



Wirkungsanalyse Sturm/Sturmfluten

Schade, N.H. | Jensen, C. | Schaffer, L. | Ditzinger, G.X. | Möller, J. | Kruschke, T.

Zitiervorschlag

Schade NH, Jensen C, Schaffer L, Ditzinger GX, Möller J, Kruschke T (2023) Wirkungsanalyse Sturm/Sturmfluten. Aus der Berichtsreihe: „Sonderanalysen und methodische Entwicklungen“. Berichtsreihe des Schwerpunktthemas 101 (SPT-101) im Themenfeld 1 des BMDV-Expertennetzwerks. DOI: <https://doi.bsh.de/10.57802/44q8-4h46>

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):

Nils H. Schade, Corinna Jensen, Laura Schaffer, Gabriel X. Ditzinger, Jens Möller, Tim Kruschke

Redaktionsschluss: 10/2023

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. Fischmarkt Hamburg-Altona bei Sturmflut (BSH)
5. Zollenspieker Fähranleger (Hamburg) bei Sturmflut (BSH)
6. Fischauktionshalle Hamburg-Altona bei Sturmflut (BSH)

DOI: <https://doi.bsh.de/10.57802/44q8-4h46>

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	1
2	Hintergrund und Ziele	3
2.1	Sturmfluten	4
2.2	Erkenntnisse aus Phase I	4
3	Daten und Methoden	6
3.1	Messdaten Wasserstand	6
3.2	Atmosphärische Reanalysen	6
3.2.1	ERA5 Reanalyse	6
3.2.2	NCEP/NCAR R1.....	6
3.3	Klimamodellsimulationen.....	7
3.4	Wetterlagen-Klassifikation nach Lamb.....	8
4	Klimatologische Analyse der Lamb-Wetterlagen in der Gegenwart	10
5	Klimawandelbedingte Änderungen wichtiger Einflussfaktoren für Sturmfluten.....	13
5.1	Zukünftige Änderungen basierend auf Lamb-Wetterlagen und Sturmindizes	13
5.2	Meeresspiegelanstieg.....	14
6	Zusammenfassung.....	17
7	Ausblick.....	18
7.1	Wetterlagen und Meeresspiegel.....	18
7.2	Alternative Methodische Ansätze	18
7.2.1	Sturmflutrisiko Index	18
7.2.2	Räumliche Interpolation von Extremwasserständen	20
	Literatur.....	23
	Anhang	28
	A.1 Verwendete CMIP6 Datensätze	28
	A.2 Änderungen der Wetterlagen im CMIP6-Ensemble.....	29
	Abkürzungsverzeichnis	30
	Abbildungsverzeichnis.....	31

1 Kurzfassung

Sturmfluten in der Deutschen Bucht werden von westlichen und zyklonalen Wetterlagen, Sturm und einem effektiven Wind aus West-Nordwest begünstigt.

Gemäß den Simulationsergebnissen eines Multimodell-Ensembles für die sechste Phase des Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) werden die Änderungen dieser meteorologischen Bedingungen im SSP3-7.0 und SSP5-8.5 Szenario zum Ende des 21. Jahrhunderts zu einer stärkeren Herausforderung für den Hochwasserschutz, die Entwässerung des Hinterlandes, die Bemessung von Küstenbauwerken und die Seeschifffahrt führen.

Zusätzlich wird der Meeresspiegelanstieg zu einer signifikanten Erhöhung der Wasserstände an den Küsten führen.

In der Deutschen Bucht und ihren tidebeeinflussten Flussmündungen führt starker auflandiger Wind zu einer deutlichen Erhöhung des Wasserstandes. Solche Sturmfluten können die Befahrbarkeit der Wasserstraßen einschränken, und die Standfestigkeit von Uferbauwerken gefährden. Durch fehlende Abflussmöglichkeiten kann es zu Hochwasser und Überschwemmungen im Binnenbereich kommen, wodurch wiederum der Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur an der Küste betroffen sein können. Im vorliegenden Bericht wird der Einfluss des Klimawandels auf Sturmfluten durch eine mögliche Änderung der meteorologischen Verhältnisse (Wetterlagen, Sturm und effektiver Wind) und des Meeresspiegelanstiegs analysiert und diskutiert.

Diese Untersuchung zeigt, dass über der Nordsee ausschließlich westliche und zyklonale Wetterlagen während historischer Sturmfluten (1951-2022) am Pegel Cuxhaven auftraten und damit begünstigend für hohe Wasserstände in der Deutschen Bucht und der Tideelbe sind. Wie der Begriff „Sturmflut“ bereits impliziert, müssen auch überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeiten auftreten. So wird gezeigt, dass selbst der geostrophische Wind, welcher die großskalige Zirkulation über der Nordsee beschreibt, während Sturmfluten am Pegel Cuxhaven in den meisten Fällen im Bereich der stärksten 10% der jemals diagnostizierten Werte liegt. Für Sturmfluten in der Tideelbe wird deswegen der effektive geostrophische Wind aus West-Nordwest (WNW; 295°) verwendet, welcher eine Kombination aus Windstärke und sturmflutbegünstigender Windrichtung darstellt. Es wird gezeigt, dass dieser während Sturmfluten deutlich höher als im klimatologischen Mittel liegt.

Betrachtete CMIP6 Modellsimulationen zur Entwicklung der Wetterlagen und Sturmindizes im Klimawandel deuten darauf hin, dass sturmflutträchtige, westliche Wetterlagen unter Annahme des SSP3-7.0 bzw. SSP5-8.5 Szenario, also bei weiterhin stark fortschreitenden Treibhausgasemissionen, zum Ende des 21. Jahrhunderts häufiger auftreten werden. Auch Extremwerte (oberhalb des heutigen 95. Perzentils) der effektiven geostrophischen Windgeschwindigkeiten werden demnach vermehrt zu erwarten sein. Die Projektionen des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change 2023a) zur Geschwindigkeit des globalen mittleren Meeresspiegelanstieg unterscheiden sich je nach sozioökonomischem Entwicklungspfad und damit verbundenen Treibhausgasemissionen. Ein weiterhin steigender Meeresspiegel und damit auch höhere mittlere Wasserstände in der Deutschen Bucht als Ausgangslage für Sturmfluten sind jedoch praktisch sicher (Intergovernmental Panel on Climate Change 2022).

Nach den Erkenntnissen dieser Untersuchung wird es somit im fortschreitenden Klimawandel zu wachsenden Herausforderungen für Hochwasserschutz, die Entwässerung des Hinterlandes, die Bemessung von Küstenbauwerken und die Seeschifffahrt durch Sturmfluten in der Deutschen Bucht und der Tideelbe kommen.

2 Hintergrund und Ziele

Sturmfluten führen in der Deutschen Bucht und den angrenzenden tidebeeinflussten Flussmündungsgebieten (Ästuaren) zu einer deutlichen Erhöhung des Wasserstands. Diese erhöhten Wasserstände, sowie die verursachenden hohen Windgeschwindigkeiten, können zu Einschränkungen des Schiffsverkehrs auf den in den Ästuaren verlaufenden Bundeswasserstraßen kommen. Ferner besteht die Gefahr, dass bei zeitgleich auftretenden heftigen Schauern oder langanhaltenden Niederschlägen die gefallenen Wassermengen im Binnenland nicht mehr hinreichend abgeführt werden können. So kann es zu Hochwasser und Überschwemmungen kommen, wodurch wiederum der Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur in den tieferliegenden Küstengebieten betroffen sein können (z.B. Buthe et al. 2015; Kew et al. 2013; Schade 2017).

In der hier beschriebenen Auswertung wird der Fokus auf die Deutsche Bucht 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. Im Folgenden werden die großräumigen meteorologischen Windbedingungen sowie der Meeresspiegelanstieg als wesentliche Einflussfaktoren während derartiger Ereignisse analysiert und diskutiert. Zur Charakterisierung der großskaligen Zirkulation werden die am BSH operationell analysierten Wetterlagen nach Lamb (1950) und daraus abgeleitete Indizes betrachtet. Alle Größen werden sowohl in beobachtungsnahen atmosphärischen Reanalysen (siehe Abschnitt 3.2) für die Vergangenheit, als auch in Klimasimulationen für die Zukunft (siehe Abschnitt 3.3) untersucht.

Diese Untersuchung gliedert sich ein in diverse existierende Studien zu potentiellen Änderungen der atmosphärischen Zirkulation und Windgeschwindigkeiten über (Mittel-)Europa. Herrera-Lormendez et al. (2022) konnte bereits zeigen, dass eine über Deutschland verschobenen Wetterlagen-Klassifizierung nach Jenkinson und Collison (1977), die der am BSH verwendeten Methode sehr ähnlich ist, die Häufigkeiten beobachteter Zirkulationsmuster gut reproduzieren und auch die interannuale Variabilität von Zirkulationsmustern und deren klimatologischen Frequenzen erfassen kann.

In verschiedenen Klimasimulationen für einen fortschreitenden menschlichen Einfluss auf das Klima zeigt sich eine Verschiebung der Strömungen, die verbunden sind mit einer Zunahme von westlichen Anströmungen über Zentraleuropa. Eine solche Entwicklung ist sowohl in den Projektionen der Globalmodelle (Donat et al. 2010; Huguenin et al. 2020), als auch in 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 (Demuzere et al. 2009; Stryhal and Huth 2019), sowie in den Regionalmodellen erkennbar (Riediger and Gratzki 2014). Eine solche Zunahme der westlichen Wetterlagen würde bedeuten, dass ein wesentlicher Einflussfaktor für Sturmfluten in der Deutschen Bucht in Zukunft häufiger gegeben sein wird.

Weitere Studien verwenden einen methodisch anderen Ansatz für die Identifikation von einzelnen Sturmtiefs und deren Zugbahn. Klimaänderungssignale aus derartigen extremereignisfokussierten Studien zu Frequenz und Intensität 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 (Barnes and Polvani 2013; Bengtsson et al. 2006; Harvey et al. 2020; Mbengue and Schneider 2013; Priestley and Catto 2022; Wu et al. 2011). Europa liegt am

„Ausgang“ des nordatlantischen „Storm Tracks“, 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 and Shepherd 2017). Im Mittel zeigt sich diese Zunahme auch in einem Multimodell-Ensemble von CMIP6-Simulationen, welches für den 6. Sachstandsbericht des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2022b) ausgewertet wurde. Gleichzeitig wird dabei aber sichtbar, dass verschiedene Modelle zu gegensätzlichen Ergebnissen kommen. Diese Unsicherheit begründet die Notwendigkeit, derartige Analysen auf Grundlage einer möglichst breiten Datenbasis durchzuführen.

Diese Untersuchung und der vorliegende Bericht ergänzen eine ähnliche Studie im BMDV-Expertenetzwerk (Jensen et al. 2022), die sich dem gegenteiligen Extrem widmete, den sog. Sturmebben, die ebenfalls von hoher Relevanz für die Seeschifffahrt und die Standsicherheit von Uferbauwerken sind.

2.1 Sturmfluten

Laut amtlicher Definition des BSH liegt an der deutschen Nordseeküste eine Sturmflut vor, wenn das *Mittlere Tidehochwasser* (MThw) um mindestens 1,5 m überschritten wird. Dabei spielt für die Sicherheit des Küstenschutzes und besonders für die Schiffbarkeit der Seeschifffahrtsstraßen nicht nur die absolute Höhe des Sturmflutwasserstands eine Rolle, sondern auch die Andauer. In der Vergangenheit wurden sogenannte Kettentiden beobachtet, bei denen mehrere Tidehochwasser über Sturmflutniveau erhöht waren (Jensen et al. 2011). In diesen Fällen waren die Wasserstände auch in der Ebbphase stark erhöht, so dass der Wasserstand während des Tideniedrigwassers nur gering abfiel und z.T. höher war als das Tidehochwasser bei geringen Windgeschwindigkeiten. Tritt ein höherer Wasserstand länger als im Normalfall auf, kann es passieren, dass die Entwässerung durch das natürliche Gefälle nicht mehr gegeben ist und im Ernstfall das Binnenwasser mit Pumpen geschöpft werden muss. Je nach Windrichtung, Windstärke und Ort kann es zudem zu einer Gefährdung der Uferbauwerke durch hohen Seegang kommen. Die vorliegende Untersuchung verwendet die oben genannte Definition einer Sturmflut und betrachtet in Beobachtungsdaten solche Ereignisse, wo das Kriterium von 1,5 m oberhalb des MThw am Pegel Cuxhaven (siehe Abschnitt 3.1) erfüllt war. Dabei wurde nicht differenziert, ob es sich um eine sog. Kettentide handelte oder nicht. Zwei aufeinanderfolgende Tidehochwasser, die beide das Sturmflutkriterium erfüllen werden in dieser Untersuchung als zwei Ereignisse betrachtet.

2.2 Erkenntnisse aus Phase I

Eine Untersuchung historischer Sturmfluten (Gerber et al. 2016) ergab, dass schwere Sturmfluten in Cuxhaven immer auch an der Niedersächsischen und der Schleswig-Holsteinischen Küste auflaufen. Deshalb bezogen sich auch die Untersuchungen in der ersten Phase des Expertennetzwerks (2016-2019) bereits auf den Pegel Cuxhaven. Eine ausführliche Beschreibung dieser Untersuchungen bieten Ganske (2019a, 2019b). Die zugrundeliegenden Simulationen wurden im Rahmen von KLIWAS¹, dem Vorläuferprogramm des Expertennetzwerks, erstellt. Basierend auf diesen Daten zeigten sich über der Nordsee keine signifikanten Änderungen der Windgeschwindigkeiten bis 2100. Es war allenfalls ein

¹ https://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/Home/homepage_node.html

leichter positiver Trend in der südöstlichen Nordsee zu erkennen, der aber bei den meisten Ergebnissen der Klimamodelle kleiner war als die jährliche und dekadische Variabilität. Bei den Windrichtungen zeigte sich ein leichter Anstieg der Häufigkeiten von westlichen Windrichtungen. Auch dieser Anstieg war insbesondere bei hohen Windgeschwindigkeiten in der gleichen Größenordnung wie die dekadische Variabilität, und somit nicht belastbar.

Erste Untersuchungen zur Einbeziehung von Wetterlagen wurden in Phase I bereits durchgeführt (Schade et al. 2020). Ein verändertes Klima ändert die großskalige Zirkulation (siehe auch IPCC 2021) und damit auch die Wetterlagen über der Nordsee. Dies wiederum kann die Häufigkeit, Intensität und Dauer von Sturmfluten beeinflussen. Bei der Analyse für die Nordseeregion wurden Stürme identifiziert und nach Stärke klassifiziert: *Sturm* (G = Gale), *Starker Sturm* (SG = Severe Gale) und *Sehr Starker Sturm* (VSG = Very Severe Gale). Auf Basis von 8 verfügbaren Simulationen des „weiter-wie-bisher“-Szenarios (RCP8.5) und den drei genannten Sturmklassen wurden für die ferne Zukunft teilweise höhere relative Häufigkeiten festgestellt. Besonders die stärkste Sturmklasse (VSG) zeigt eine hohe relative Änderung zu der Vergangenheit. Des Weiteren kam heraus, dass die Wetterlage „Nordwest“ (NW) in Zukunft signifikant häufiger auftreten wird, wobei dies vor allem durch eine höhere Anzahl an Episoden und nicht über die Andauer zu erklären ist (Jensen 2019).

Als ein wichtiges Forschungsziel für Phase II ergab sich daraus die Ausweitung der Untersuchungen zu geänderter Wetterlagendynamik mit direktem Bezug zu Sturmfluten in Cuxhaven. Dieser Aspekt soll in diesem Bericht aufgegriffen werden. Ferner wird nun ein größeres Modellensemble für die Analyse der Klimaprojektionen herangezogen, mit Hilfe dessen statistisch belastbarere Ergebnisse erzielt werden können. Untersuchungen betreffend der dabei verwendeten CMIP6 Modelle haben bereits gezeigt, dass sie dank verbesserter Modellphysik und erhöhter Auflösung gegenüber den älteren Modellgenerationen besser in der Lage sind die nordhemisphärischen Sturmzugbahnen abzubilden und Abweichungen gegenüber Reanalysen zu verringern (Harvey et al. 2020; Priestley et al. 2020). Des Weiteren finden die neuen SSP (*Shared Socioeconomic Pathways* = gemeinsame sozioökonomische Entwicklungspfade) Szenarien in CMIP6 Verwendung, die gegenüber den bisherigen RCP (*Representative Concentration Pathways* = repräsentative Konzentrationspfade) Szenarien neben den Treibhausgaskonzentrationen auch sozioökonomische Änderungen mit einfließen lassen (Riahi et al. 2017).

Im Folgenden werden zunächst verwendete Daten und Methoden vorgestellt. Daran schließt sich eine Analyse vergangener Sturmfluten anhand der beschriebenen Methoden an. Schließlich wird untersucht, wie sich begünstigende Bedingungen für Sturmfluten aus meteorologischer und ozeanographischer Sicht in Zukunft ändern könnten.

3 Daten und Methoden

3.1 Messdaten Wasserstand

Als fundamentaler Eingangssatz werden Pegelmessdaten der Sturmflutwasserstände (> 150 cm über MThw) der Station Cuxhaven für den Zeitraum 1951-2022 als Ereigniskatalog genutzt. Die Daten wurden zuletzt im Juni 2022 vom Portal Zentrales Datenmanagement (ZDM) Küstendaten der WSV² heruntergeladen. Der Pegel Cuxhaven liegt direkt an der Mündung der Elbe in die Nordsee. Damit ist er repräsentativ für das Sturmflutgeschehen in der gesamten Deutschen Bucht sowie der Tideelbe. Verwendet wurden für die hiesige Untersuchung allein die Scheitelwasserstände.

3.2 Atmosphärische Reanalysen

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 den physikalischen und dynamischen Modellgleichungen sämtliche Variablen der kompletten durch das Modell abgedeckte Atmosphäre berechnet. Unterschiedliche Wetterdienste nutzen dabei ihre eigenen numerischen Modelle und berücksichtigen ggf. einen unterschiedlichen Umfang an zu assimilierenden Beobachtungsdaten zur Erstellung der Reanalysen.

3.2.1 ERA5 Reanalyse

ERA5 ist der Nachfolger der ERA-Interim Reanalyse des *Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage* (ECMWF)³ und als solche eine der modernsten und fortschrittlichsten globalen Reanalysen (Hersbach et al. 2020 p. 5). Sie wurde unter Verwendung des globalen Wettervorhersagesystems *IFS* erstellt. Die ERA5 Daten liegen in einem hochaufgelösten Gitter mit 0.25° Gitterweite und in stündlicher Auflösung für den Zeitraum 1950 bis heute vor und werden in regelmäßigen Abständen aktualisiert. Für die vorliegende Studie wurden die stündlichen Werte des Luftdrucks auf Meeresspiegelniveau (*Sea-Level Pressure*, SLP) verwendet und zu Tagesmittelwerten aggregiert. Die Daten wurden im August 2021 vom *Copernicus Climate Data Store*⁴ heruntergeladen.

3.2.2 NCEP/NCAR R1

Das *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) und das *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) haben in enger Zusammenarbeit die Reanalysis 1 (Kalnay et al. 1996) erstellt. Das zentrale Modul ist identisch mit dem operationellen System, welches seinerzeit bei NCEP benutzt wurde, allerdings mit einer reduzierten spektralen horizontalen Auflösung von T62 (~210 km Gitterweite bei 28 Schichten in der Vertikalen). NCEP/NCAR R1 umspannte ursprünglich einen Zeitraum von 1957 bis 1996, wurde aber nachträglich mithilfe eines identischen *Climate Data Assimilation System* (CDAS) bis 1948 erweitert und bis zum heutigen Tag fortgesetzt. Die tagesgemittelten SLP-Felder, welche auch

² https://www.kuestendaten.de/DE/Services/Messreihen_Dateien_Download/Download_Zeitreihen_node.html

³ <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5>

⁴ <https://cds.climate.copernicus.eu>

für die vorliegende Studie verwendet wurden, liefern die Grundlage der operationell betriebenen Wetterlagenklassifizierung des BSH (siehe Abschnitt 3.4).

3.3 Klimamodellsimulationen

Um mögliche zukünftigen Änderungen der meteorologischen Bedingungen, die Sturmfluten in der Deutschen Bucht begünstigen, untersuchen zu können, wurden die tagesgemittelten Luftdruckdaten in Meereshöhe (*Sea Level Pressure* = SLP) eines Ensembles aus verschiedenen globalen Klimamodellen oder *General Circulation Models* (GCMs) des *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) als Datengrundlage verwendet (Eyring et al. 2016). Die jeweiligen atmosphärischen und ozeanographischen Modellkomponenten sowie deren Auflösung sind neben der Referenz, den untersuchten Szenarien und den genutzten Modellläufen in Tabelle 3-1 aufgeführt.

Tabelle 3-1 | Verwendete Globalmodelle (GCMs) des CMIP6 sowie Auflösung der Modellkomponenten für Atmosphäre und Ozean, Referenzen, Szenarien und die jeweiligen Modellläufe. Die jeweilig verwendeten Datensätze sind im Anhang (Tabelle A-1) referenziert

GCM	Auflösung	Referenz	Szenario	Lauf
CMCC-CM2-SR5	Atmosphäre: CAM5.3 (1 deg lat/lon) Ozean: NEMO3.6 (1 - 0.33 deg lat/lon)	Cherchi et al. (2018)	historisch, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585	r1i1p1f1
CNRM-CM6-1-HR	Atmosphäre: Arpege 6.3 (0.5 deg lat/lon) Ozean: NEMO3.6 (0.25 deg lat/lon)	Voltaire et al. (2019)	historisch, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585	r1i1p1f2
EC-Earth3	Atmosphäre: IFS cy36r4 (80 km lat/lon) Ozean: NEMO3.6 (1 - 0.33 deg lat/lon)	Döscher et al. (2022)	historisch, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585	r1i1p1f1
IPSL-CM6A-LR	Atmosphäre: LMDZ NPv6 (1 deg lat/lon) Ozean: NEMO-OPA (1 deg lat/lon)	Boucher et al. (2020)	historisch, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585	r1-r4i1p1f1 r6i1p1f1 r14i1p1f1
MIROC6	Atmosphäre: CCSR AGCM (150 km lat/lon) Ozean: COCO4.9 (1 deg lat/lon)	Tatebe et al. (2019)	historisch, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585	r1i1p1f1 r2i1p1f1 r3i1p1f1
MPI-ESM1-2-LR	Atmosphäre: ECHAM6.3 (200 km lat/lon) Ozean: MPIOM1.63 (1.5 deg lat/lon)	Mauritsen et al. (2019)	historisch, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585	r1-r10i1p1f1
MRI-ESM2-0	Atmosphäre: MRI-AGCM3.5 (120 km lat/lon) Ozean: MRI.COM4.4 (0.5 - 0.3 deg lat/lon)	Yukimoto et al. (2019)	historisch, ssp126, ssp245, ssp370, ssp585	r1i1p1f1

Dieses im Folgenden als „CMIP6-Ensemble“ bezeichnete Modellensemble umfasst derzeit 23 Simulationen für den historischen Zeitraum (1970-2014) und verschiedene Szenarien für die Zukunft (2015-2100). Alle Simulationen wurden mit identischen externen Antrieben - wie z.B. Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen – durchgeführt, wie es im Protokoll für die historischen Experimente des CMIP6 und ScenarioMIP (O’Neill et al. 2016) festgelegt wurde.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Analysen wurden die vier TIER1-Szenarien des ScenarioMIP untersucht: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5. Diese umspannen eine weite Bandbreite an sozioökonomischen Narrativen und Treibhausgaskonzentrationspfaden bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Die große Anzahl zur Verfügung stehender Simulationen im CMIP6-Ensemble lassen eine robustere Abschätzung des Klimaänderungssignals zu als Untersuchungen, in denen nur ein einzelnes Modell bzw. ein einzelner Modellauf projiziert wird. Dies ist von Bedeutung, weil Luftdruck, Wind und andere dynamisch geprägte Größen sowohl in Realität als auch in Klimamodellen durch vergleichsweise große natürliche Variabilität gekennzeichnet sind und diesbezügliche Klimaprojektionen von größerer Modellunsicherheit geprägt sind als z.B. temperaturbezogene Größen. Für alle in Tabelle 3-1 aufgelisteten Klimasimulationen wurden die täglich gemittelten SLP-Felder ausgewertet.

3.4 Wetterlagen-Klassifikation nach Lamb

Eine zusammenhängende Beschreibung der regionalen atmosphärischen Zirkulation ist mithilfe definierter Zirkulationsmuster oder Wetterlagen möglich. Am BSH wird dazu im Rahmen der Analysen des Nordseezustands das von Jenkinson und Collison (1977) zur Objektivierung der „Lamb Weather Types“ (Lamb 1950) entwickelte automatische Klassifizierungsverfahren verwendet (Löwe 2005). Dieses Klassifizierungsverfahren wird auch für die folgenden Untersuchungen genutzt. Die auf den SLP-Daten der NCEP/NCAR R1 Reanalyse basierenden Wetterlagen und Indizes für Sturmstärke für Vergangenheit und Gegenwart liegen seit 1948 bis heute⁵ vor und können kostenfrei über das *World Data Center for Climate* (WDCC) des *Deutschen Klimarechenzentrums* (DKRZ) heruntergeladen werden (Loewe 2022)⁶.

Für Untersuchungen des zukünftigen Klimas werden die im Abschnitt 3.3 beschriebenen CMIP6 Daten als Grundlage genutzt. Das Klassifikationsverfahren besteht in der Auswertung von Tagesmitteln der SLP-Felder an 16 Gitterpunkten im erweiterten Nordseeraum (siehe Abbildung 3-1).

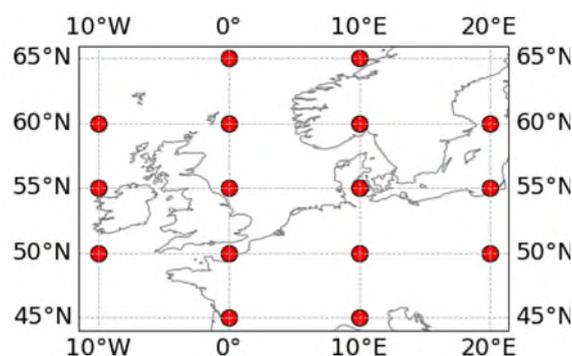


Abbildung 3-1 Lage der 16 Gitterpunkte, die zur Berechnung der Lamb-Wetterlagen verwendet werden.

⁵ Im WDCC liegen die Daten derzeit bis 12/2022 im netCDF-Format vor, eine Aktualisierung wird jeweils zum Jahresanfang durchgeführt.

⁶ https://www.bsh.de/DE/DATEN/Klima-und-Meer/Wetterlagen-Stuerme/wetterlagen-und-stuerme_node.html

Die an diesen Punkten ermittelten Druckdaten werden zur Bestimmung repräsentativer Indizes für Wind und Vorticity herangezogen. 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 2009, 2005). Diese 6 charakteristischen Wetterlagen sind: Antizyklonal (A), Zyklonal (C), Nordost (NE), Nordwest (NW), Südost (SE), Südwest (SW).

Sturmstärke (Gale-Index)

Eine weitere Größe, die bei Sturmfluten eine Rolle spielt ist die *Sturmstärke*. Aus dem SLP-Feld 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 (Löwe 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.

Effektiver geostrophischer 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 (Ganske et al. 2018). Im Fall der hier betrachteten Sturmfluten ist dies also die Windrichtung aus der der Wind kommen muss, um das Wasser Richtung Küste zu treiben. Wenn man diese Windrichtung maximaler Wirkung kennt, dann kann man den effektiven Wind berechnen, indem man den Windvektor auf diese Windrichtung projiziert. Für Sturmfluten beträgt die effektive Windrichtung in Cuxhaven 295° (Ganske et al. 2018; Koziar et al. 2006), die auch als Referenz für die Deutsche Bucht herangezogen werden kann.

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). Aus den Vektorkomponenten wiederum lässt sich die geostrophische Windrichtung bestimmen und somit auch deren Projektion auf die effektive Windrichtung.

4 Klimatologische Analyse der Lamb-Wetterlagen in der Gegenwart

Der Ereigniskatalog (siehe Abschnitt 3.1) liefert eine Grundlage an Terminen, die eine statistische Betrachtung der meteorologischen Bedingungen vor den gemessenen Sturmfluten erlaubt. Hierfür werden die meteorologischen Bedingungen, abgeleitet aus der in Abschnitt 3.4 eingeführten Wetterlagen-Klassifikation nach Lamb, betrachtet. Für die Analyse von sturmflutbegünstigenden Faktoren ist eine zeitliche Zuordnung von Wetterlage, Sturmstärkeindex und effektivem Wind zu den Sturmflutereignissen notwendig. Dies wird in der vorliegenden Untersuchung umgesetzt, indem jeweils die Wetterlage, der Sturmstärkeindex und effektive Wind des jeweiligen Kalendertages eines Sturmflutereignisses betrachtet wird, wenn der Scheitelwasserstand der Sturmflut zwischen 6 und 24 Uhr erreicht wurde. Wenn der Scheitelwasserstand schon vor 6 Uhr morgens erreicht wurde, werden Wetterlage, Sturmstärkeindex und effektiver Wind des Vortages betrachtet. Damit wird berücksichtigt, dass der Einfluss des Sturmereignisses auf die Wassermassen zeitlich parallel zur Flut, also zu steigendem Wasserstand stattfinden muss.

In Abbildung 4-1 sind die relativen Häufigkeiten der Lamb-Wetterlagenklassen (LWTs, Abschnitt 3.4) berechnet aus den NCEP/NCAR R1 SLP-Daten über den gesamten Zeitraum (1951–2022) unabhängig vom Auftreten einer Sturmflut (Abbildung 4-1 links), sowie für den Tag vor bzw. am Tag der Sturmfluten (Abbildung 4-1 rechts) dargestellt. Vergleicht man die relativen Häufigkeiten, fällt sofort auf, dass die LWT „Nordwest“ (NW) bei Sturmfluten eine mehr als 3-fach höhere Wahrscheinlichkeit aufweist als im klimatologischen Mittel, während die LWTs „Nordost“ (NE), „Antizyklonal“ (A) und „Südost“ (SE) nicht in einem Zusammenhang mit Sturmfluten stehen. Etwa ein Viertel der Sturmfluten lässt sich mit einer zyklonalen LWT (C) in Verbindung bringen - Dies bedeutet, dass das Sturmzentrum direkt über der zentralen Nordsee liegt - weitere knapp 15% mit einer südwestlichen LWT (SW), wobei letzteres eine geringere Häufigkeit als im klimatologischen Mittel über alle Tage bedeutet.

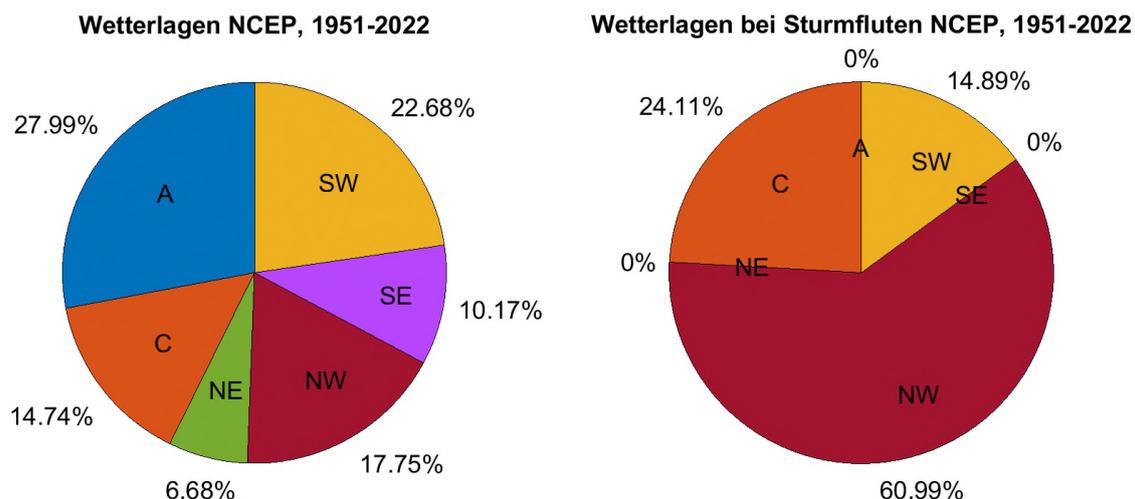


Abbildung 4-1 | Links: Mittlere Verteilung der Lamb-Wetterlagen, berechnet aus Tagesmitteln des NCEP/NCAR R1 Luftdrucks auf Meeresebene, für den gesamten untersuchten Zeitraum von 1951 bis 2022. Rechts: Mittlere Verteilung der Lamb-Wetterlagen bei Sturmfluten am Pegel Cuxhaven (mindestens 150 cm über dem MThw) im selben Zeitraum. Fand die Sturmflut in der Zeit zwischen 0 und 6 Uhr morgens statt wurde die Wetterlage am Tag zuvor als Auslöser der Sturmflut gewertet.

Diese statistische Analyse bestätigt die Erwartung, dass allgemein westliche Wetterlagen das Auftreten einer Sturmflut in Cuxhaven besonders begünstigen, da sie das Wasser in Richtung der Deutschen Bucht drücken. Zudem sind diese drei LWTs in der Abfolge SW-C-NW beim Durchzug eines Tiefdruckgebiets charakteristisch. Bei einer Anströmung aus Nordwest verstärkt sich ferner der „Trichtereffekt“ für Cuxhaven, da die Nord- und Ostfriesischen Küstenlinien hier wie in einem Trichter zusammenlaufen.

Sturmstärke (Gale-Index)

Die relativen Häufigkeiten der Lamb-Sturmklassen für den gesamten untersuchten Zeitraum (1951-2022) sowie für den Tag vor bzw. am Tag der Sturmfluten sind in Abbildung 4-2 dargestellt. Während Sturm (Sturmklassen G, SG und VSG) im Mittel mit einer Wahrscheinlichkeit von knapp 9% auftritt, ändert sich diese Verteilung im zeitlichen Zusammenhang mit Sturmfluten deutlich: Knapp 38% fallen nun auf *Sturm* (G), gut 37% auf *Schwerer Sturm* (SG) und gut 9% auf *Sehr Schwerer Sturm* (VSG). 15,6% zeigen keinen Sturm an.

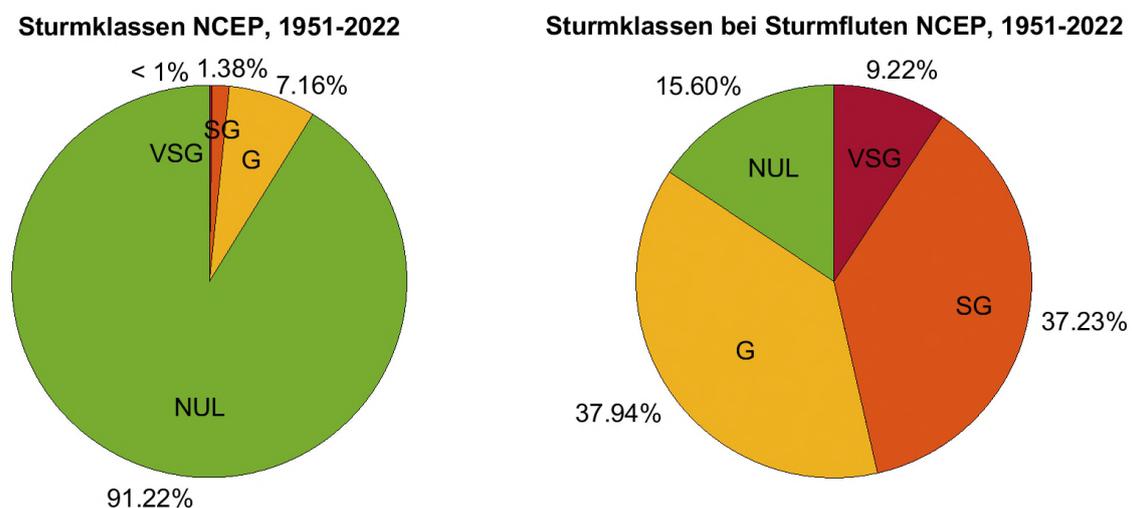


Abbildung 4-2 | Links: Mittlere Verteilung der Lamb-Sturmklassen, berechnet aus Tagesmitteln des NCEP/NCAR R1 Luftdrucks auf Meeresebene für den gesamten untersuchten Zeitraum von 1951 bis 2022. Rechts: Mittlere Verteilung der Lamb-Sturmklassen bei Sturmfluten am Pegel Cuxhaven (mindestens 150 cm über dem MThw) im selben Zeitraum.

Dabei ist zu beachten, dass eine Sturmklassifikation „NUL“ natürlich nicht gleichbedeutend mit „kein Wind“ ist, sondern lediglich, dass der Sturmindex einen Wert geringer als das 90. Perzentil erreicht. Dies betrifft insgesamt 44 Fälle aus dem Ereigniskatalog. Aus diesen 44 Fällen wurde in 12 Fällen am Tag bzw. in den Tagen zuvor zumindest ein Sturm detektiert, in 5 Fällen Sturm an einem oder mehreren Folgetagen, in 4 Fällen Sturm zuvor und danach. Die übrigen 23 Fälle lassen sich nur indirekt über die angewandte Methodik erklären, da sie vermutlich durch ungünstigen Kombinationen von Tidehochwasser und westlichen Strömungen, die keine Sturmstärke erreichten, entstanden sind. Tatsächlich zeigen sich dann auch in allen Fällen anhaltende bzw. häufige westliche Wetterlagen in den Tagen bis Wochen zuvor, und/oder erhöhte Werte des effektiven geostrophischen Windes. Somit ist es sinnvoll, auch diesen genauer zu analysieren, da die Richtungskomponente der Anströmung, in diesem Fall also 295°, berücksichtigt wird.

Effektiver geostrophischer Wind

Abbildung 4-3 zeigt die Verteilungen des effektiven geostrophischen Windes aus 295° (v_{eff}) als Klimatologie der Tagesmittel über den gesamten Zeitraum (1951-2022) in blau, sowie in Zusammenhang

mit den Sturmfluten des Ereigniskatalogs in orange. Es ist eine Verschiebung zwischen den beiden Verteilungen zu erkennen: Bei Sturmfluten ist v_{eff} immer positiv und zumeist auch über 10 m/s. Über den gesamten Zeitraum verteilen sich die Werte von -23 m/s bis 31 m/s (Mittelwert 2,4 m/s). Das 95. Perzentil findet sich bei 13,3 m/s, welches nahe dem Modalwert der Verteilung bei Sturmfluten (14 m/s) liegt.

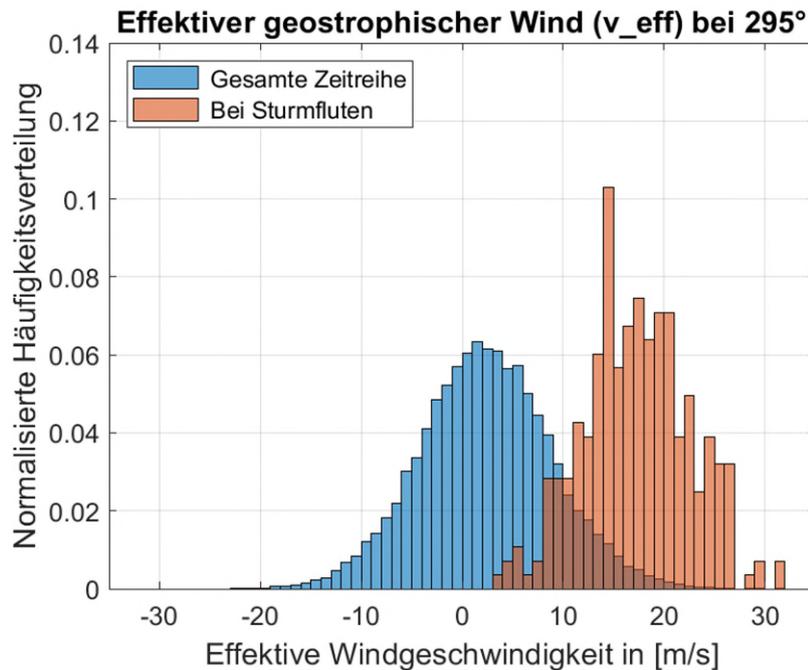


Abbildung 4-3 | Normalisierte Verteilung des effektiven geostrophischen Windes, bestimmt aus dem tagesgemittelten Bodenluftdruckfeld der NCEP/NCAR R1 und projiziert auf 295° für den gesamten Zeitraum 1951-2022 (blau) und bei Sturmfluten (orange).

Es fällt ebenfalls auf, dass eine gewisse Anzahl von Sturmfluten schon bei v_{eff} -Werten zu beobachten waren, die nicht als Extremwerte der klimatologischen v_{eff} -Verteilung zu betrachten sind. Dies lässt sich dadurch erklären, dass alle westlichen Wetterlagen das Wasser Richtung Küste drücken. Fällt eine anhaltende Westwetterlage nun mit einem Tidehochwasser zusammen, wie es z.B. bei einer Abfolge von mehreren Tiefdruckgebieten der Fall sein kann, müssen die aktuellen effektiven Winde ggf. nicht extrem sein, um in Summe am Ende zu einem Pegelstand zu führen, der als Sturmflut gekennzeichnet wird. Trotzdem zeigt diese Auswertung, dass der effektive geostrophische Wind (projiziert auf 295°) gut als Sturmflutrisiko-Indikator verwendet werden kann. Für die Auswertung der Klimamodelldaten wurde als Schwellwert das 95. Perzentil der klimatologischen v_{eff} -Verteilung festgelegt. Dies entspricht gemäß NCEP NCAR R1 einem effektiven geostrophischen Wind von 13,3 m/s.

5 Klimawandelbedingte Änderungen wichtiger Einflussfaktoren für Sturmfluten

5.1 Zukünftige Änderungen basierend auf Lamb-Wetterlagen und Sturmwindizes

Die Ergebnisse der vorherigen Abschnitte zeigen, dass sowohl Windrichtung als auch Wind- bzw. Sturmstärke wichtig sind, um Sturmfluten in Cuxhaven auszulösen. Daraus ergibt sich nun die Frage, ob beide Bedingungen sich in Zukunft ändern könnten. In diesem Abschnitt wird darum nun die Häufigkeit der Lamb-Wetterlagen (LWTs) Südwest (SW), Zyklonal (C) und Nordwest (NW), der Sturmwindizes und des effektiven geostrophischen Windes in vier Klimaszenarien mit Hilfe des CMIP6-Ensembles (CMIP6-Ens, siehe Abschnitt 3.3) analysiert.

Abbildung 5-1 (a) zeigt die Häufigkeit des Auftretens der LWTs SW, C, NW pro Jahr für die Reanalysen NCEP und ERA5 sowie für CMIP6-Ens im historischen Zeitraum (1971-2000) und die ferne Zukunft (2071-2100) unter Annahme der vier TIER1-Szenarien (siehe Abschnitt 3.3). In diesen sog. Boxplots sind die Mediane zweier Verteilungen signifikant unterschiedlich, wenn sich ihre Konfidenzintervalle (dargestellt und begrenzt durch die Mittelpunkte der dreieckigen Marker) nicht überlappen.

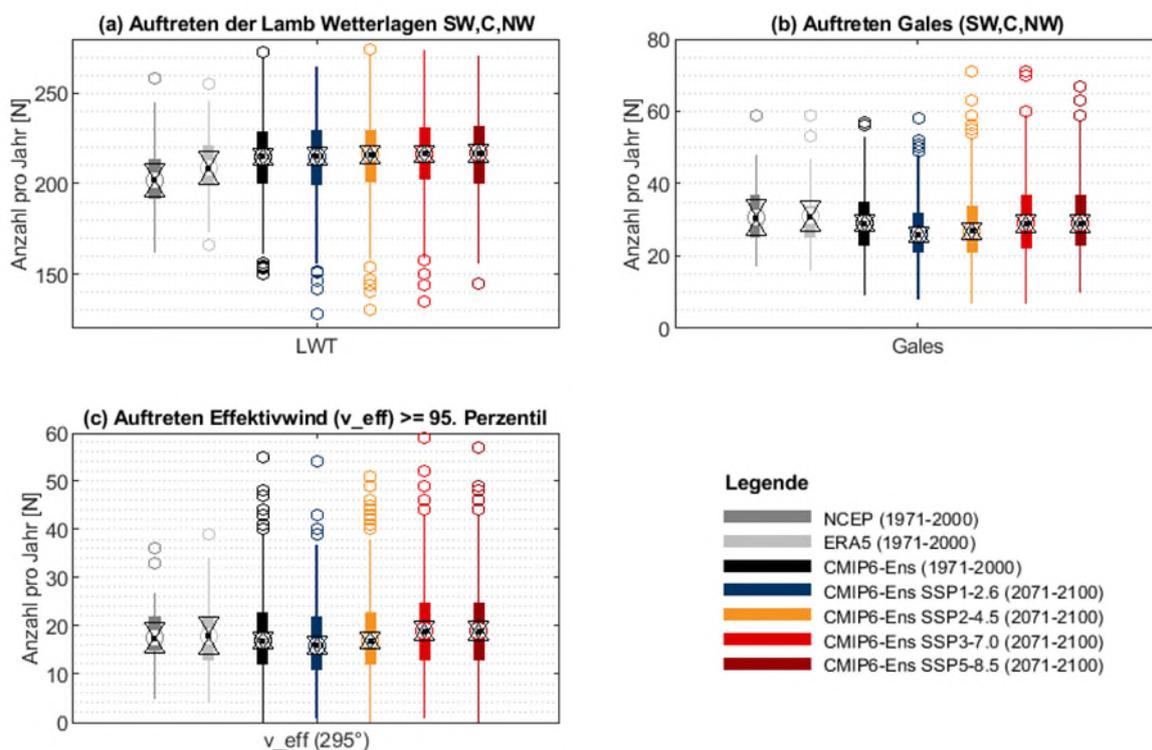


Abbildung 5-1 | Boxplots zum Auftreten (a) der Lamb-Wetterlagen (LWT) SW,C,NW, (b) der Sturmwindizes, die mit „Gale“, „Severe Gale“ oder „Very Severe Gale“ bestimmt wurden, und (c) der effektiven Windgeschwindigkeiten \geq 95. Perzentil für NCEP/NCAR R1 (dunkelgrau), ERA5 (hellgrau) und das 23-Member CMIP6-Ens (schwarz) für den Zeitraum 1971–2000, sowie die jeweiligen Läufe für die SSP-Szenarien 1–2.6 (blau), 2–4.5 (orange), 3–7.0 (hellrot) und 5–8.5 (dunkelrot) für die ferne Zukunft (2071–2100). Die Boxplots zeigen den Median (schwarzer Punkt), die interquartile Spannweite (25.–75. Perzentil, Box), die Extreme, d.h., ungefähr $\pm 2,7$ fache Standardabweichung und 99,3 Abdeckung, der Verteilung (Whiskers), sowie „Outliers“ (Kreise). Die Einbuchtungen, dargestellt als Dreiecke um den Median herum, entsprechen $q_2 - 1,57 (q_3 - q_1) / \sqrt{n}$ und $q_2 + 1,57 (q_3 - q_1) / \sqrt{n}$, wobei q_2 den Median (50. Perzentil), q_1 und q_3 das 25. and 75. Perzentil und n die Anzahl der Werte beschreiben.

Hier erkennt man, dass die LWTs SW, C und NW in den historischen Läufen des CMIP6-Ens etwas häufiger auftreten als in NCEP/NCAR R1. Mit ERA5 stimmen sie etwas besser überein. Signifikante zukünftige Änderungen des Auftretens gegenüber dem historischen Äquivalent sind für den Median des Ensembles nicht zu erkennen auch wenn sich ein leichter Anstieg mit stärkeren Klimawandel-Szenarien zeigt.

Die Änderungen im Auftreten von Gales (also Stürmen) während der drei für Sturmfluten relevanten Wetterlagen ist in Abbildung 5-1 (b) dargestellt: Es ist zu erkennen, dass der Median der Häufigkeitsverteilung der Gales in der fernen Zukunft für SSP1-2.6 leicht abnimmt. Für die extremeren Szenarien zeigt sich dann ein leichter Anstieg gegenüber SSP1-2.6. SSP3-7.0 und SSP5-8.5 sind dann wieder nahezu identisch mit dem historischen Zeitraum, mit leicht erhöhter Bandbreite in den Extremen der Verteilungen.

Abbildung 5-1 (c) zeigt schließlich die Häufigkeitsverteilung des Auftretens von effektiven geostrophischen Windgeschwindigkeiten oberhalb des 95. Perzentils. Hier erkennt man für den Median der Verteilung gegenüber dem historischen Zeitraum eine Abnahme von einem Tag pro Jahr für das SSP1-2.6 Szenario, sowie eine Zunahme von 2 Tagen pro Jahr für die Szenarien SSP3-7.0 und SSP5-8.5 des CMIP6-Ens, wobei sich die beiden extremen Szenarien untereinander kaum unterscheiden. Das 95. Perzentil entspricht bei NCEP/NCAR R1 einem Wert von 13,3 m/s und ERA5 einem Wert von 13,8 m/s. Wie in Abbildung 4-3 zu sehen, waren die Mehrheit der real beobachteten Sturmfluten mit effektiven geostrophischen Winden oberhalb dieses Schwellwerts assoziiert. Ferner ist zu beachten, dass im Gegensatz zu Sturmebben (Jensen et al. 2022) nicht nur eine Wetterlage für das Auftreten verantwortlich zeichnet, sondern vielmehr alle westlichen Wetterlagen, inkl. LWT C. Wie kommt es nun zu dieser Zunahme an effektiven geostrophischen Winden in den extremen Szenarien, wenn die relevanten Wetterlagen sowie die Stürme (Gales) kaum Veränderungen zeigen?

Im Anhang (Abbildung A-1) sind die Änderungen der Häufigkeiten aller sechs Wetterlagen dargestellt. Hier wird ersichtlich, dass der Median der LWT C, die am zweithäufigsten bei Sturmfluten klassifiziert wird (s. Abbildung 4-1), bereits ab dem Szenario SSP2-4.5 signifikant seltener auftritt. Im Gegensatz dazu zeigen sich signifikante Anstiege des Medians für die beiden westlichen Wetterlagen (SW, NW), die in der Gegenwart zu knapp 76 % vor bzw. bei Sturmfluten aufgetreten sind (siehe Abbildung 4-1). Somit erklärt sich auch die Zunahme des effektiven geostrophischen Windes aus westlichen Richtungen.

5.2 Meeresspiegelanstieg

Der Meeresspiegel steigt infolge des anthropogenen Klimawandels global an. Ursache ist neben dem weltweiten Abschmelzen der Gletscher und Eisschilde die thermische Ausdehnung der sich erwärmenden Meere und Ozeane. Diese Entwicklung ist weltweit zu beobachten, allerdings mit regionalen Unterschieden. Unterschiedlich starker Anstieg der Wassertemperaturen und des Salzgehalts sowie Landhebungs- beziehungsweise Senkungsprozesse können sich auf die regionalen und lokalen Meeresspiegeländerungen auswirken. Sowohl für die Nordsee als auch für die Ostsee wird allerdings erwartet, dass die zukünftigen Anstiegsraten des Meeresspiegels sich nicht grundlegend von dem globalen Mittelwert unterscheiden.

Für die Vergangenheit beträgt die Rate dieses Anstiegs im 19. bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts etwa 1,4-2,1 mm/Jahr. Diese Anstiegsrate beschleunigt sich, so liegt der Anstieg im globalen Mittel seit dem Beginn der Satellitenmessungen 1993 bei etwa 3,4 mm/Jahr. Dieser Wert, wie auch alle folgenden

Angaben zum Meeresspiegel, stammt, soweit nicht anders angegeben, aus dem 6. Sachstandsbericht des IPCC ((Intergovernmental Panel on Climate Change 2023b)).

Während für den Zeitraum von 1971-2018 noch etwa 50 % des globalen Meeresspiegelanstiegs auf die Dichteänderungen des Wassers im Ozean zurückzuführen sind, wurde etwa um das Jahr 2005 dieser Beitrag durch Änderungen der Eismassen (sowohl als Gebirgsgletscher wie auch als Eisschild über Grönland und der Antarktis) als Hauptkomponente des Anstiegs abgelöst (Intergovernmental Panel on Climate Change 2023b). Der Beitrag der einzelnen Komponenten zum Meeresspiegelanstieg wird für den Zeitraum 1993-2018 aus Beobachtungen folgendermaßen quantifiziert: thermische Ausdehnung des Ozeanwassers (sterischer Effekt) 46 %, Schmelzen der Landgletscher 19 %, Abschmelzen der Eismassen auf Grönland 15 % und in der Antarktis 9 %. Zurzeit sind die Beiträge der Landgletscher zum Meeresspiegelanstieg noch größer als die der Eisschilde auf Grönland und der Antarktis, da sie zum einen sensitiver auf die Erderwärmung reagieren und zum anderen auch zumeist in wärmeren Klimazonen liegen. Es wird jedoch erwartet, dass in näherer Zukunft der Beitrag von Grönland und (in fernerer Zukunft) derjenige der Antarktis den Beitrag der Landgletscher übersteigen wird, da die Schmelzraten an den Eisschilden sich sehr viel stärker beschleunigen als die der Landgletscher.

Für die Zukunft wird eine weitere Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs erwartet. Die bis zum Jahr 2100 projizierte Zunahme des Meeresspiegels im Vergleich zum Zeitraum 1995-2014 erreicht Werte von 44 cm (wahrscheinliche Bandbreite: 32-62 cm) im *SSP 1-2.6* und 77 cm (63-101 cm) im *SSP5-8.5* (siehe Tabelle 5-1). Mit wahrscheinlicher Bandbreite ist hier gemeint, dass 2/3 aller verwendeten Modellläufe innerhalb dieser angegebenen Spanne liegen, diese Spanne reicht damit vom 17.-83. Perzentil. Allerdings ist es so, dass in dieser Bandbreite nur die Beiträge berücksichtigt sind, bei denen das Prozessverständnis und die Modellierbarkeit mindestens „mittleres Vertrauen“ genießt. Es gibt beim Abschmelzen der arktischen und antarktischen Eisschilde aber auch Prozesse wie beispielsweise die „marine Eisschild-Instabilität“, bei der unter bestimmten topographischen Bedingungen das Abbrechen großer Eismassen durch Eindringen von wärmeren Ozeanwasser unter die Eisschilde beschleunigt wird. Der mögliche Einfluss dieses Prozesses (vor allem in der Antarktis) ist von einer derzeit noch tiefen Unsicherheit geprägt, daher wurden diese Beiträge in der oben angegebenen Bandbreite vom IPCC nicht berücksichtigt, sollten aber bei der Abschätzung des zukünftigen Meeresspiegelanstiegs nicht vernachlässigt werden.

Das Prozessverständnis rund um das Abschmelzen der großen Eisschilde und quantitative Abschätzungen der bereits beobachteten Schmelze hat sich in den letzten Jahren deutlich verbessert. Es ist aber weiterhin so, dass die Beiträge der Eisschilde von Grönland und der Antarktis zum Meeresspiegelanstieg typischerweise in den globalen Klimamodellen nicht modelliert und daher separat abgeschätzt werden müssen. Wie oben erwähnt, zeigen die Beobachtungen, dass die Beiträge der schmelzenden Eisschilde und Landgletscher inzwischen größer sind als der sterische Effekt und Letzteren als Haupttreiber des globalen Meeresspiegelanstiegs abgelöst haben. Damit wird auch deutlich, dass die Unsicherheiten in den Projektionen derzeit nicht verringert werden können, da ausgerechnet die (noch) nicht modellierbaren Beiträge der Eisschilde und Landgletscher die höchsten Beschleunigungsraten aufweisen. Der IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change 2023b)) gibt hierfür (wenn diese unsicheren Prozesse mit berücksichtigt werden) als Wert 0,99 cm an (mit einer Bandbreite von 82-119 cm), unter Berücksichtigung von Expertenschätzungen reicht diese Bandbreite sogar von 70 bis 160 cm für 2100.

Mit dem Meeresspiegelanstieg werden extrem hohe Wasserstände infolge von Sturmfluten zukünftig noch höher auflaufen. So wurde im Sonderbericht des IPCC von 2019 „Ozean und Kryosphäre im Klimawandel“ ((Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2022c)) exemplarisch für die Nordseeküste untersucht, wie sich die Extremwasserstände im Klimawandel ändern werden. Dabei ergab sich, dass ein heute 100-jährliches Ereignis in den Dekaden von 2081-2100 zu einem etwa 30-jährlichen Ereignis (SSP1-2.6) bis sogar etwa 15-jährlichem Ereignis (SSP5-8.5) in Cuxhaven werden kann. Es wird also deutlich, dass in der Nordsee zukünftig die 100-jährlichen extremen Wasserstandsereignisse deutlich häufiger auftreten werden. Allerdings wurden diese Ergebnisse mit einem statischen Ansatz erzielt, berücksichtigen also keine Wechselwirkungen von Prozessen wie Windstau und Wellenaufbau, die zu höheren Wasserständen führen würden. Aktuell wird in einer anderen Studie am BSH als Teil der Forschungsarbeit im BMDV-Expertennetzwerk versucht, dies zielgerichtet und exakter für die deutschen Teile der Nord- und Ostsee sowie angrenzende Küstenlinien zu quantifizieren (siehe Abschnitt 7.2.2).

Tabelle 5-1 | Projektionen des globalen mittlerer Meeresspiegelanstiegs [in m] aus dem 6. Sachstandsbericht des IPCC für verschiedene SSP Szenarien relativ zum Referenzzeitraum 1995-2014 sowie die dazugehörigen Meeresspiegelanstiegsraten [in mm/Jahr]. Angegeben sind der jeweilige Median und (in Klammern) die wahrscheinliche Bandbreite vom 17.-83. Perzentil.

Sozioökonomischer Entwicklungspfad	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
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)

6 Zusammenfassung

In diesem Bericht wurde untersucht, wie sich relevante Einflussfaktoren für das Auftreten von Sturmfluten in der Deutschen Bucht in Zukunft ändern werden. Die Einflussfaktoren die dabei betrachtet wurden, sind die meteorologischen Bedingungen (Wetterlage, Sturmindex, effektiver geostrophischer Wind), sowie der Meeresspiegelanstieg.

Sturmfluten in der Deutschen Bucht sind hier als Ereignisse definiert, bei denen das *Mittlere Tidehochwasser* (MThw) am Pegel Cuxhaven um mindestens 1,5 m überschritten wird. Daraus ergibt sich ein Ereigniskatalog von insgesamt 282 Sturmfluten für den Zeitraum 1951-2022. Mithilfe dieses Ereigniskataloges wurde untersucht, welche meteorologischen Bedingungen diese Sturmfluten begünstigen. Zunächst wurden die atmosphärischen Bedingungen (Wetterlage, Sturmstärke und effektiver Wind) vor einer Sturmflut betrachtet. Die Untersuchungen ergeben, dass hauptsächlich westliche Wetterlagen (Nordwest, Südwest) vorliegen und zu 84,4% mindestens „Sturm“ klassifiziert wurde.

Abschätzungen zu zukünftigen Entwicklungen im Klimawandel basierend auf einem Multimodell-Ensemble von CMIP6-Simulationen (siehe Tabelle 3-1) deuten darauf hin, dass Stürme („Gales“) in Zusammenhang mit sturmflutträchtigen Wetterlagen (SW, C, NW) zum Ende des Jahrhunderts im Median etwa so oft auftreten werden wie bisher. Allerdings werden die Wetterlagen NW und SW signifikant häufiger (Anhang A1), ebenso effektive geostrophische Winde oberhalb des 95. Perzentils aus 295° (in Richtung Cuxhaven/Deutsche Bucht; siehe Abschnitt 5.1) für die Szenarien SSP3-7.0 und SSP5-8.5. Daraus lässt sich schließen, dass Sturmfluten in der Deutschen Bucht für diese Szenarien in Zukunft häufiger auftreten. Im Median bedeutet dies einen Anstieg von 17 auf 19 Tage pro Jahr. Daraus wird ersichtlich, dass nicht allein die Stärke der Anströmung, sondern auch deren Richtung ausschlaggebende Faktoren sind. Zudem hat die klimatologische Analyse der Gegenwart (Abschnitt 4) ergeben, dass Wasserstände entsprechend einer Sturmflut teilweise auch bei weniger extremen effektiven Windgeschwindigkeiten auftreten können, z.B. nach anhaltenden westlichen Wetterlagen.

Die Projektionen des IPCC (2023) zum zukünftigen globalen mittleren Meeresspiegelanstieg liegen für das Ende der ersten 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 5.2). Praktisch sicher ist, dass der mittlere globale Meeresspiegel weiter ansteigt (Intergovernmental Panel on Climate Change 2022) und somit die Wasserstände weiter anheben wird. Sturmfluten werden daher, unabhängig davon ob sie in Anzahl und Stärke zunehmen, zukünftig höher ausfallen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es nach den Erkenntnissen dieser Untersuchung, basierend auf den dargestellten meteorologischen und ozeanographischen Einflussfaktoren, zu einer höheren Beeinträchtigung durch Sturmfluten in der Deutschen Bucht und der Tideelbe zum Ende des Jahrhunderts kommen wird. Eine genauere zeitliche Einordnung und quantitative Einschätzung der zukünftigen Entwicklung bleibt Gegenstand fortgesetzter Untersuchungen im BMDV-Expertennetzwerk.

7 Ausblick

7.1 Wetterlagen und Meeresspiegel

Im Rahmen des BMDV-Expertenetzwerkes sind weitere Arbeiten zum Thema Wetterlagen und ihrem Einfluss auf Extremereignisse geplant. Unter anderem soll die Kombination von verschiedenen, individuell nicht notwendigerweise extremen Bedingungen im Klimawandel (z.B. Meeresspiegelanstieg und erhöhte Niederschläge/Binnenabflüsse) z.B. am Nord-Ostsee-Kanal die bisherigen Untersuchungen aus Phase I ausweiten. Die aktuell am BSH laufenden Vorarbeiten für Untersuchungen basierend auf der Verfolgung der Zugbahnen von Stürmen sowie Analysen extremer Wasserstände mit Hilfe der Extremwertstatistik werden im folgenden Abschnitt 7.2 kurz dargestellt und in weiteren Meilensteinen näher beleuchtet.

Außerdem sollen die meteorologischen Betrachtungen des vorliegenden Berichts um die Analyse von weiteren Klimaprojektionen erweitert werden, um die hier dargestellten Ergebnisse zu festigen. Langfristig ist auch eine Übertragung der Untersuchungen auf die aktuellen und zukünftigen atmosphärischen Bedingungen der Ostsee angedacht.

7.2 Alternative Methodische Ansätze

7.2.1 Sturmflutrisiko Index

Ein weiterer, potentieller Ansatz um das Sturmflutrisiko in der deutschen Bucht bewerten zu können, ist ein meteorologisch basierter Sturmflutrisiko-Index (Storm Surge Risk Index; SSRI). In bisherigen Studien wurde bereits die Frage behandelt, wie Sturmflutsituationen erkannt werden können. Befort et al. (2015) zum Beispiel verwenden einen Sturm-Tracking-Algorithmus in Kombination mit hohen effektiven Windgeschwindigkeiten (Wind aus 295°), um Sturmflutsituationen in der Deutschen Bucht zu erkennen. Mit dieser Methode zeigen sie eine Verbesserung bei der Erkennung von Sturmflutereignissen. Außerdem wenden sie ihre Methodik mit vordefinierten Schwellenwerten erfolgreich auf drei Läufe eines Klimamodells an. Darüber hinaus haben Niehüser et al. (2018) ein statistisches Modell mit einem multiplen linearen Regressionsansatz auf Basis mehrerer Prädiktoren (Müller-Navarra und Giese 1999) erstellt, das die Wasserstände an bestimmten Pegelstandorten in der Deutschen Bucht korrekt beschreiben kann. Diese Modelle sind jedoch vergleichsweise komplex und erfordern eine große Anzahl von Eingangsvariablen für sehr spezifische Standorte oder Regionen. Daher wurden sie ausschließlich auf der Grundlage von Reanalysen eingesetzt.

Um das zukünftige Sturmflutrisiko abschätzen zu können und dementsprechend Klimaprojektionen zu berücksichtigen, wird in parallellaufenden Arbeiten am BSH ein einfaches statistisches Modell erarbeitet, das auf ein Multi-Modell-Ensemble von Klimamodell-Simulationen mit nur einer begrenzten Anzahl von verfügbaren Variablen und vergleichsweise grober räumlicher Auflösung anwendbar ist. Konkret handelt es sich dabei um einen rein windbasierten Sturmflutrisiko-Index für die Deutsche Bucht, der als solcher auch für Klimaprojektionen geeignet ist.

Im ersten Schritt wurde kritisch hinterfragt, inwiefern der effektive Wind (bei einer a priori festgelegten effektiven Windrichtung von 295°) eine geeignete Variable ist, und welche Region(en) der Nordsee dabei zu berücksichtigen sind. Für die Beantwortung dieser Fragen werden neben ERA5 auch Beobach-

tungen von Scheitelwasserständen während Sturmfluten für den Pegel Cuxhaven, sowie Abschätzungen des BSHs für den Windstau (also nur den windinduzierten Anteil des Wasserstandes) für den Zeitraum 1996 bis 2021 verwendet. Basierend auf ERA5 wird die flächengemittelten Effektivwindgeschwindigkeit über der Deutschen Bucht berechnet und anschließend der Höhe des aufgetretenen Windstaus zugeordnet. Da die Windschubspannung vom Quadrat der Windgeschwindigkeit abhängt, wird der Fokus auf positive Effektivwindgeschwindigkeiten gelegt, die bei der Berechnung der flächengemittelten Effektivwindgeschwindigkeit quadriert werden (siehe Abbildung 7-1).

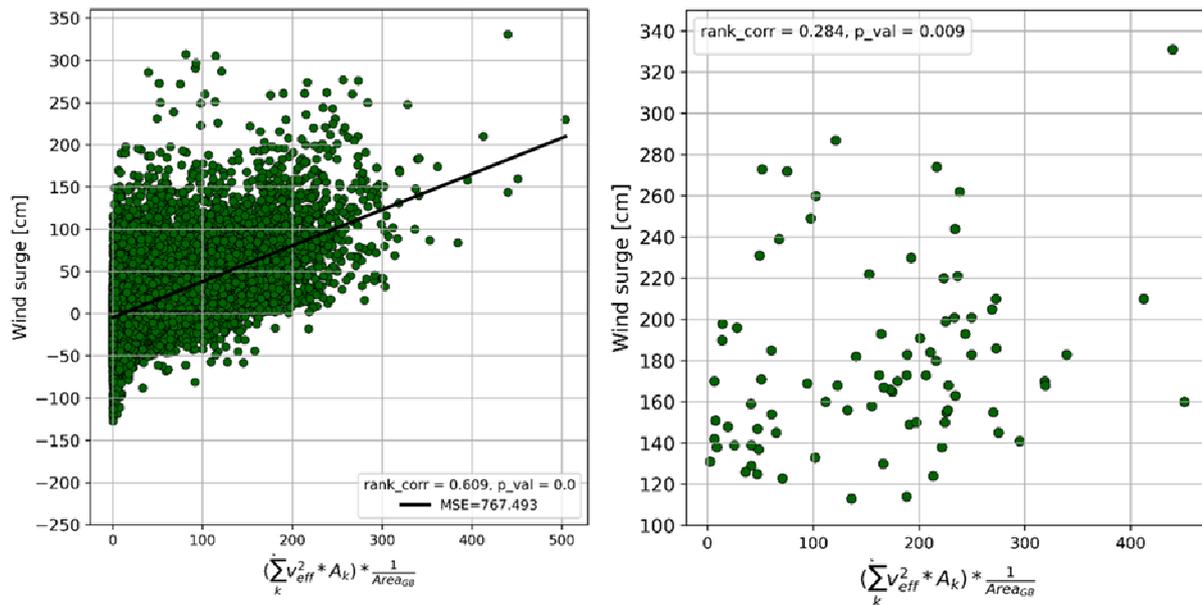


Abbildung 7-1 | Links: Korrelation zwischen der flächengemittelten Effektivwindgeschwindigkeit (ERA5) (X-Achse) über der Deutschen Bucht und dem Windstau (Y-Achse) in Cuxhaven. Rechts: Korrelation zwischen flächengemittelten Effektivwindgeschwindigkeiten (ERA5) (X-Achse) über der Deutschen Bucht und Windstau (Y-Achse) in Cuxhaven während einer Sturmflut.

Eine Korrelation von 0.609 zeigt einen guten Zusammenhang zwischen der flächengemittelten Effektivwindgeschwindigkeit und dem Windstau in Cuxhaven (siehe Abbildung 7-1, links). Werden jedoch ausschließlich Windstauhöhen mit den dazugehörigen Effektivwindgeschwindigkeiten während einer Sturmflut betrachtet, zeigt eine Korrelation von 0.284 einen vergleichsweise schwachen statistischen Zusammenhang zwischen der flächengemittelten Effektivwindgeschwindigkeit und dem eingetretenen Windstau (siehe Abbildung 7-1, rechts). Die alleinige Betrachtung des flächengemittelten effektiven Windes über der Deutschen Bucht ist somit kein ausreichender Indikator für Sturmfluthöhen in Cuxhaven.

Um herauszufinden inwiefern die Fläche außerhalb der Deutschen Bucht relevant für das Sturmflutrisiko ist, wird eine Composite Analyse durchgeführt. Dabei wird sich von der vorab festgelegten effektiven Windrichtung von 295° gelöst und die räumlich-zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeiten und -Richtungen über der gesamten Nordsee vor einer Sturmflut in Cuxhaven analysiert (siehe Abbildung 7-2): Über der kompletten Nordseeregion sind bis zu 11 Stunden vor Eintreten der Sturmflut starke Windgeschwindigkeiten (13m/s – 18m/s) zu sehen. Dabei wandert der ‚Hotspot‘ der starken Windgeschwindigkeiten vom westlichen Teil der Nordsee (11 Stunden vorher) in den östlichen Teil der Nordsee (1 Stunde vorher) (siehe Abbildung 7-2). Auch die Windrichtung über der Nordsee variiert in den 11 Stunden vor dem Sturmflutereignis. Die Windgeschwindigkeit- und richtung über der gesamten Nordseeregion könnte demnach relevant für Sturmfluten in Cuxhaven sein.

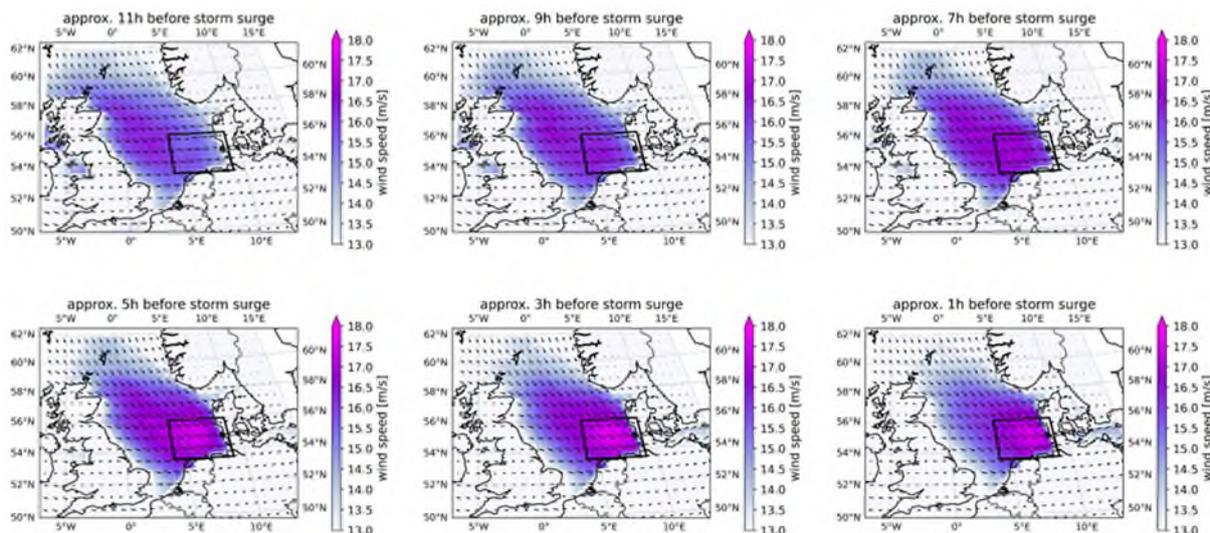


Abbildung 7-2 | Composite Analyse (basierend auf ERA5) der Sturmfluten von 1996 bis 2021 in Cuxhaven von einer Stunde vor der Sturmflut (unten rechts) bis 11 Stunden vor der Sturmflut (oben links) in einem zwei Stunden Abstand. Die Pfeile kennzeichnen die Windrichtung und die Farbskala (beginnend bei 13 m/s) stellt die Windgeschwindigkeit dar.

Mit den Erkenntnissen aus diesen Analysen (Schaffer et al. 2023) sollen nun die räumlich-zeitliche Informationen aus der Composite Analyse in einen Sturmflutrisiko Index für Cuxhaven übersetzt werden. Der SSRI soll mit Hilfe von Reanalysedaten sowie Beobachtungen des BSH erstellt und getestet werden. Um das zukünftige Sturmflutrisiko in der Deutschen Bucht abschätzen zu können, soll der SSRI anschließend auf Klimaprojektionen (CMIP6) angewendet werden. Mit dieser Analyse soll herausgefunden werden, wie sich die durch den anthropogenen Klimawandel forcierten Veränderungen auf das Sturmflutrisiko in der Deutschen Bucht auswirken.

7.2.2 Räumliche Interpolation von Extremwasserständen

Für einen zusätzlichen Informationsgewinn bietet sich die Beschreibung von Sturmfluten auch im Rahmen der Extremwertstatistik an. Anders als bei den bisher in diesem Bericht dargestellten Arbeiten liegt der Fokus hier allein auf der statistischen Auswertung und Modellierung von Wasserstandsdaten, ohne jegliche Berücksichtigung der konkreten meteorologischen Einflussfaktoren für einzelne Ereignisse. Das Ziel ist es, Abschätzungen für zu erwartende bzw. bei Planungen zu berücksichtigende extreme Wasserstände zu liefern, die allein aus den bisher beobachteten Wasserständen und ggf. bestimmten orts- oder zeitkonstanten Kovariaten abgeleitet werden. Als Methode wird hierbei der Block-Maxima Ansatz verwendet (Coles 2001). So wird beispielhaft die Zeitreihe der Tidehochwasser an der Pegelstation Cuxhaven in Monatsblöcke unterteilt und das Maximum der jeweiligen Blöcke gebildet. Die so erhaltene Zeitreihe von monatlichen Maxima lässt sich nach dem Theorem von Fisher und Tippett von der Generalisierten Extremwertverteilung (GEV) beschreiben, sofern geeignete Voraussetzungen erfüllt sind (Fisher und Tippett 1928).

Der weit verbreitete nächste Analyseschritt sieht nun vor, eine stationäre GEV zu nutzen, um hohe Quantile wie z.B. das 100-jährige Event an den einzelnen Stationen zu schätzen. Dieser Ansatz weist jedoch Schwächen auf (Calafat und Marcos 2020):

1. geschätzte Quantile sind nur an den jeweiligen Stationen verfügbar
2. Schätzungen sind durch eine geringe Anzahl an Datenpunkten sehr unsicher

Diese Nachteile werden überwunden, indem die Flexibilität der Maximum-Likelihood Parameter-Schätzung (MLE) genutzt wird, um zusätzliche Kovariaten bzw. erklärende Variablen einzuführen (Coles 2001). Da es sich bei einer Sturmflut um ein räumliches Phänomen handelt (Calafat und Marcos 2020), werden für die zu schätzenden Parameter der GEV (μ , σ , ξ) räumliche Kovariaten, wie z.B. Bathymetrie, geographische Länge und Breite herangezogen.

Über die Beschreibung der Parameter als Funktionen dieser räumlichen Kovariaten gelangt man zu den geschätzten Quantilen, die ebenfalls von den räumlichen Kovariaten abhängen. Man spricht hierbei von einem Vektor-Generalisierten-Linearen Modell (VGLM) (Yee 2015). Als Datengrundlage wurden monatliche Maxima an 32 Pegelstationen in der Deutschen Bucht genutzt. Bei dem hier dargestellten Stand der Arbeiten wurden die Kovariaten geographische Länge und Breite sowie die Bathymetrie im Untersuchungsgebiet der Deutschen Bucht genutzt.

Durch ein solches Modell können die oben genannten Schwächen bewältigt werden. Darüber hinaus ist durch das Modell die Möglichkeit gegeben, die geschätzten Quantile in der Fläche zu interpolieren. Im Klartext bedeutet dies, dass z.B. das 100-jährige Event auch abseits der Pegelstationen geschätzt werden kann (siehe Abbildung 7-3). Dieser Umstand bietet einen nennenswerten Vorteil, vor allem in Regionen, in denen wenige Stationen vorliegen (Arns et al. 2015).

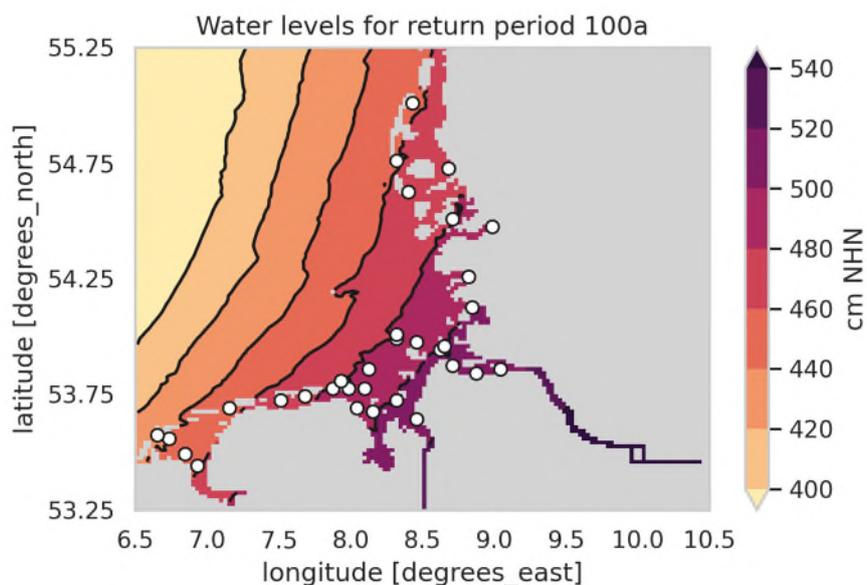


Abbildung 7-3 | Interpolierte Extremwasserstände für das 100-jährige Ereignis in der Deutschen Bucht. Pegelstationen als weiße Punkte.

Für eine erste Einschätzung der Güte dieses Flächen-Kovariaten-Modells vergleichen wir in Abbildung 7-4 die ermittelten Quantile aus dem Modell mit Flächen-Kovariaten an einer einzelnen, dem Modell nicht bekannten Station mit den Quantilen aus einem lokalen Referenzmodell, welches mit den Daten genau dieser Station trainiert wurde. Es zeigt sich, dass das Flächen-Kovariaten Modell im Rahmen der Unsicherheiten extremwertstatistische Schätzwerte vergleichbarer Güte liefern kann. Dieses exemplarische Ergebnis gilt es aktuell umfassend für alle verfügbaren Stationen zu überprüfen (Kreuzvalidierung). Darüber hinaus wird an einer weitergehenden Verbesserung des Flächen-Kovariaten-Modells gearbeitet.

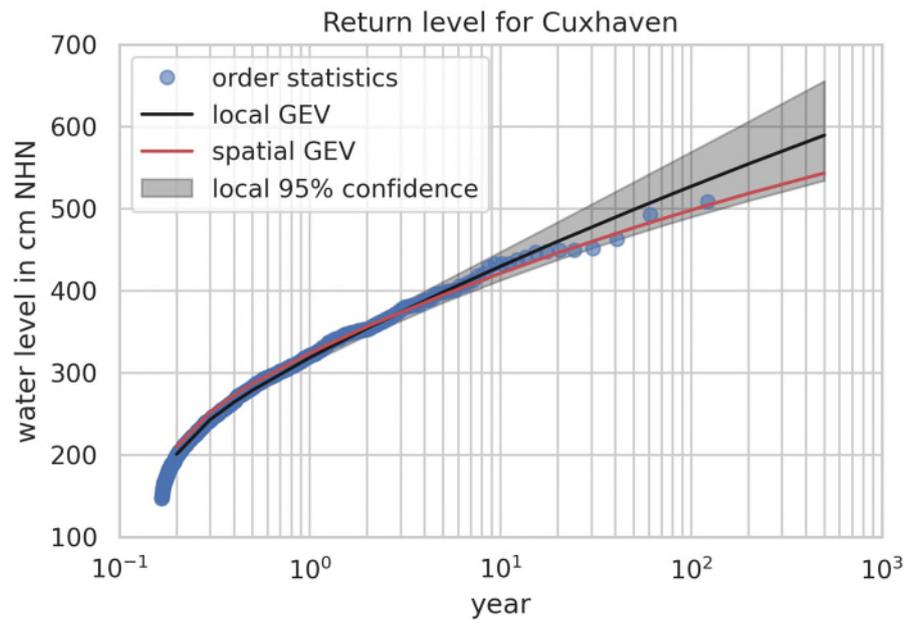


Abbildung 7-4 | Wiederkehrniveau Plot für die Station Cuxhaven. Flächen-Kovariaten Modell in Rot, Referenzmodell in Schwarz. Geordnete Monatsmaxima aus der Zeitreihe als blaue Punkte.

Literatur

Arns A, Wahl T, Haigh ID, and Jensen J (2015) Determining return water levels at ungauged coastal sites: a case study for northern Germany. *Ocean Dyn.* 65(4), 539–554. <https://doi.org/10.1007/s10236-015-0814-1>

Barnes EA, and Polvani L (2013) Response of the Midlatitude Jets, and of Their Variability, to Increased Greenhouse Gases in the CMIP5 Models. *J. Clim.* 26(18), 7117–7135. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00536.1>

Befort DJ, Fischer M, Leckebusch GC, Ulbrich U, Ganske A, Rosenhagen G, and Heinrich H (2015) Identification of storm surge events over the German Bight from atmospheric reanalysis and climate model data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 15(6), 1437–1447. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1437-2015>

Bengtsson L, Hodges KI, and Roeckner E (2006) Storm Tracks and Climate Change. *J. Clim.* 19(15), 3518–3543. <https://doi.org/10.1175/JCLI3815.1>

Boucher O, Servonnat J, Albright AL, Aumont O, Balkanski Y, Bastrikov V, Bekki S, Bonnet R, Bony S, Bopp L, Braconnot P, Brockmann P, Cadule P, Caubel A, Cheruy F, Codron F, Cozic A, Cugnet D, D'Andrea F, Davini P, de Lavergne C, Denvil S, Deshayes J, Devilliers M, Ducharne A, Dufresne J, Dupont E, Éthé C, Fairhead L, Falletti L, Flavoni S, Foujols M, Gardoll S, Gastineau G, Ghattas J, Grandpeix J, Guenet B, Guez L E, Guilyardi E, Guimberteau M, Hauglustaine D, Hourdin F, Idelkadi A, Jousaume S, Kageyama M, Khodri M, Krinner G, Lebas N, Levvasseur G, Lévy C, Li L, Lott F, Lurton T, Luysaert S, Madec G, Madeleine J, Maignan F, Marchand M, Marti O, Mellul L, Meurdesoif Y, Mignot J, Musat I, Ottlé C, Peylin P, Planton Y, Polcher J, Rio C, Rochetin N, Rousset C, Sepulchre P, Sima A, Swingedouw D, Thiéblemont R, Traore AK, Vancoppenolle M, Vial J, Vialard J, Viovy N, and Vuichard N (2020) Presentation and Evaluation of the IPSL-CM6A-LR Climate Model. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 12(7), e2019MS002010. <https://doi.org/10.1029/2019MS002010>

Buthe B, Jakubowski DP, and Pütz T (n.d.) BBSR-Analysen KOMPAKT 06/2015.

Calafat FM, and Marcos M (2020) Probabilistic reanalysis of storm surge extremes in Europe. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 117(4), 1877–1883. <https://doi.org/10.1073/pnas.1913049117>

Cherchi A, Fogli PG, Lovato T, Peano D, Iovino D, Gualdi S, Masina S, Scoccimarro E, Materia S, Bellucci A, and Navarra A (2018) Global mean climate and main patterns of variability in the CMCC-CM2 coupled model. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2018MS001369. <https://doi.org/10.1029/2018MS001369>

Coles S (2001) An introduction to statistical modeling of extreme values, Springer series in statistics. Springer, London Berlin Heidelberg.

Demuzere M, Werner M, van Lipzig NPM, and Roeckner E (2009) An analysis of present and future ECHAM5 pressure fields using a classification of circulation patterns. *Int. J. Climatol.* 29(12), 1796–1810. <https://doi.org/10.1002/joc.1821>

Donat M, Leckebusch G, Pinto J, and Ulbrich U (2010) European storminess and associated circulation weather types: future changes deduced from a multi-model ensemble of GCM simulations. *Clim. Res.* 42(1), 27–43. <https://doi.org/10.3354/cr00853>

Döscher R, Acosta M, Alessandri A, Anthoni P, Arsouze T, Bergman T, Bernardello R, Boussetta S, Caron L-P, Carver G, Castrillo M, Catalano F, Cvijanovic I, Davini P, Dekker E, Doblas-Reyes FJ, Docquier D, Echevarria P, Fladrich U, Fuentes-Franco R, Gröger M, v. Hardenberg J, Hieronymus J, Karami MP, Keskinen J-P, Koenigk T, Makkonen R, Massonnet F, Ménégos M, Miller PA, Moreno-Chamarro E, Nieradzic L, van Noije T, Nolan P, O'Donnell D, Ollinaho P, van den Oord G, Ortega P, Prims OT, Ramos A, Reerink T, Rousset C, Ruprich-Robert Y, Le Sager P, Schmith T, Schrödner R, Serva F, Sicardi V, Sloth Madsen M, Smith B, Tian T, Tourigny E, Uotila P, Vancoppenolle M, Wang S, Wårlind D, Willén U, Wyser K, Yang S,

Yepes-Arbós X, and Zhang Q (2022) The EC-Earth3 Earth system model for the Coupled Model Intercomparison Project 6. *Geosci. Model Dev.* 15(7), 2973–3020. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2973-2022>

Eyring V, Bony S, Meehl GA, Senior CA, Stevens B, Stouffer RJ, and Taylor KE (2016) Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.* 9(5), 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>

Fisher RA, and Tippett LHC (1928) Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. *Math. Proc. Camb. Philos. Soc.* 24(2), 180–190. <https://doi.org/10.1017/S0305004100015681>

Ganske A (2019a) Validation von Windfeldergebnissen auf See und an der Küste aus regionalen gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Klimamodellen. Meilenstein M104a-2, Themenfeld 1 'Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen', Schwerpunktthema SP-104 'Sturmgefahren'.

Ganske A (2019b) Analyse von Windfeldergebnissen auf See und an der Küste aus regionalen gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Klimamodellen. Meilenstein M104a-4, Themenfeld 1 'Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen', Schwerpunktthema SP-104 'Sturmgefahren'.

Ganske A, Fery N, Gaslikova L, Grabemann I, Weisse R, and Tinz B (2018) Identification of extreme storm surges with high-impact potential along the German North Sea coastline. *Ocean Dyn.* 68(10), 1371–1382. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1190-4>

Gerber M, Ganske A, Müller-Navarra S, and Rosenhagen G (2016) Categorisation of Meteorological Conditions for Storm Tide Episodes in the German Bight. *Meteorol. Z.* 25(4), 447–462. <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0660>

Harvey BJ, Cook P, Shaffrey LC, and Schiemann R (2020) The Response of the Northern Hemisphere Storm Tracks and Jet Streams to Climate Change in the CMIP3, CMIP5, and CMIP6 Climate Models. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 125(23), . <https://doi.org/10.1029/2020JD032701>

Herrera-Lormendez P, Mastrantonas N, Douville H, Hoy A, and Matschullat J (2022) Synoptic circulation changes over Central Europe from 1900 to 2100: Reanalyses and Coupled Model Intercomparison Project phase 6. *Int. J. Climatol.* 42(7), 4062–4077. <https://doi.org/10.1002/joc.7481>

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Nicolas J, Peubey C, Radu R, Schepers D, Simmons A, Soci C, Abdalla S, Abellan X, Balsamo G, Bechtold P, Biavati G, Bidlot J, Bonavita M, Chiara G, Dahlgren P, Dee D, Diamantakis M, Dragani R, Flemming J, Forbes R, Fuentes M, Geer A, Haimberger L, Healy S, Hogan RJ, Hólm E, Janisková M, Keeley S, Laloyaux P, Lopez P, Lupu C, Radnoti G, Rosnay P, Rozum I, Vamborg F, Villaume S, and Thépaut J (2020) The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Huguenin MF, Fischer EM, Kotlarski S, Scherrer SC, Schwierz C, and Knutti R (2020) Lack of Change in the Projected Frequency and Persistence of Atmospheric Circulation Types Over Central Europe. *Geophys. Res. Lett.* 47(9), . <https://doi.org/10.1029/2019GL086132>

Intergovernmental Panel on Climate Change (2023a) *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1st ed. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Intergovernmental Panel on Climate Change (2023b) *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1st ed. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Ed.) (2022a) Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities, in: *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 321–446. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.006>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Ed.) (2022b) Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities, in: *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 321–446. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.006>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022c) *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1st ed. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>
- Jenkinson A, and Collison F (1977) An initial climatology of gales over the North Sea. *Synop. Climatol. Branch Memo*. 6218.
- Jensen C (2019) Wetterlagen über der Nordsee. Bericht zum Meilenstein M108b-2 des SP-108 im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks.
- Jensen C, Mahavadi T, Schade NH, Hache I, and Kruschke T (2022) Negative Storm Surges in the Elbe Estuary—Large-Scale Meteorological Conditions and Future Climate Change. *Atmosphere* 13(10), 1634. <https://doi.org/10.3390/atmos13101634>
- Jensen J, Frank T, and Wahl T (2011) Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL).
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo KC, Ropelewski C, Wang J, Leetmaa A, Reynolds R, Jenne R, and Joseph D (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 77(3), 437–472. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
- Kew SF, Selten FM, Lenderink G, and Hazeleger W (2013) The simultaneous occurrence of surge and discharge extremes for the Rhine delta. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13(8), 2017–2029. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2017-2013>
- Koziar C, Renner V, and Wetterdienst D (2006) KFKI-Projekt: MUSE. Deutscher Wetterdienst, Hamburg.
- Lamb HH (1950) Types and spells of weather around the year in the British Isles: annual trends, seasonal structure of the year, singularities. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 76(330), 393–429. <https://doi.org/10.1002/qj.49707633005>
- Loewe P (2022) Lamb weather types (reduced set) and gale days over the North Sea since 1948 based on NCEP/NCAR Reanalysis 1 daily mean sea level pressure fields. <https://doi.org/10.26050/WDC/LambWTyRSetAndGaleDaysOverTheNo>
- 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 (Ed.) (2005) *Nordseezustand 2003*, Berichte des BSH, Nr. 38, 220p. <https://www.bsh.de/download/Berichte-des-BSH-38.pdf>.
- Löwe P, Klein H, and Weigelt-Krenz S (Eds.) (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>.
- Mauritsen T, Bader J, Becker T, Behrens J, Bittner M, Brokopf R, Brovkin V, Claussen M, Crueger T, Esch M, Fast I, Fiedler S, Fläschner D, Gayler V, Giorgetta M, Goll DS, Haak H, Hagemann S, Hedemann C, Hohenegger C, Ilyina T, Jahns T, Jimenéz-de-la-Cuesta D, Jungclaus J, Kleinen T, Kloster S, Kracher D, Kinne S, Kleberg D, Lasslop G, Kornbluh L, Marotzke J, Matei D, Meraner K, Mikolajewicz U, Modali K,

- Möbis B, Müller WA, Nabel JEMS, Nam CCW, Notz D, Nyawira S, Paulsen H, Peters K, Pincus R, Pohlmann H, Pongratz J, Popp M, Raddatz TJ, Rast S, Redler R, Reick CH, Rohrschneider T, Schemann V, Schmidt H, Schnur R, Schulzweida U, Six KD, Stein L, Stemmler I, Stevens B, Storch J, Tian F, Voigt A, Vrese P, Wieners K, Wilkenskjeld S, Winkler A, and Roeckner E (2019) Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-ESM1.2) and Its Response to Increasing CO₂. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 11(4), 998–1038. <https://doi.org/10.1029/2018MS001400>
- Mbengue C, and Schneider T (2013) Storm Track Shifts under Climate Change: What Can Be Learned from Large-Scale Dry Dynamics. *J. Clim.* 26(24), 9923–9930. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00404.1>
- Müller-Navarra SH, and Giese H (1999) Improvements of an empirical model to forecast wind surge in the German Bight. *Dtsch. Hydrogr. Z.* 51(4), 385–405. <https://doi.org/10.1007/BF02764162>
- Niehüser S, Dangendorf S, Arns A, and Jensen J (2018) A NOVEL HIGH-RESOLUTION STORM SURGE FORECAST FOR THE GERMAN BIGHT. *Coast. Eng. Proc.* (36), 80. <https://doi.org/10.9753/icce.v36.currents.80>
- O’Neill BC, Tebaldi C, van Vuuren DP, Eyring V, Friedlingstein P, Hurtt G, Knutti R, Kriegler E, Lamarque J-F, Lowe J, Meehl GA, Moss R, Riahi K, and Sanderson BM (2016) The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.* 9(9), 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Plavcová E, and Kyselý J (2013) Projected evolution of circulation types and their temperatures over Central Europe in climate models. *Theor. Appl. Climatol.* 114(3–4), 625–634. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0874-4>
- Priestley MDK, Ackerley D, Catto JL, Hodges KI, McDonald RE, and Lee RW (2020) An Overview of the Extratropical Storm Tracks in CMIP6 Historical Simulations. *J. Clim.* 33(15), 6315–6343. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0928.1>
- Priestley MDK, and Catto JL (2022) Future changes in the extratropical storm tracks and cyclone intensity, wind speed, and structure. *Weather Clim. Dyn.* 3(1), 337–360. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-337-2022>
- Riahi K, van Vuuren DP, Kriegler E, Edmonds J, O’Neill BC, Fujimori S, Bauer N, Calvin K, Dellink R, Fricko O, Lutz W, Popp A, Cuaresma JC, Kc S, Leimbach M, Jiang L, Kram T, Rao S, Emmerling J, Ebi K, Hasegawa T, Havlik P, Humpenöder F, Da Silva LA, Smith S, Stehfest E, Bosetti V, Eom J, Gernaat D, Masui T, Rogelj J, Strefler J, Drouet L, Krey V, Luderer G, Harmsen M, Takahashi K, Baumstark L, Doelman JC, Kainuma M, Klimont Z, Marangoni G, Lotze-Campen H, Obersteiner M, Tabeau A, and Tavoni M (2017) The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Glob. Environ. Change* 42153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Riediger U, and Gratzki A (2014) Future weather types and their influence on mean and extreme climate indices for precipitation and temperature in Central Europe. *Meteorol. Z.* 23(3), 231–252. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2014/0519>
- Schade NH (2017) Evaluating the atmospheric drivers leading to the December 2014 flood in Schleswig-Holstein, Germany. *Earth Syst. Dyn.* 8(2), 405–418. <https://doi.org/10.5194/esd-8-405-2017>
- Schade NH, Hüttl-Kabus S, Hohenrainer J, Jensen C, Löwe P, Möller J, Tinz B, Wachler B, Ganske A, and Heinrich H (2020) Klimaänderungen und Klimafolgebetrachtungen für das Bundesverkehrssystem im Küstenbereich - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusgebiete Küsten (SP-108) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks.
- Schaffer L, Becker N, Schenk L, Hinrichs C, Ditzinger G, Schade NH, Befort DJ, and Kruschke T (2023) Objective assessment of storm surge risk in the German Bight – historical events and future climate change (other). *oral*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-7236>

Stryhal J, and Huth R (2019) Trends in winter circulation over the British Isles and central Europe in twenty-first century projections by 25 CMIP5 GCMs. *Clim. Dyn.* 52(1–2), 1063–1075. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4178-3>

Tatebe H, Ogura T, Nitta T, Komuro Y, Ogochi K, Takemura T, Sudo K, Sekiguchi M, Abe M, Saito F, Chikira M, Watanabe S, Mori M, Hirota N, Kawatani Y, Mochizuki T, Yoshimura K, Takata K, O'ishi R, Yamazaki D, Suzuki T, Kurogi M, Kataoka T, Watanabe M, and Kimoto M (2019) Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geosci. Model Dev.* 12(7), 2727–2765. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>

Tsujino H, Nakano H, Sakamoto K, Urakawa S, Hirabara M, Ishizaki H, and Yamanaka G (2017) Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model version 4 (MRI.COMv4). *Tech. Rep. Meteorol. Res. Inst.* 80 306 Pp. <https://doi.org/10.11483/mritechrepo.80>

Voltaire A, Saint-Martin D, Sénési S, Decharme B, Alias A, Chevallier M, Colin J, Guérémy J -F., Michou M, Moine M -P., Nabat P, Roehrig R, Salas y Méliá D, Séférian R, Valcke S, Beau I, Belamari S, Berthet S, Cassou C, Cattiaux J, Deshayes J, Douville H, Ethé C, Franchistéguy L, Geoffroy O, Lévy C, Madec G, Meurdesoif Y, Msadek R, Ribes A, Sanchez-Gomez E, Terray L, and Waldman R (2019) Evaluation of CMIP6 DECK Experiments With CNRM-CM6-1. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 11(7), 2177–2213. <https://doi.org/10.1029/2019MS001683>

Wu Y, Ting M, Seager R, Huang H-P, and Cane MA (2011) Changes in storm tracks and energy transports in a warmer climate simulated by the GFDL CM2.1 model. *Clim. Dyn.* 37(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0776-4>

Yee TW (2015) *Vector Generalized Linear and Additive Models: With an Implementation in R*, Springer Series in Statistics. Springer New York, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2818-7>

Yukimoto S, Kawai H, Koshiro T, Oshima N, Yoshida K, Urakawa S, Tsujino H, Deushi M, Tanaka T, Hosaka M, Yabu S, Yoshimura H, Shindo E, Mizuta R, Obata A, Adachi Y, and Ishii M (2019) The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component. *J. Meteorol. Soc. Jpn. Ser II* 97(5), 931–965. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-051>

Zappa G, and Shepherd TG (2017) Storylines of Atmospheric Circulation Change for European Regional Climate Impact Assessment. *J. Clim.* 30(16), 6561–6577. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0807.1>

Anhang

A.1 Verwendete CMIP6 Datensätze

Tabelle A-1 | Verwendete CMIP6 Datensätze und ihre jeweiligen Referenzen (Datenzitate)

GCM	Datenzitate
CMCC-CM2-SR5	Lovato, Tomas; Peano, Daniele (2020). <i>CMCC CMCC-CM2-SR5 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP</i> . Version 20220627. Earth System Grid Federation. https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1365
CNRM-CM6-1-HR	Voltaire, Aurore (2019). <i>CNRM-CERFACS CNRM-CM6-1-HR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP</i> . Version 20220617. Earth System Grid Federation. https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1388
EC-Earth3	EC-Earth Consortium (EC-Earth) (2019). <i>EC-Earth-Consortium EC-Earth3 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP</i> . Version 20220603. Earth System Grid Federation. https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.251
IPSL-CM6A-LR	Boucher, Olivier; Denvil, Sébastien; Levassieur, Guillaume; Cozic, Anne; Caubel, Arnaud; Foujols, Marie-Alice; Meurdesoif, Yann; Cadule, Patricia; Devilliers, Marion; Dupont, Eliott; Lurton, Thibaut (2019). <i>IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP</i> . Version 20220603. Earth System Grid Federation. https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1532
MIROC6	Shiogama, Hideo; Abe, Manabu; Tatebe, Hiroaki (2019). <i>MIROC MIROC6 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP</i> . Version 20220610. Earth System Grid Federation. https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.898
MPI-ESM1-2-LR	Wieners, Karl-Hermann; Giorgetta, Marco; Jungclaus, Johann; Reick, Christian; Esch, Monika; Bittner, Matthias; Gayler, Veronika; Haak, Helmuth; de Vrese, Philipp; Raddatz, Thomas; Mauritsen, Thorsten; von Storch, Jin-Song; Behrens, Jörg; Brovkin, Victor; Claussen, Martin; Crueger, Traute; Fast, Irina; Fiedler, Stephanie; Hagemann, Stefan; Hohenegger, Cathy; Jahns, Thomas; Kloster, Silvia; Kinne, Stefan; Lasslop, Gitta; Kornblueh, Luis; Marotzke, Jochem; Matei, Daniela; Meraner, Katharina; Mikolajewicz, Uwe; Modali, Kameswarrao; Müller, Wolfgang; Nabel, Julia; Notz, Dirk; Peters-von Gehlen, Karsten; Pincus, Robert; Pohlmann, Holger; Pongratz, Julia; Rast, Sebastian; Schmidt, Hauke; Schnur, Reiner; Schulzweida, Uwe; Six, Katharina; Stevens, Bjorn; Voigt, Aiko; Roeckner, Erich (2019). <i>MPI-M MPIESM1.2-LR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP</i> . Version 20220616. Earth System Grid Federation. https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.793
MRI-ESM2-0	Yukimoto, Seiji; Koshiro, Tsuyoshi; Kawai, Hideaki; Oshima, Naga; Yoshida, Kohei; Urakawa, Shogo; Tsujino, Hiroyuki; Deushi, Makoto; Tanaka, Taichu; Hosaka, Masahiro; Yoshimura, Hiromasa; Shindo, Eiki; Mizuta, Ryo; Ishii, Masayoshi; Obata, Atsushi; Adachi, Yukimasa (2019). <i>MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP</i> . Version 20220807. Earth System Grid Federation. https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.638

A.2 Änderungen der Wetterlagen im CMIP6-Ensemble

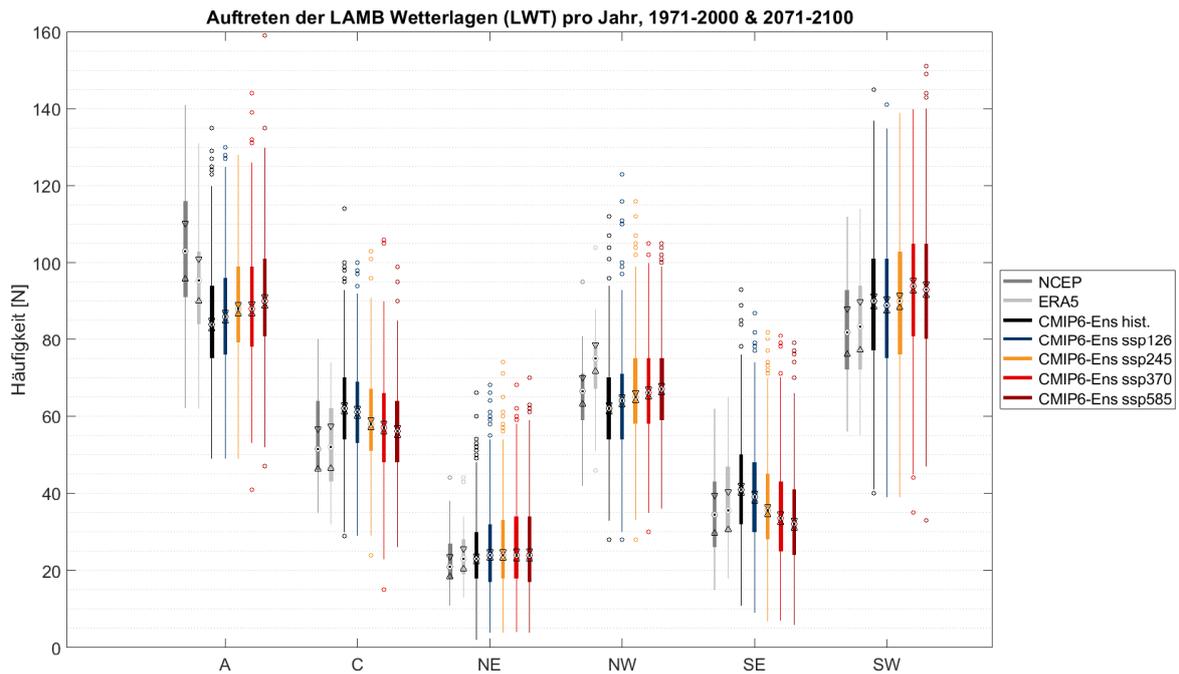


Abbildung A-1 | Boxplots zum Auftreten der Lamb Wetterlagen (LWT) basierend auf tagesgemittelten Bodenluftdruckdaten von NCEP/NCAR R1 (dunkelgrau), ERA5 (hellgrau) und des 23-Member CMIP6-Ens (schwarz) für den Zeitraum 1971–2000, sowie der jeweiligen Läufe für die SSP-Szenarien 1–2.6 (blau), 2–4.5 (orange), 3–7.0 (hellrot) und 5–8.5 (dunkelrot) für die ferne Zukunft (2071–2100).

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
C	Zyklonal
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
DWD	Deutscher Wetterdienst
G	„Gale“, Sturm
GEV	Generalisierte Extremwertverteilung
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"
LWT	„Lamb Weather Type“, Lamb-Wetterklasse
MLE	Maximum-Likelihood Parameter-Schätzung
MThw	Mittleres Tidehochwasser
NE	Nord-Ost
NUL	„No Gale“, kein Sturm
NW	Nord-West
ProWaS	Klimawandel-Projektionsdienst für Wasserstraßen und Schifffahrt (Projektionsdienst des BMVI); Pilotprojekt zum DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“
SE	Süd-Ost
SG	„Severe Gale“, starker Sturm
SLP	„Sea Level Pressure“, Luftdruck auf Meeresniveau
SLR	Meeresspiegelanstieg
SSP	„Shared Socioeconomic Pathways“, gemeinsame sozioökonomische Entwicklungspfade
SW	Süd-West
Thw	Tidehochwasser
VGLM	Vektor Generalisiertes Lineares Modell
VSG	„Very Severe Gale“, sehr starker Sturm
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1 Lage der 16 Gitterpunkte, die zur Berechnung der Lamb-Wetterlagen verwendet werden.	8
Abbildung 4-1 Links: Mittlere Verteilung der Lamb-Wetterlagen, berechnet aus Tagesmitteln des NCEP/NCAR R1 Luftdrucks auf Meeresniveau, für den gesamten untersuchten Zeitraum von 1951 bis 2022. Rechts: Mittlere Verteilung der Lamb-Wetterlagen bei Sturmfluten am Pegel Cuxhaven (mindestens 150 cm über dem MThw) im selben Zeitraum. Fand die Sturmflut in der Zeit zwischen 0 und 6 Uhr morgens statt wurde die Wetterlage am Tag zuvor als Auslöser der Sturmflut gewertet. . 10	10
Abbildung 4-2 Links: Mittlere Verteilung der Lamb-Sturmklassen, berechnet aus Tagesmitteln des NCEP/NCAR R1 Luftdrucks auf Meeresniveau für den gesamten untersuchten Zeitraum von 1951 bis 2022. Rechts: Mittlere Verteilung der Lamb-Sturmklassen bei Sturmfluten am Pegel Cuxhaven (mindestens 150 cm über dem MThw) im selben Zeitraum.	11
Abbildung 4-3 Normalisierte Verteilung des effektiven geostrophischen Windes, bestimmt aus dem tagesgemittelten Bodenluftdruckfeld der NCEP/NCAR R1 und projiziert auf 295° für den gesamten Zeitraum 1951-2022 (blau) und bei Sturmfluten (orange).	12
Abbildung 5-1 Boxplots zum Auftreten (a) der Lamb-Wetterlagen (LWT) SW,C,NW, (b) der Sturmindizes, die mit "Gale", "Severe Gale" oder "Very Severe Gale" bestimmt wurden, und (c) der effektiven Windgeschwindigkeiten ≥ 95 . Perzentil für NCEP/NCAR R1 (dunkelgrau), ERA5 (hellgrau) und das 23-Member CMIP6-Ens (schwarz) für den Zeitraum 1971–2000, sowie die jeweiligen Läufe für die SSP-Szenarien 1–2.6 (blau), 2–4.5 (orange), 3–7.0 (hellrot) und 5–8.5 (dunkelrot) für die ferne Zukunft (2071–2100). Die Boxplots zeigen den Median (schwarzer Punkt), die interquartile Spannweite (25.–75. Perzentil, Box), die Extreme, d.h., ungefähr $\pm 2,7$ fache Standardabweichung und 99,3 Abdeckung, der Verteilung (Whiskers), sowie „Outliers“ (Kreise). Die Einbuchtungen, dargestellt als Dreiecke um den Median herum, entsprechen $q_2 - 1,57 (q_3 - q_1) / \sqrt{n}$ und $q_2 + 1,57 (q_3 - q_1) / \sqrt{n}$, wobei q_2 den Median (50. Perzentil), q_1 und q_3 das 25. and 75. Perzentil und n die Anzahl der Werte beschreiben.	13
Abbildung 7-1 Links: Korrelation zwischen der flächengemittelten Effektivwindgeschwindigkeit (ERA5) (X-Achse) über der Deutschen Bucht und dem Windstau (Y-Achse) in Cuxhaven. Rechts: Korrelation zwischen flächengemittelten Effektivwindgeschwindigkeiten (ERA5) (X-Achse) über der Deutschen Bucht und Windstau (Y-Achse) in Cuxhaven während einer Sturmflut	19
Abbildung 7-2 Composite Analyse (basierend auf ERA5) der Sturmfluten von 1996 bis 2021 in Cuxhaven von einer Stunde vor der Sturmflut (unten rechts) bis 11 Stunden vor der Sturmflut (oben links) in einem zwei Stunden Abstand. Die Pfeile kennzeichnen die Windrichtung und die Farbskala (beginnend bei 13 m/s) stellt die Windgeschwindigkeit dar.	20
Abbildung 7-3 Interpolierte Extremwasserstände für das 100-jährige Ereignis in der Deutschen Bucht. Pegelstationen als weiße Punkte.	21
Abbildung 7-4 Wiederkehrniveau Plot für die Station Cuxhaven. Flächen-Kovariaten Modell in Rot, Referenzmodell in Schwarz. Geordnete Monatsmaxima aus der Zeitreihe als blaue Punkte.	22
Abbildung A-1 Boxplots zum Auftreten der Lamb Wetterlagen (LWT) basierend auf tagesgemittelten Bodenluftdruckdaten von NCEP/NCAR R1 (dunkelgrau), ERA5 (hellgrau) und des 23-Member CMIP6-	

Ens (schwarz) für den Zeitraum 1971–2000, sowie der jeweiligen Läufe für die SSP-Szenarien 1–2.6 (blau), 2–4.5 (orange), 3–7.0 (hellrot) und 5–8.5 (dunkelrot) für die ferne Zukunft (2071–2100)..... 29