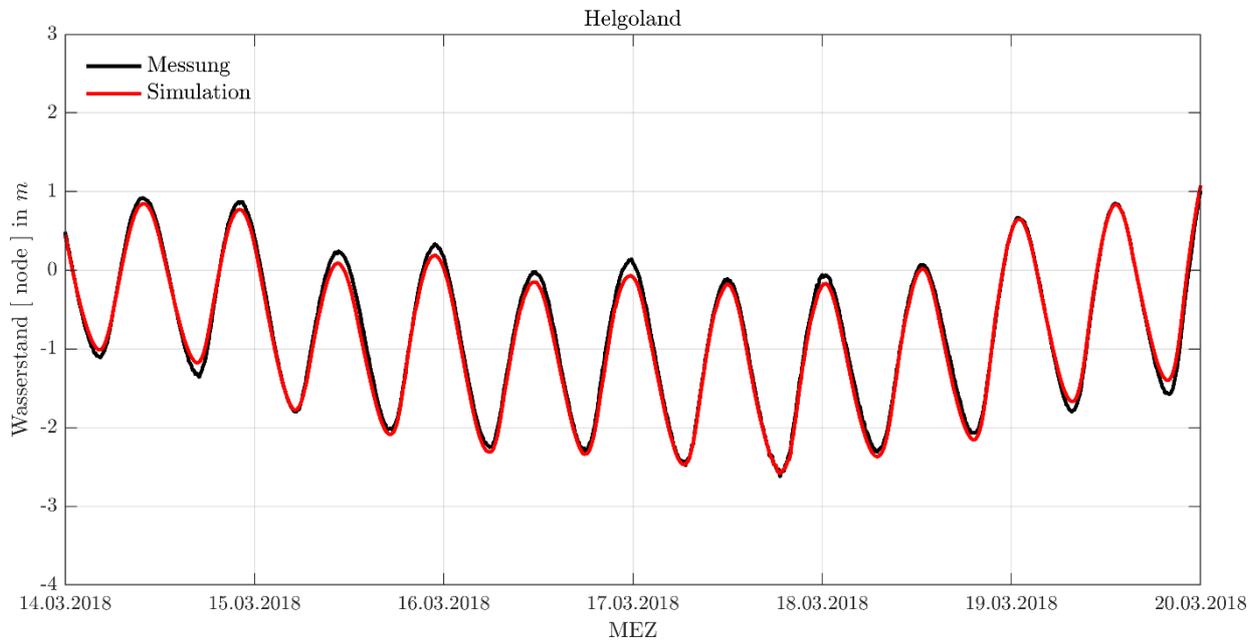


Abbildung 14-1 | Sturmebbe 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel Helgoland, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot).

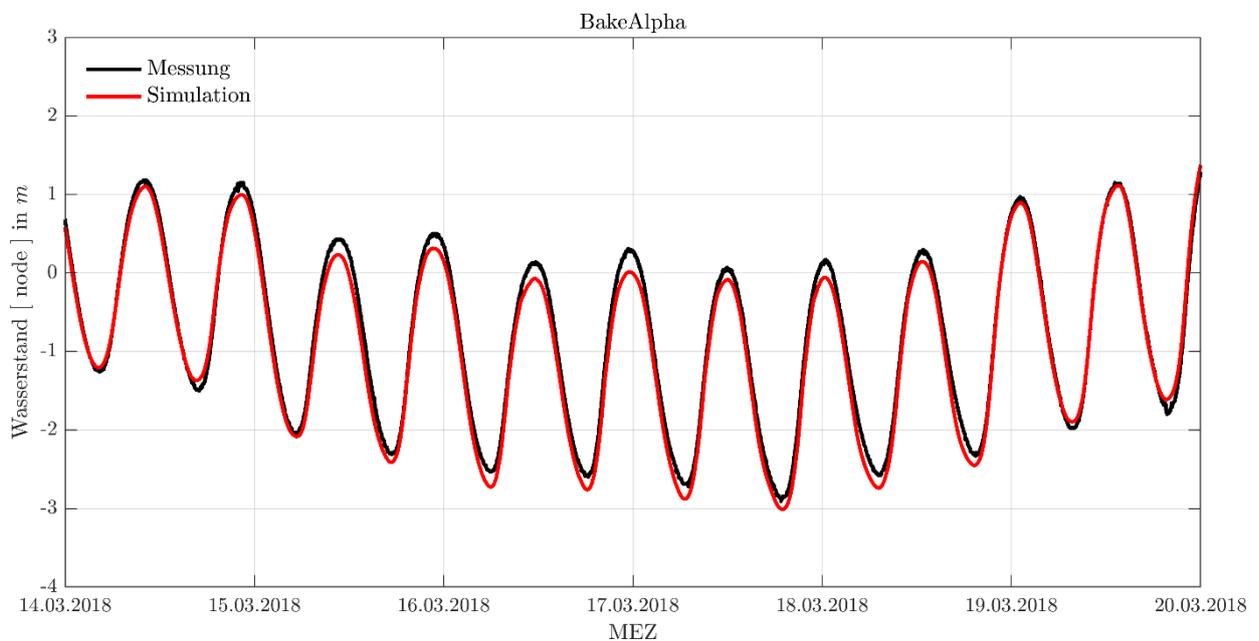


Abbildung 14-2 | Sturmebbe 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel Bake Alpha, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot).

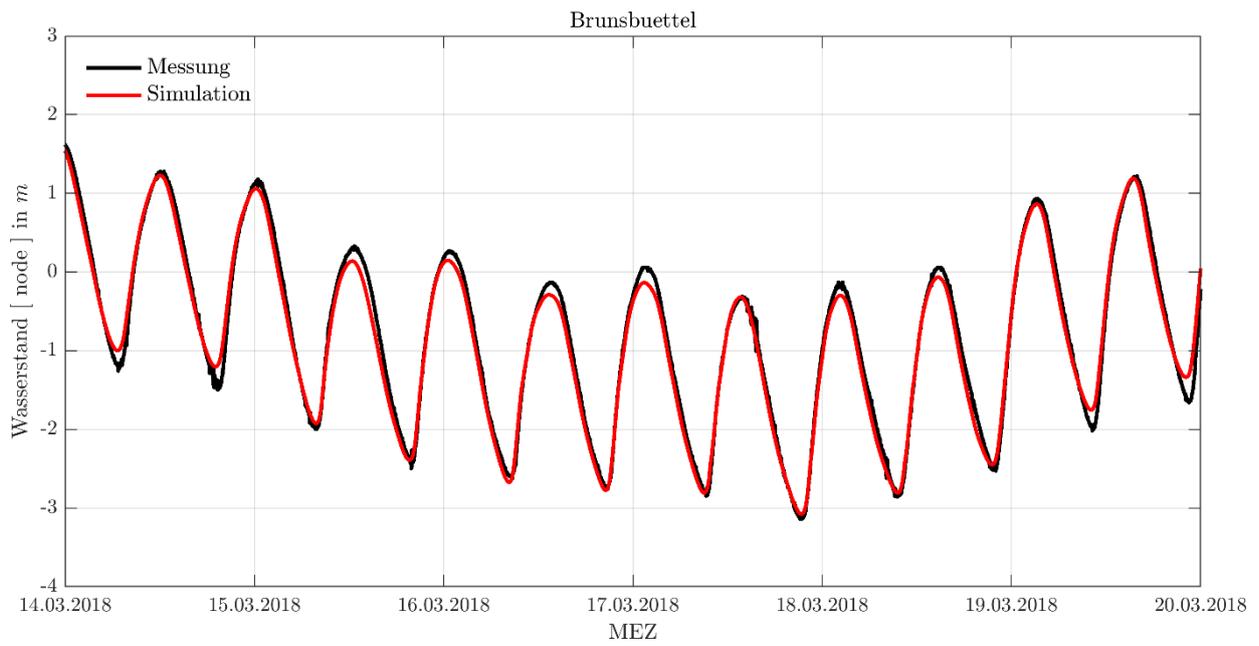


Abbildung 14-3 | Sturmeebe 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel Brunsbüttel, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot).

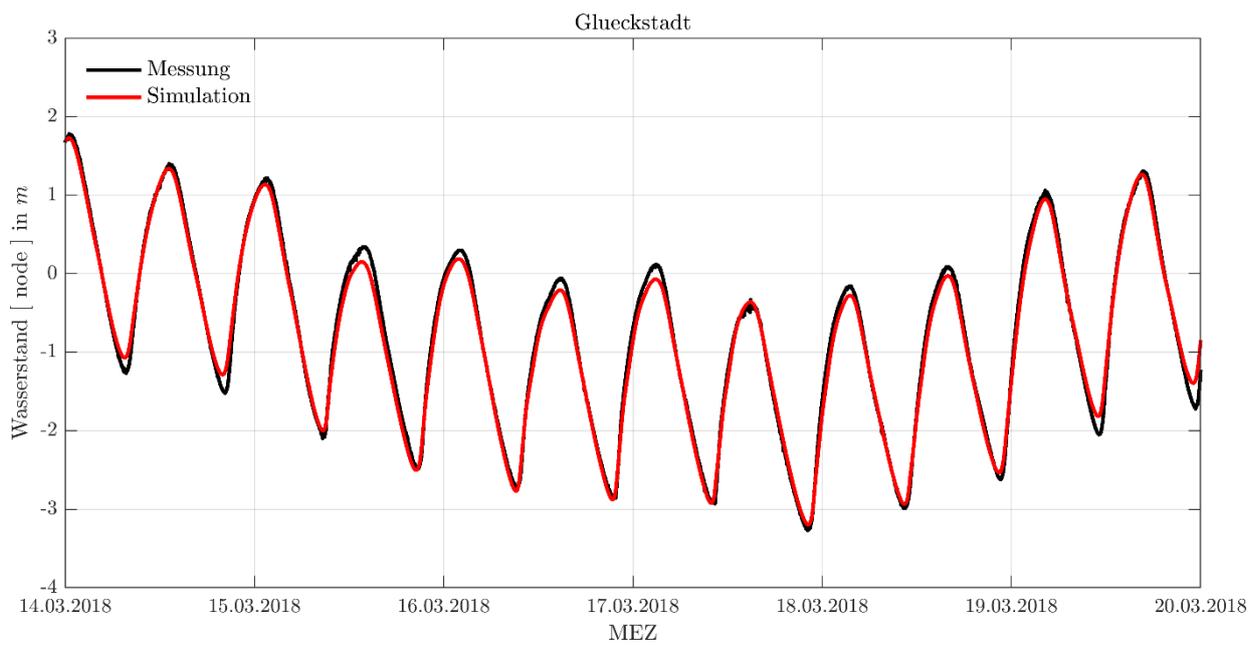


Abbildung 14-4 | Sturmeebe 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel Glücksstadt, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot).

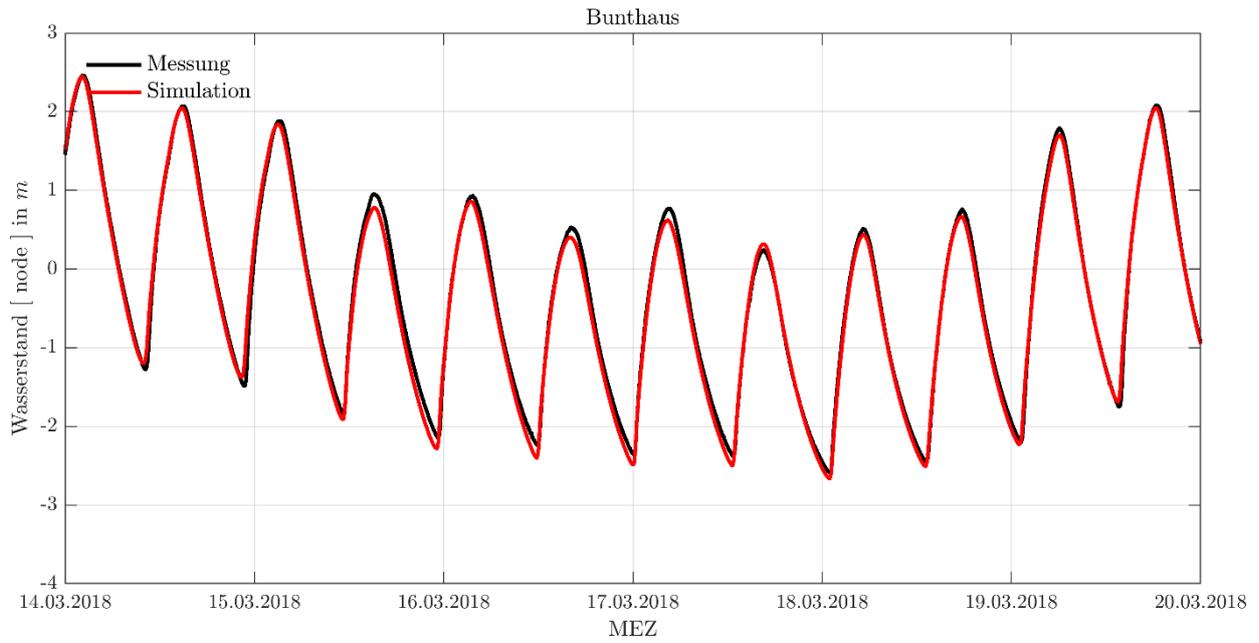


Abbildung 14-5 | Sturmflut 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel Bunthaus, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot).

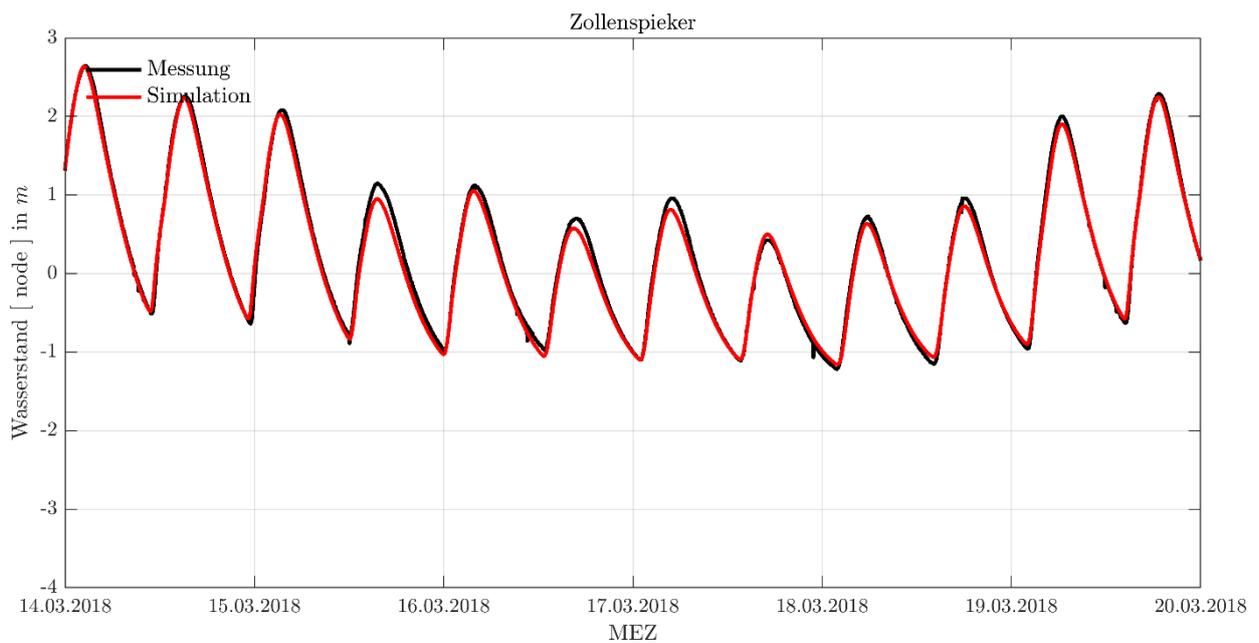


Abbildung 14-6 | Sturmflut 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel Zollenspieker, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot).

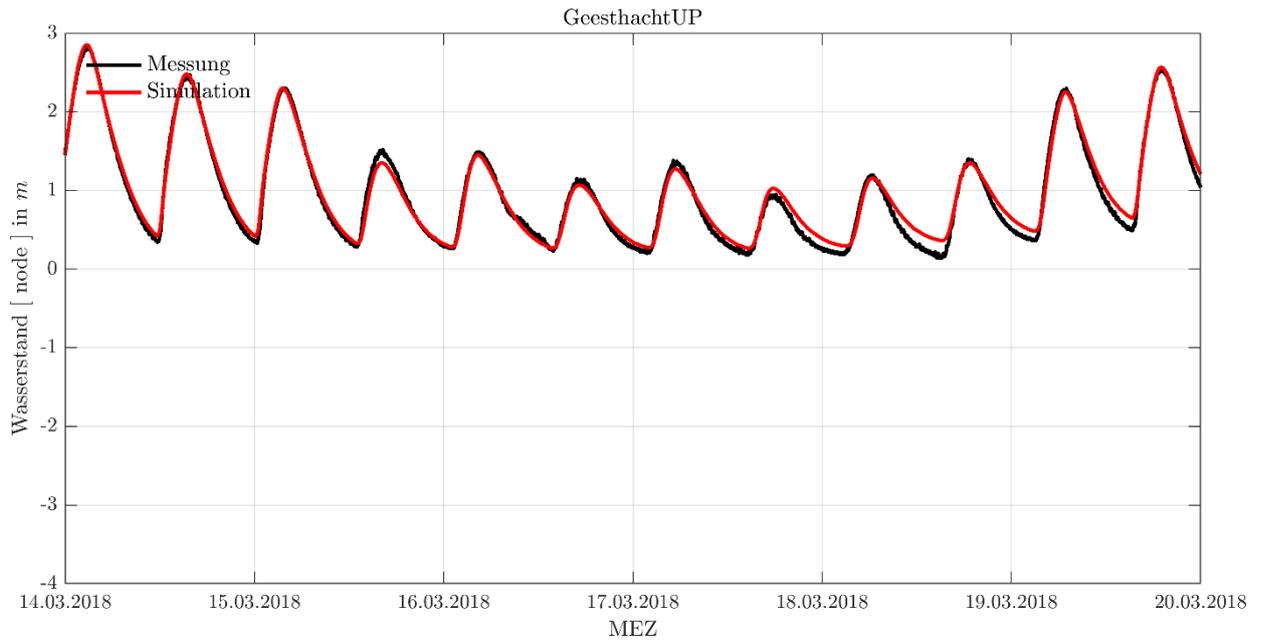


Abbildung 14-7 | Sturmeebe 2018, Wasserstandsentwicklung am Pegel Geesthacht UP, Messung (schwarz) und Simulationsergebnis (rot)

15 Abkürzungsverzeichnis

A	Antizyklonal
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BWaStr	Bundeswasserstraßen
C	Zyklonal
DeBu	Deutsche Bucht
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWD	Deutscher Wetterdienst
G	„Gale“, Sturm
HHQ	Höchster jemals gemessener Abfluss
HN Modelle	Hydrodynamisch-numerische Modelle
HQ	Höchster Durchfluss (Gewässer)
HThw	höchstes Tidehochwasser gleichartiger Zeitabschnitte einer bestimmten Zeitspanne
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change – zwischenstaatliches Expertengremium für Klimawandel, auch Weltklimarat
KFKI	Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen
KLIWAS	BMVI-Forschungsprogramm "Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen"
MHQ	Höchster Jahresabfluss, gemittelt über mehrere Jahre (hydrologischer Hochwasserkennwert)
m ü. NN	Meter über Normalnull
MNQ	Mittlerer Niedrigwasser Abfluss
MQ	Mittlerer Abfluss
MTnw	mittleres Tideniedrigwasser
NE	Nord-Ost
NTnw	niedrigstes Tideniedrigwasser in bestimmtem Zeitraum
NNTnw	niedrigstes bekanntes Tideniedrigwasser
NUL	„No Gale“, kein Sturm
NQ	niedrigster Durchfluss (Gewässer)
NW	Nord-West
ProWaS	Klimawandel-Projektionsdienst für Wasserstraßen und Schifffahrt (Projektionsdienst des BMVI); Pilotprojekt zum DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“
Q	Abfluss
SE	Süd-Ost
SG	„Severe Gale“, starker Sturm
SLR	Meeresspiegelanstieg
SW	Süd-West

Thw	Tidehochwasser
Tnw	Tideniedrigwasser
VSG	„Very Severe Gale“, sehr starker Sturm
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes