KLIWAS
Klima · Wasser · Schifffahrt

KLIWAS Schriftenreihe
KLIWAS-61/2014

Potentielle Auswirkungen des Klimawandels auf das Sturmflutrisiko an der deutschen Nordseeküste

Untersuchung der zeitlichen Veränderung im Zeitraum 1900 bis 2099

Koblenz, im Februar 2014

Freie Universität Berlin

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden.
Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BfG.

KLIWAS Schriftenreihe
KLIWAS-61/2014

Potentielle Auswirkungen des Klimawandels auf das Sturmflutrisiko an der deutschen Nordseeküste

Untersuchung der zeitlichen Veränderung im Zeitraum 1900 bis 2099

Autoren:

M. Fischer*, D.J. Befort*, U. Ulbrich*

***Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin**

DOI:
10.5675/Kliwas_61/2014_Sturmflutrisiko

Seite

Kapitel

Inhaltsverzeichnis

05 1 EINLEITUNG

06 1.1 PROJEKTSTRUKTUR

08 2 DATENGRUNDLAGE

09 3 VERBESSERTE STURMIDENTIFIKATIONEN

09 3.1 IDENTIFIKATIONSALGORITHMUS

09 3.1.1 UNTERSUCHUNGSGEBIETE

09 3.1.2 INPUTDATEN

11 3.1.3 FUNKTIONSWEISE

12 3.1.4 OPTIMIERUNGEN

12 3.2 ZUORDNUNG VON HISTORISCHEN STURMFLUTEREIGNISSEN

17 4 IDENTIFIKATION STURMFLUTRELEVANTER EREIGNISSE IN ECHAM5

17 4.1 ANZAHL STURMFLUTRELEVANTER EREIGNISSE

20 4.2 ANDAUER DER STURMEREIGNISSE

21 4.3 STÄRKE DER POTENTIELLEN STURMFLUTEREIGNISSE

21 4.4 SAISONALE VARIATIONEN

25 4.5 WIEDERKEHRWERTE

30 5 CCLM SIMULATIONEN

31 5.1 CCLM SIMULATIONEN ANGETRIEBEN MIT ERA-INTERIM REANALYSEN

35 5.2 CCLM SIMULATIONEN ANGETRIEBEN ECHAM5

38 6 ZUSAMMENFASSUNG

41 7 AUSBLICK

42 8 LITERATUR

Seite Abbildung

Abbildungsverzeichnis

Seite	Abbildung	
10	1	FÜR DIE UNTERSUCHUNG VERWENDETE REGIONEN: ÄUßERE UND INNERE BOX ZUR IDENTIFIKATION VON STURMEREIGNISSEN
10	2	GITTERPUNKTE IN DER REGION NORDSEE UND GITTERPUNKTE IN DER REGION DEUTSCHE BUCHT MIT EINEM LANDANTEIL VON WENIGER ALS 20% FÜR ERA40 UND ECHAM5
11	3	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG ZUR BERECHNUNG DES EFFEKTIVWINDES DURCH PROJEKTION DES HORIZONTALEN WINDVEKTORS AUF DIE RICHTUNG 295°
15	4	HISTOGRAMM DER ANZAHL DER TRACKS BEZÜGLICH DER MAXIMALEN EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEIT SOWIE DER STURMFLUTTRACKS
18	5	ANZAHL DER STURMFLUTRELEVANTEN EREIGNISSE PRO JAHR VON 1900 BIS 2100 FÜR DIE 3 REALISIERUNGEN VON 20C UND VON A1B
19	6	30-JAHRE GLEITENDES MITTEL DER ANZAHL STURMFLUTRELEVANTER EREIGNISSE PRO JAHR VON 1915 BIS 2085
20	7	ANZAHL DER EREIGNISSE BEZÜGLICH IHRER ÜBERSCHREITUNG DES SCHWELLWERTES VON 9,837 M/S ÜBER DER REGION DEUTSCHE BUCHT FÜR DIE ZWEI DATENSÄTZE 20C UND A1B
20	8	ANZAHL DER STURMFLUTRELEVANTEN TRACKS BEZÜGLICH IHRER ANZAHL AN ZEITSCHRITTEN MIT ÜBERSCHREITUNGEN DER KRITISCHEN EFFEKTIVEN WINDGESCHWINDIGKEIT SOWIE DER PROZENTUALE ANTEIL AN ÜBERSCHREITUNGEN VON 20C UND A1B BEZÜGLICH DER GESAMTANZAHL AN TRACKS IN DEM JEWEILIGEN JAHRHUNDERT
23	9	MEDIAN, 0,95-QUANTIL UND MAXIMUM DER EFFEKTIVWINDGESCHWINDIG-KEITEN GRÖßER 9,837 M/S FÜR JEDES JAHR VON 1900 BIS 2100 FÜR DAS MITTEL AUS DEN 20C-LÄUFEN UND DAS MITTEL AUS DEN A1B-LÄUFEN
24	10	BOX-WHISKER-PLOTS DER EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEITEN GEMITTELT ÜBER DIE DEUTSCHE BUCHT GRÖßER DEM SCHWELLWERT VON 9,837 M/S
26	11	MEAN RESIDUAL LIFE PLOT FÜR DIE EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEITEN ALLER 20C-LÄUFE
27	12	MODELLDIAGNOSE MIT PROBABILITY PLOT, QUANTIL PLOT, RETURN LEVEL PLOT UND DER WAHRSCHEINLICHKEITSDICHTEVERTEILUNG FÜR DEN SCHWELLWERT VON 9,837 M/S UND DEN SCHWELLWERT VON 18 M/S DER 20C-LÄUFE

Seite Abbildung

Abbildungsverzeichnis

Seite	Abbildung	
28	13	WIEDERKEHRWERTE IN M/S FÜR VERSCHIEDENE WIEDERKEHRPERIODEN IN JAHRE FÜR DIE LÄUFE VON 20C (1901–2000) UND VON A1B (2001–2100)
29	14	ANZAHL DES AUFTRETENS DER EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEITEN VON 18 M/S BIS 26 M/S FÜR DIE 20C-LÄUFE UND A1B-LÄUFE
30	15	VERWENDETE MODELLREGION FÜR ZENTRALE REALISIERUNG
33	16	VERGLEICH VON WINDGESCHWINDIGKEIT WINDRICHTUNG UND EFFEKTIV-WINDGESCHWINDIGKEIT FÜR DIE STURMFLUT VOM NOVEMBER 1981 FÜR CCLM ANGETRIEBEN MIT ERA-40 BZW. ERA-INTERIM SOWIE BEOBACHTUNGEN AN DER STATION SCHARHÖRN
34	17	BOX-WHISKER-PLOTS VON WINDGESCHWINDIGKEIT IN M/S WINDRICHTUNG IN GRAD UND EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEIT IN M/S FÜR ALLE 14 STURMFLUTEREIGNISSE FÜR CCLM ANGETRIEBEN MIT ERA-40 BZW. ERA-INTERIM SOWIE BEOBACHTUNGEN AN DER STATION SCHARHÖRN
35	18	MAXIMALE AUFGETRETENE EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEIT ÜBER DER DEUTSCHEN BUCHT REGION IN DEN 5 CCLM ENSEMBLEMITGLIEDERN FÜR ALLE 15 SIMULATIONEN MIT ERA-INTERIM ANTRIEB AUS TABELLE 4
37	19	MAXIMAL AUFGETRETENE EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEIT ÜBER DER DEUTSCHEN BUCHT REGION IN ECHAM5 SOWIE DEN 5 CCLM ENSEMBLEMITGLIEDERN

Seite

Tabelle

Tabellenverzeichnis

Seite	Tabelle	
16	1	STURMTRACK DES EREIGNISSES IN ERA40, WELCHES DER STURMFLUT IN CUXHAVEN VOM 20.–22.01.1976 ZUGEORDNET WERDEN KANN
17	2	ANZAHL DER TRACKS IN DER GESAMTEN TRACKINGREGION, DER TRACKS MIT MINDESTENS EINEM ZEITSCHRITT IN DER REGION NORDSEE UND DER STURMFLUTRELEVANTEN TRACKS MIT MINDESTENS EINER ÜBERSCHREITUNG DES EFFEKTIVWINDES ÜBER 9,837 M/S IN DER NORDSEEREGION FÜR DIE INDIVIDUELLEN SIMULATIONSLÄUFE FÜR ECHAM5 20C (1901–2000) UND ECHAM5 A1B (2001–2100)
24	3	ANZAHL DER ÜBERSCHREITUNGEN DES EFFEKTIVWINDES GEMITTELT ÜBER DIE DEUTSCHE BUCHT VON 9,837 M/S FÜR JEDEN MONAT DER SAISON (SEPTEMBER BIS EINSCHLIEßLICH MAI) SOWIE DEREN PROZENTUALER ANTEIL AN ALLEN ÜBERSCHREITUNGEN FÜR ALLE LÄUFE VON 20C (1901–2000) UND A1B (2001–2100)
32	4	15 STÄRKSTE STURMFLUTEREIGNISSE 1979 BIS 2008 GEMESSEN AM MAXIMAL AUFGETRETENEN WINDSTAU AN DER STATION CUXHAVEN
34	5	KORRELATION, RMSE FÜR DIE CCLM SIMULATIONEN MIT ERA-40 BZW. ERA-INTERIM ANTRIEB FÜR DIE DREI PARAMETER: WINDGESCHWINDIGKEIT, WINDRICHTUNG UND EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEIT AN DER STATION SCHARHÖRN (BEOBACHTUNGEN) ODER NÄCHSTLIEGENDER GITTERPUNKT (ERA-40 & ERA- INTERIM)
36	6	LISTE DER 19 STÄRKSTEN POTENTIELLEN STURMFLUTEREIGNISSE (GEMESSEN AN DER MAXIMAL AUFGETRETENEN EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEIT ÜBER DER DEUTSCHEN BUCHT REGION) AUS ECHAM5 20C UND A1B.

1 Einleitung

Im Rahmen der BMVBS-Initiative KLIWAS „Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels - 1. Schritt: Schifffahrt und Wasserstraßen“ und des darin enthaltenen Projektes 2.01 „Parameterisierung Klimawandelszenarien Küste/See“ werden vom DWD, Seewetteramt Hamburg und BSH die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Seeschifffahrt, Küsten und Häfen untersucht. Sturmfluten an den Deutschen Küsten sind für die Natur, Wirtschaft und Gesellschaft verheerende Naturereignisse, wie während der Hamburgflut 16./17.02.1962 mit 340 Todesopfern eindrücklich dokumentiert wurde, und müssen aus diesem Grund bei der Untersuchung möglicher Auswirkungen des Klimawandels insbesondere berücksichtigt werden.

Eine Sturmflut an der deutschen Nordseeküste ist definiert durch ein Ansteigen des Wasserstandes von 1,50 m bis 2,50 m über dem mittleren Hochwasser (MHW), eine schwere Sturmflut von 2,50 m bis 3,50 m über dem MHW und eine sehr schwere Flut durch mehr als 3,50 m Wasserstand über dem MHW[1], wobei das Zustandekommen solch einer Flut neben den meteorologischen Bedingungen (Sturmstärke und Windrichtung) auch von der Koinzidenz mit der richtigen Tidephase zusammenhängt. Der Gesamtwasserstand setzt sich aus der astronomischen Tide und dem Windstau, d.h. dem meteorologischne Anteil am Wasserstand, sowie externer Parameter, wie Fernwellen oder Luftdruck, zusammen. Üblicherweise wird der Windstauanteil aus der Differenz zwischen dem gemessenen Wasserstand und der astronomischen Tide berechnet, wodurch die externen Parameter implizit im Windstau enthalten sind.

Schwere Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste stehen oftmals im Zusammenhang mit großskaligen Sturmereignissen mit hohen Windgeschwindigkeiten und auflandigen Winden. Dieser Umstand ist am Fall der Niedrigwassersturmflut vom 23.02.1967 in Cuxhaven gut zu erkennen, welche durch den Adolf-Bermpohl-Orkan entstanden ist. Der Wasserstand über dem MHW betrug zu dem Zeitpunkt des Windstaumaximums 3,99 m, wobei es durch den Windstau einen Anstieg von 4,44 m gab.

Angesichts des prognostizierten Klimawandels stellt sich die Frage, ob es in Zukunft zu veränderten Windstau-Ereignissen und damit zu einem veränderten Sturmflut-Potential kommt. Für die Beantwortung dieser Frage steht das Projekt PAK-Sturm 2 zur Verfügung, welches auf den Ergebnissen des Kooperationsprojektes PAK-Sturm [2] zwischen der FU Berlin und dem BSH aufbaut. Darin wurde gezeigt, dass mit einem an der FU entwickelten Algorithmus Stürme, die auf Grund ihrer Windgeschwindigkeit und -richtung potentiell zu Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste führen würden, in Klimamodellereignissen detektiert werden können. Der Algorithmus wurde mit Hilfe der ERA40-Reanalysen und den beobachteten Sturmfluten in

Cuxhaven für den Zeitraum 1957–2002 getestet und auf die ECHAM5-Simulationsergebnisse des 20C-Laufes für die Winter 1969/1970 bis 1999/2000 und des A1B-Laufes von 2069/2070 bis 2099/2100 übertragen. Da der Sturmidentifikationsalgorithmus seit dem Projekt PAK-Sturm optimiert wurde, wird in diesem Projekt der gesamte Zeitraum von 1900–2000 bzw. 2001–2100 betrachtet, um darüber die Veränderungen des Sturmflutrisikos abzuschätzen.

1.1 Projektstruktur

Die Arbeiten in diesem Projekt können in drei Teile aufgegliedert werden. In einem ersten Schritt musste eine nochmalige Validierung des Identifikationsalgorithmuses der FU Berlin an Reanalysedaten stattfinden, da inzwischen eine verbesserte Version der Sturmidentifizierung vorliegt. In diesem Arbeitsschritt wurden wie im PAK-Sturm-Projekt historische Sturmfluten der Station Cuxhaven den potentiellen sturmflutträchtigen Situationen der ERA40-Reanalysedaten (bestimmt mit dem Trackingalgorithmus der Freien Universität Berlin) zugeordnet. Mit dem Sturmflutatlas der Station Cuxhaven [3] konnte somit die Methodik validiert und die Charakteristik sturmflutrelevanter Ereignisse bestimmt werden. Die Funktionsweise sowie die Verbesserungen des Algorithmuses und die Ergebnisse der Validierung werden in Kapitel 3 thematisiert.

Im zweiten Schritt wurde die Methode auf die ECHAM5 Klimamodelldaten angewandt. Für das rezente Klima standen drei Realisierungen von Modellsimulationen zur Verfügung. Es handelt sich dabei um Klimarealisierungen mit historischen beobachtetem (20C) und mit gemäß SRES A1B Szenario weiter ansteigenden Treibhausgasgehalt. Die Untersuchungen beziehen sich auf die Zeiträume 1900 bis 2000 (20C) und 2001 bis 2100 (A1B). Die extremwertstatistischen Auswertungen zu den sturmflutrelevanten Ereignissen von 20C und A1B werden in Kapitel 4 thematisiert. Ein Vergleich der Anzahl potentieller Sturmfluten in den Simulationen ermöglicht es abzuschätzen, ob es durch die anthropogene Klimaänderung zu einem veränderten Risiko für Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste kommt. Da die Wetterentwicklung im Modell keine Vorhersage der realen Wetterfolge ist, können nur die mit dem Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen verbundene Trends und Variationen, nicht aber phasentreu mit dem beobachteten Klimaverlauf verbundene längerfristige (klimatische) Entwicklungen in ihrer statistischen Gesamtheit abgebildet werden. Insbesondere werden die Variationen der mit dem effektivsten Windstau verbundenen Windgeschwindigkeiten sowie erste Ansätze zur Untersuchung der Andauer der sturmflutrelevanten Ereignisse betrachtet. Auch die extremwertstatistische Wahl des Grenzwertes zur Abschätzung der Auftrittswahrscheinlichkeit von Extremereignissen wird behandelt. Die für die gesamte Untersuchung verwendeten Daten werden in Abschnitt 2 vorgestellt.

Ein weiteres Projektziel stellt die Regionalisierung einzelner historischer Sturmfluterereignisse sowie der stärksten in den ECHAM5 IPCC-AR4 Szenarienläufen identifi-

zierten potentiellen Sturmflutereignisse mit dem regionalen Klimamodell COSMO-CLM[1] (CCLM) [4] in einer Auflösung von 0.165°x0.165° (≈ 18km) dar.

Zunächst wurden die 15 stärksten Sturmflutereignisse im Zeitraum 1979 bis 2008 mittels CCLM, angetrieben durch ERA-Interim Reanalysedaten [5], regionalisiert (s. Abschnitt 5.1). Die Ergebnisse der in den Modellsimulationen simulierten Windgeschwindigkeiten wurden anschließend mit Beobachtungsdaten an der Station Scharhörn der Hamburg Port Authority validiert. Insgesamt wurde jedes Sturmflutereignis fünf mal mit leicht unterschiedlichen Randbedingungen simuliert. Diese leicht unterschiedlichen Randbedingungen werden durch die Verschiebung der Modellregion um jeweils 8 Gitterboxen in unterschiedliche Richtungen realisiert. Da alle Simulationen physikalisch konsistent sind und keine bevorzugt werden kann, können die Ergebnisse dieser Analyse als Sensitivitätsstudie zu diesem Sturmflutereignis betrachtet werden.

Anschließend wurden die 15 stärksten potentiellen Sturmflutereignisse in den drei ECHAM5 IPCC-AR4 Szenarienläufen [6] (A1B) sowie den drei Simulationen für rezentes Klima (20C) im Zeitraum 1901 bis 1970 bzw. 2001 bis 2070 mit den Modell CCLM nachsimuliert. Die Modellkonfiguration ist hierbei identisch zu jener, die für die Simulation der historischen Ereignisse verwendet wurde. Auch für die von ECHAM5 angetriebenen Ereignisse wurden insgesamt fünf Ensemblemitglieder gerechnet, jeweils mit in gleicher Weise erzeugten leicht unterschiedlichen Randbedingungen. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 5.2 dargestellt.

[1] COSMO-CLM ist das Gemeinschaftsmodell der deutschen regionalen Klimaforschung

2 Datengrundlage

Für das Projekt steht der Sturmflutatlas der Station Cuxhaven [3] im Zeitraum von 1901 bis 2008 (mit insgesamt 166 Sturmfluten) zur Verfügung. Neben dem gemessenen Gesamtwasserstand und der berechneten astronomischen Tide ist auch der Windstau enthalten, welcher sich aus der Differenz der beiden vorherigen Größen ergibt. Daten sind nicht als kontinuierliche Zeitreihen, sondern lediglich für die einzelnen Sturmflutereignisse in einer 5-minütigen Auflösung gegeben.

Für die Prüfung der Identifikation von historischen Sturmereignissen mit dem Algorithmus und zur Betrachtung der meteorologischen Situation bei Sturmfluten wird der Reanalyse-Datensatz ERA40 verwendet. Dieser umfasst den Zeitraum 1957 bis 2002 in einer horizontalen Auflösung von 1,125° (ca. 125 km; T159). In der Untersuchung werden der Zonal- und der Meridionalwind in 10m Höhe in einer zeitlichen Auflösung von 6 Stunden ausgewertet. Zur Abschätzung des zukünftigen Sturmflutpotentials werden die SRES Szenarienläufe des globalen gekoppelten Atmosphäre-Ozean Modells ECHAM5/MPI-OM mit einer horizontalen Auflösung von 1,875° (ca. 210 km; T63) verwendet. Für das rezente Klima liegen die drei Realisierungen der 20C Simulation für den Zeitraum von 1900–2000 vor. Das Szenario des zukünftigen Klimas ist gegeben durch die drei Realisierungen des A1B Treibhausgasantriebes für die Periode 2001–2100. Wie für die ERA40-Reanalysen werden auch für die ECHAM5-Szenarien der Zonal- und Meriodionalwind in 10m Höhe in einer zeitlichen Auflösung von 6 Stunden betrachtet.

3 Verbesserte Sturmidentifikationen

In diesem Abschnitt wird der verbesserte Algorithmus sowie die Verifikation dieser Methodik mittels historischer Sturmfluten in Cuxhaven und den ERA40-Reanalysen vorgestellt.

3.1 Identifikationsalgorithmus

Durch den an der FU Berlin entwickelten Algorithmus zur Identifikation von Stürmen ist es möglich, auf Grundlage der Windgeschwindigkeit und -richtung speziell auf Ereignisse zu schließen, die zu einer Sturmflut an der deutschen Nordseeküste führen können. Vorgestellt werden hier die verwendeten Untersuchungsregionen, die verwendeten Daten sowie das Verfahren zur Identifikation von Stürmen selbst.

3.1.1 Untersuchungsgebiete

Für die Identifikation sturmflutrelevanter Stürme wird eine Hierachie von Regionen betrachtet. Die Region zur Identifizierung von Sturmereignissen ist in einen äußere Box von -40° West bis 40° Ost und 25° Nord bis 80° Nord (Abbildung 1) sowie in eine innere Box von -35° West bis 30° Ost und 35° Nord bis 75° Nord (Abbildung 1, schwarz) unterteilt. Liegt der Sturm innerhalb der inneren Box, wird der entsprechende Zeitschritt als Teil der relevanten Sturmzugbahn betrachtet. Gelangt der Sturm anschließend in den Bereich der äußeren Box erfolgt seine letzte Identifizierung und wird danach als abgeschlossen betrachtet, wobei dieser letzte Zeitschritt nicht mehr zur relevanten Sturmzugbahn gezählt wird.

Die Region Nordsee von 3° West bis 10° Ost und von 50° bis 60° Nord (Abbildung 1, blau) wird für die Bestimmung potentiell sturmflutrelevanter Ereignisse betrachtet. Aufgrund unterschiedlicher Auflösungen von Reanalysen und Modellsimulationen beinhaltet diese Region 99 Gitterpunkte in ERA40 und 35 in ECHAM5 (siehe Abbildung 2).

Ein weiteres Untersuchungsgebiet stellt die Region Deutsche Bucht [7] (Abbildung 1, rot) dar. Diese erstreckt sich von 4° bis 9° Ost und 53,5° bis 56° Nord und umfasst nur Gitterboxen mit einem Landanteil von weniger als 20%. Für das ERA40-Gitter umfasst das Gebiet somit 7 Gitterboxen, für das ECHAM5-Gitter 2 Gitterboxen (siehe Abbildung 2).

3.1.2 Inputdaten

Aus den Zonal- und Meridionalwinden von ERA40 und ECHAM5 wird zunächst der Betrag und die Richtung des Windvektors über der Deutschen Bucht für jeden archivierten Zeitschritt bestimmt. Aus diesem kann anschließend in Anlehnung an das

KFKI Projekt MUSE [8] die Effektivwindgeschwindigkeit ermittelt werden. Die Effektivwindgeschwindigkeit ist definiert als die auf 295° (WNW) projizierte Windgeschwindigkeit in 10m Höhe. Es wurde empirisch getestet, dass bei einer Windrichtung von 295° die Windschubspannung in der Deutschen Bucht maximal ist. Um lokale Maxima nicht überzubewerten, wird der Effektivwind über alle Gitterboxen der Deutschen Bucht gemittelt. Eine schematische Darstellung zur Berechnung des Effektivwindes ist in Abbildung 3 zu finden.

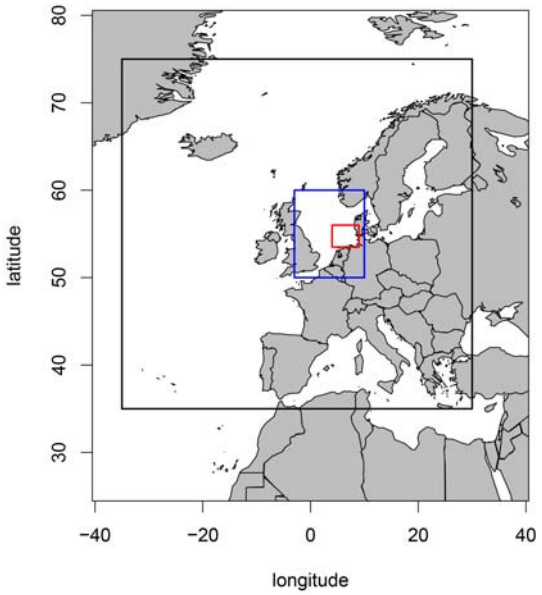


Abbildung 1: Für die Untersuchung verwendete Regionen: äußere (-40° W – 40° E und 25° N – 80° N) und innere (-35° W – 30° E und 35° N – 75° N) Box zur Identifikation von Sturmereignissen (Kartenrand und schwarze Box), Region Nordsee (3° W – 10° E und 50° N – 60° N, blaue Box) und Region Deutsche Bucht (4° E – 9° E und 53,5° N – 56° N, rote Box).

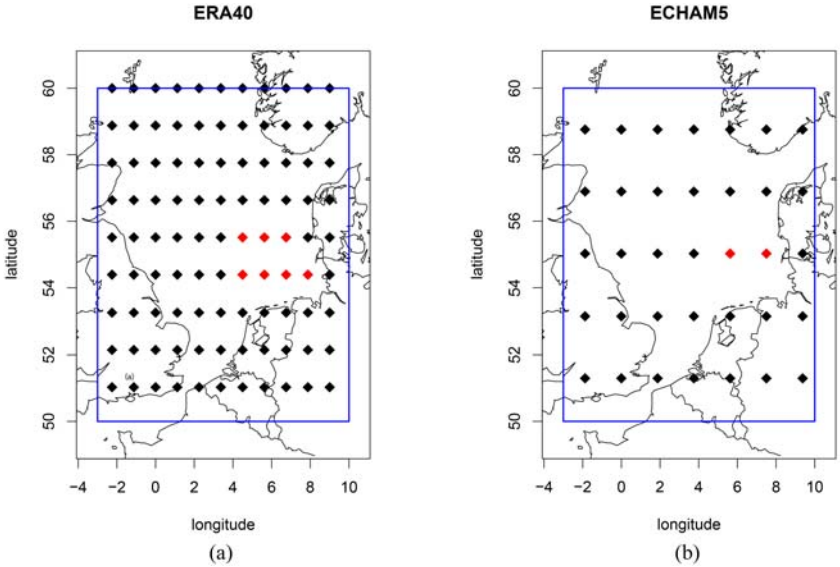


Abbildung 2: Gitterpunkte in der Region Nordsee (schwarz) und Gitterpunkte in der Region Deutsche Bucht mit einem Landanteil von weniger als 20% (rot) für ERA40 (a) und ECHAM5 (b). Das blaue Rechteck markiert die Nordseeregion.

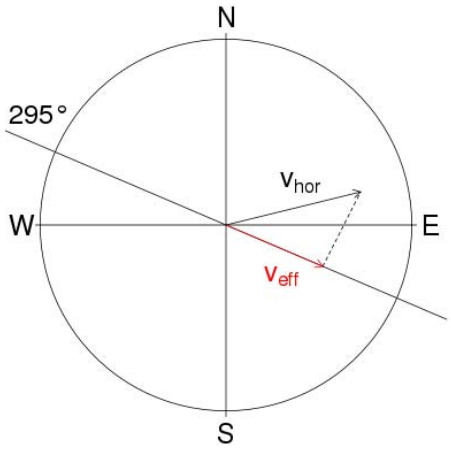


Abbildung 3: Schematische Darstellung zur Berechnung des Effektivwindes v_{eff} durch Projektion des horizontalen Windvektors v_{hor} auf die Richtung 295°. Positive Werte von v_{eff} bedeuten eine horizontale Windkomponente aus WNW [2].

3.1.3 Funktionsweise

Unter Verwendung eines objektiven Algorithmus werden in den Modell- und Reanalysedaten Sturmereignisse mit einer Mindestgröße des Sturmfeldes sowie der Windgeschwindigkeit und -andauer identifiziert. Im ersten Schritt werden die Gitterboxen identifiziert, bei denen die Windgeschwindigkeit in 10m Höhe eine gewählte Perzentilschwelle überschreitet. Für dieses Projekt wurde in Anlehnung an andere Arbeiten das lokale 98. Perzentil gewählt. Im nächsten Schritt werden für jeden Zeitschritt benachbarte Gitterboxen, bei denen das lokale Perzentil überschritten wird, zu einem Sturmfeld zusammengefasst. Diese so identifizierten Sturmfelder müssen eine Mindestgröße überschreiten. Auf Grund von ersten Betrachtungen von Sturmfeldern zu historischen Sturmflutereignissen wurde die Mindestgröße bei ERA40 auf 20 und bei ECHAM5 auf 8 Gitterboxen festgelegt. Die unterschiedliche Anzahl ist der gröberen Auflösung von ECHAM5 (1,875°) zu den ERA40 Reanalysen (1,125°) geschuldet. In beiden Datensätzen entspricht dies einer minimalen Fläche von etwa 150 000 km^2 (in 60° nördlicher Breite).

Bei räumlich relativ hoch aufgelösten Daten kann es vorkommen, dass das Sturmgebiet in kleinere Teilbereiche aufgeteilt ist, die formal nicht das Kriterium eines ausgedehnten Sturmereignisses erfüllen. Um dies zu verhindern, wird neben dem 98. Perzentils eine weitere Perzentilschwelle (in diesem Fall das 95. Perzentil) festgelegt, die eine Umhüllende des tatsächlichen Sturmfeldes darstellt und in dem alle relevanten Teilregionen enthalten sind. Wie im PAK-Sturm Projekt untersucht, kommt es bei dieser Perzentilschwelle noch nicht zu einer Kombination von Windfeldern, die weit voneinander entfernt oder offensichtlich zu unterschiedlichen Tiefdrucksystemen

gehören. Die Charakteristika eines Sturmereignisses werden aber dennoch nur über die Gitterboxen bestimmt, an denen das lokale 98. Perzentil überschritten ist.

Im letzten Schritt werden die identifizierten Sturmfelder zeitlich miteinander verbunden. Dies wird durch ein Nearest-Neighbour-Verfahren realisiert, bei dem ein Sturmfeld mit dem nächstliegenden Sturmfeld im drauffolgenden Zeitschritt verbunden wird. Dabei darf eine maximale Zugdistanz des Sturmfeldes nicht überschritten werden. Diese setzt sich aus einem festen Anteil von 600 km und einem dynamisch bestimmten Anteil von der Hälfte der Sturmfeldausdehnung zusammen. Außerdem werden zusätzliche Aspekte, insbesondere die Größe des Sturmfeldes, bei der Wahl zwischen zwei ähnlich nahen Sturmfeldern berücksichtigt. Unter den so identifizierten Sturmereignissen werden letztlich nur diejenigen berücksichtigt, die eine Mindestandauer besitzen, welche auf 4 Zeitschritte, sprich 18 Stunden, festgelegt wurde.

3.1.4 Optimierungen

Die neue Version des Identifikationsalgorithmuses zeichnet sich vor allem durch eine bessere Verknüpfung der identifizierten Sturmfelder über mehrere Zeitschritte aus. Sie berücksichtigt, wie in Abschnitt 3.1.3 bereits erwähnt, bei der Wahl zwischen gleichnahen Ereignissen im Vergleich zur früheren Version weitere Aspekte, insbesondere die Größe des Sturmfeldes. Mit der verbesserten Version werden meteorologisch sinnvollere Sturmzugbahnen identifiziert.

3.2 Zuordnung von historischen Sturmflutereignissen

Bevor sturmflutrelevante Ereignisse in den Modellläufen untersucht werden, müssen anhand beobachteter Sturmflutereignisse des Windstauatlases von Cuxhaven die Charakteristika bestimmt werden, die ein Sturmereignis als potentielle Ursache einer Sturmflut auszeichnet.

In einem ersten Schritt wird geprüft, ob die 83 Sturmflutereignisse in Cuxhaven, die im ERA40-Zeitraum von September 1957 bis August 2002 stattgefunden haben, aufgrund des in Abschnitt 3.1.3 beschriebenen Verfahrens in den Reanalysedaten wiederzufinden sind. Da lediglich ein Ereignis der 83 beobachteten Sturmfluten in den Sommermonaten stattgefunden hat, werden nur die Sturmereignisse für die Monate September bis einschließlich Mai identifiziert. Die Perzentilschwellen, die zur Identifikation von Stürmen benötigt werden, wurden jedoch für den gesamten ERA40-Zeitraum, einschließlich der Sommermonate, bestimmt.

Insgesamt werden durch den Algorithmus für den Zeitraum 3541 Sturmereignisse in der gesamten Sturmidentifikationsregion (siehe Abbildung 1) gefunden. Die leicht erhöhte Anzahl an Ereignissen im Vergleich zum PAK-Sturm Projekt (3447 Ereignisse) lässt sich durch die optimierte Version des Identifikationsalgorithmus erklären. Jedoch stehen erwartungsgemäß nicht alle identifizierten Sturmereignisse im Zusammenhang mit einer Sturmflut an der deutschen Nordseeküste. Um Stürme auszuschließen, die zu weit von der norddeutschen Küste entfernt liegen, wurde ein

Ortskriterium eingeführt. Es werden lediglich solche Stürme berücksichtigt, deren Windfeld (Überschreitung des 98. Perzentils) mindestens einen Gitterpunkt in der Region Nordsee aufweisen. Von den insgesamt 3541 Stürmen erfüllen 1353 Ereignisse (PAK-Sturm Projekt: 1340) dieses Ortskriterium und kommen somit als mögliche Verursacher einer Sturmflut in der Deutschen Bucht in Frage. Mit dem zusätzlichen Zeitkriterium, dass der Sturm vor dem gemessenen Windstaumaximum existieren musste, können 80 der 82 relevanten historischen Sturmfluten in den ERA40-Reanalysedaten gefunden werden (PAK-Sturm Projekt: 77/82). Alle anderen Sturmereignisse haben nicht zu einer Sturmflut im Katalog geführt. Dies kann beispielsweise daran liegen, dass das Ortskriterium keine enge Verbindung zur Deutschen Bucht impliziert.

In einem zweiten Schritt werden nun zu den im ERA40-Datensatz gefundenen historischen Sturmfluten die entsprechenden Effektivwindgeschwindigkeiten gemittelt über die Region Deutsche Bucht zugeordnet. Wegen der unterschiedlichen zeitlichen Auflösung von Effektivwind und Windstaumaximum wird dem Sturmflutereignis der höhere Windwert von dem Zeitpunkt vor bzw. nach dem Windstaumaximum zugeordnet. Es reicht dabei aus, dass der Sturm in den Reanalysedaten lediglich an einem der beiden Termine in der Region Nordsee einen hohen Effektivwind aufweist. Es ist nämlich möglich, dass ein Sturm, der tatsächlich zum Zeitpunkt des Windstaumaximums die Region Nordsee betraf, obwohl er am Termin vor dem Windstau-Maximum noch nicht dort aufgetreten war. Stimmt der Termin des Windstaumaximums mit einem Zeitschritt der ERA40-Reanalysen exakt überein, wird das Maximum des Effektivwindes aus dem Termin und den Zeitpunkten vor bzw. nach dem Windstaumaximum gewählt, da wie in dem Projekt PAK-Sturm gezeigt wurde, der höchste statistische Zusammenhang zwischen Windstau und Effektivwind bei einem Zeitversatz von ca. 2-3 Stunden besteht.

In Abbildung 4 a) ist die Häufigkeitsverteilung der maximalen Effektivwinde jeweils während der gesamten Sturm-Lebensdauer dargestellt. Diese wurde anhand der ERA40- Daten für die identifizierten großskaligen Sturmereignisse bestimmt, deren Sturmfeld (Überschreitung des 98. Perzentils) die Nordsee betrifft, dargestellt (grau). Lediglich die Zeitschritte, in denen der Sturm über der Nordsee identifiziert wurde, werden für die Bestimmung des Maximums herangezogen. Die Häufigkeiten für die Sturmereignisse, die zu einer Sturmflut geführt haben (rot), weicht deutlich von der Gesamtverteilung ab. Höhere Effektivwinde im Bereich der Deutschen Bucht führen erwartungsgemäß mit einer höheren Wahrscheinlichkeit zu einer Sturmflut. Der prozentuale Anteil der Sturmfluttracks ist ebenfalls in Abbildung 4 a) angegeben. Es kann dabei vorkommen, dass für einzelne Effektivwindgeschwindigkeiten die Anzahl zugeordneter Ereignisse zu einer Sturmflut größer ist als die mit dem grauen Balken dargestellt Gesamtanzahl zu dieser Effektivwindgeschwindigkeit. Dies kann damit erklärt werden, dass die höchste Effektivwindgeschwindigkeit nicht unmittelbar vor bzw. nach dem Windstaumaximum auftreten muss und so demselben Sturm in den beiden Verteilungen unterschiedliche maximale Effektivwinde zugeordnet werden.

Die Sturmzugbahn, in der ein solcher Fall auftritt, ist in Tabelle 1 angegeben. Sie ist der historischen Sturmflut in Cuxhaven vom 20.-22.01.1976 mit dem Windstaumaximum von 289 cm am 21.01.1976 02:05 Uhr zuzuordnen. Neben dem Datum des Zeitschrittes und den zugehörigen Effektivwindgeschwindigkeiten gemittelt über der Deutschen Bucht ist auch ein Index dargestellt, welcher die Zugehörigkeit des Sturms zur Region Nordsee angibt. Je höher der Index ist, desto mehr Gitterboxen sind von einer Überschreitung des lokalen 98. Perzentils betroffen. Der grau unterlegte Bereich in Tabelle 1 markiert die Termine vor bzw. nach dem Windstaumaximum. Bei dieser Vorgehensweise wird dem höchsten Windstauwert im Lauf des Sturmereignisses ein Effektivwind von 19,16 m/s zugeordnet. Bestimmt man jedoch den höchsten Effektivwind aus allen Zeitschritten, die Windgeschwindigkeiten oberhalb des Perzentilwerts in der Nordseeregion aufweisen (roter Bereich), ergibt sich ein Wert von 20,09 m/s.

Um diese Differenzen besser einschätzen zu können, ist in Abbildung 4 b) die Häufigkeitsverteilung, bei der den beobachteten Sturmflutereignissen der maximale Effektivwind gemittelt über die Deutsche Bucht im gesamten zeitlichen Verlauf des Sturms zugeordnet wurden, dargestellt. Auch hierbei werden nur die Zeitschritte berücksichtigt, in denen sich der Sturm in der Nordseeregion befand. Erkennbar an dieser Abbildung ist, dass ab einer Effektivwindgeschwindigkeit von rund 19 m/s alle Sturmereignisse zu einer Sturmflut geführt haben. Bei dieser Stärke des Effektivwindes über der Deutschen Bucht treten Sturmfluten somit offenbar unabhängig von der astronomischen Tide auf.

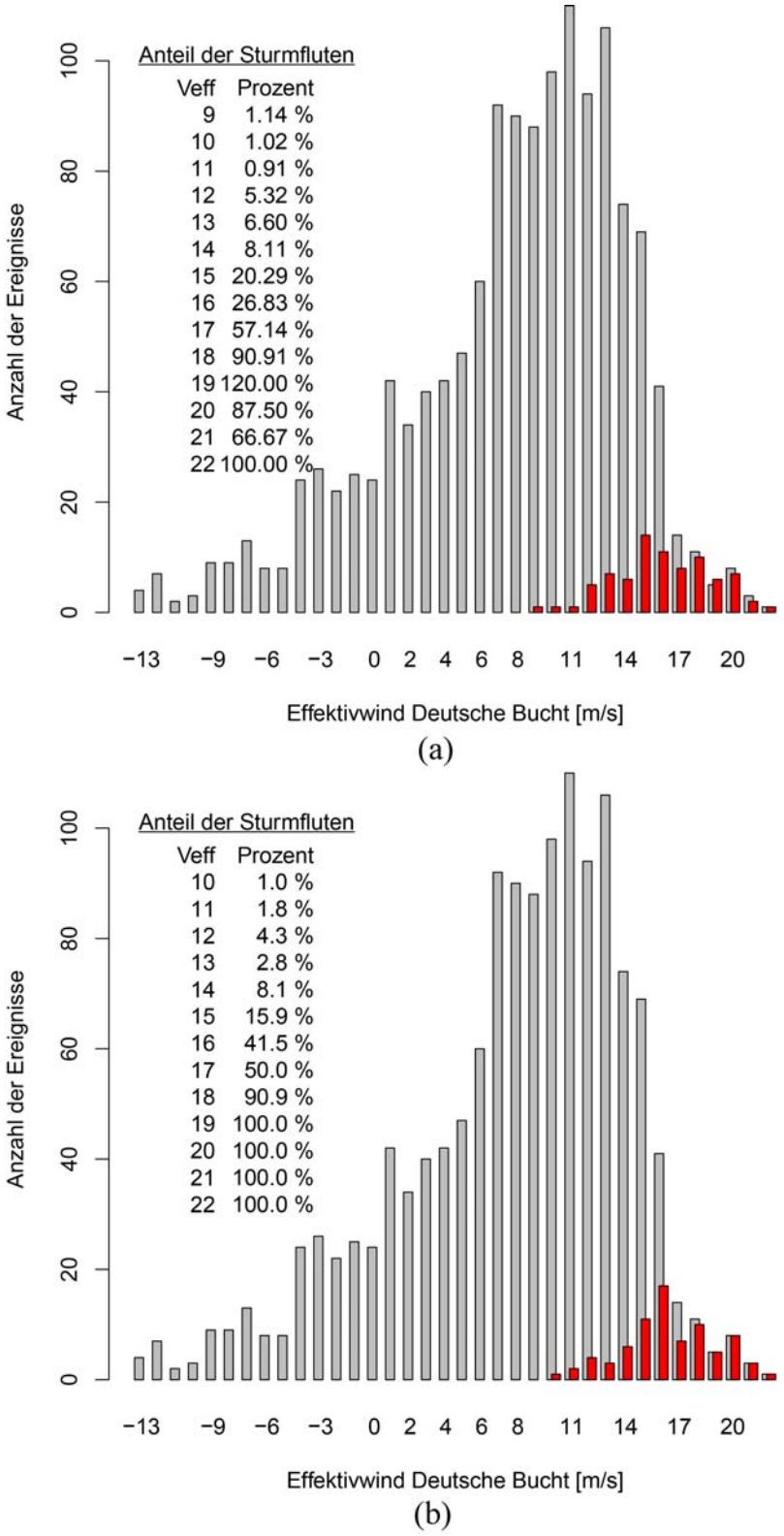


Abbildung 4: Histogramm der Anzahl der Tracks bezüglich der maximalen Effektivwindgeschwindigkeit (grau) sowie der Sturmfluttracks (rot). Den Sturmfluttracks wurde hierbei in a) der maximale Effektivwind zum ERA40-Termin vor/nach dem Windstaumaximum und in b) der maximale Effektivwind des Tracks gemäß ERA40 zugeordnet. Ebenfalls angegeben ist der prozentuale Anteil der Sturmfluttracks.

Tabelle 1: Sturmtrack des Ereignisses in ERA40, welches der Sturmflut in Cuxhaven vom 20.–22.01.1976 zugeordnet werden kann. Das Windstaumaximum mit 289 cm wurde am 21.01.1976 02:05 Uhr registriert. Der graue Bereich markiert die beiden ERA40-Termine vor und nach dem Windstaumaximum und der rote eingerahmte alle Zeitschritte, in denen der Sturm in der Region Nordsee identifiziert wurde. Fett gedruckt sind die Maxima des Effektivwindes für alle Zeitschritte in der Nordseeregion und für die Termine vor bzw. nach dem Windstaumaximum.

Datum	Index Nordsee	Effektivwind [m/s]
19.01.1976 06:00	0	10,63
19.01.1976 12:00	0	11,54
19.01.1976 18:00	0,01	9,38
20.01.1976 00:00	0,16	10,51
20.01.1976 06:00	0,32	13,08
20.01.1976 12:00	2,61	20,09
20.01.1976 18:00	1	15,96
21.01.1976 00:00	1,52	19,16
21.01.1976 06:00	0,26	17,89
21.01.1976 12:00	0,21	13,44
21.01.1976 18:00	0,27	14,61
22.01.1976 00:00	0,24	17,02
22.01.1976 06:00	0,12	16,09
22.01.1976 12:00	0	7,30
22.01.1976 18:00	0	7,74
23.01.1976 00:00	0	7,66
23.01.1976 06:00	0	8,61
23.01.1976 12:00	0	4,49
23.01.1976 18:00	0	2,91

Da 80 der beobachteten 82 Sturmfluten im Zeitraum von 1957–2002 in den ERA40-Reanalysen identifiziert werden können, ist der Identifikationsalgorithmus offenbar gut geeignet und kann für die Anwendung auf die Klimamodell-Daten verwendet werden. Die aus ERA-40 bestimmte absolute Grenze der Effektivwindgeschwindigkeit lässt sich nicht unmittelbar auf die Klimamodelle anwenden, da die Windklimatologien aus beiden Datensätzen voneinander abweichen (Bias, u.a. wegen der unterschiedlichen Gittergrößen). Stattdessen wird der zugeordnete Perzentilwert aus den ERA-Daten auch als Grenze für die Klimamodell-Daten verwendet. Die niedrigste ERA-40 Effektivwindgeschwindigkeit gemittelt über die Deutsche Bucht, die zu einer Sturmflut in Cuxhaven geführt hat, beträgt 9,453 m/s, welcher etwa einem Perzentilwert von 91,97% (für alle Effektivwinde gemittelt über der Deutschen Bucht aller Zeitschritte) entspricht. Dieser Perzentilwert gehört zu einer Effektivwindgeschwindigkeit von 9,837 m/s in den drei ECHAM5 Läufen für den heutigen Treibhausgasantrieb. Der letztgenannte Wert wird für die Identifikation von (potentiellen) Sturmflutereignissen in den gesamten ECHAM5-Simulationen verwendet.

4 Identifikation sturmflutrelevanter Ereignisse in ECHAM5

Analog zu der Analyse sturmflutrelevanter Ereignisse in den ERA40-Reanalysen wurde dieselbe Methodik auf die ECHAM5 Modelldaten angewandt. Für das rezente Klima (20C) wurde der Zeitraum 1900–2000, für das zukünftige Klima (A1B) der Zeitraum 2001–2100 betrachtet. Für die Berechnung des 95. und 98. Perzentils der Windgeschwindigkeiten an den einzelnen Gitterpunkten im ECHAM-Modell, die für die Identifikation der Sturmfelder im ersten Schritt erforderlich ist, gehen alle Windgeschwindigkeiten des kompletten Zeitraums der drei 20C Realisierungen ein. Die zu diesen Perzentilwerten gehörenden Windgeschwindigkeiten werden auch in A1B als Grenzgeschwindigkeiten verwendet. Die Anzahl der Tracks für die einzelnen Realisierungen von 20C und A1B sind in Tabelle 2 dargestellt. Hierbei werden nur Sturmfelder der Monate September bis Mai berücksichtigt. Es ist zu erkennen, dass die Anzahl der Ereignisse, in der ein Sturmfeld in der großen Identifikationsregion auftritt, während der A1B-Periode statistisch signifikant geringer ist als während der 20C-Periode. Bei Beschränkung auf die Tracks, deren Sturmfeld zu mindestens einem Zeitschritt die Region Nordsee betreffen, tritt ein solcher Unterschied nicht mehr auf. Betrachtet man die Ensemble-Mittel für die Anzahl der sturmflutrelevanten Tracks (mit Effektivwind-Geschwindigkeit oberhalb von 9,837 m/s) ergibt sich schließlich für das A1B Szenario-Jahrhundert eine gegenüber 20C um 12,4% erhöhte Zahl.

Tabelle 2: Anzahl der Tracks in der gesamten Trackingregion (obere Zeile), der Tracks mit mindestens einem Zeitschritt in der Region Nordsee (mittlere Zeile) und der sturmflutrelevanten Tracks mit mindestens einer Überschreitung des Effektivwindes über 9,837 m/s in der Nordseeregion (untere Zeile) für die individuellen Simulationsläufe für ECHAM5 20C (1901–2000) und ECHAM5 A1B (2001–2100).

Datensatz	20C 1	20C 2	20C 3	A1B 1	A1B 2	A1B 3
Tracks gesamt	8801	8823	8811	8305	8327	8353
Tracks mit Windfeld über NS	2895	2868	2978	2978	3008	2891
Sturmflutrelevante Tracks in NS (V_{eff} > 9,837 m/s)	961	1008	1072	1142	1202	1075

4.1 Anzahl sturmflutrelevanter Ereignisse

Die Zunahme der Anzahl sturmflutrelevanter Ereignisse für die ECHAM5 Simulationen wird auch in Abbildung 5 deutlich. Die Ensemble-Mittel der Szenarien (schwarze Vierecke) des 20C-Laufes (grün bis blau) und des A1B-Laufes (gelb bis rot) ergeben einen statistisch signifikanten linearen Trend bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0{,}01$ mit einem Anstieg von 1900 bis 2100 um knapp 1,5 Ereignisse. Betrachtet

man jedoch die drei Läufe separat, zeigt sich die Relevanz der simulierten dekadischen Klimaschwankungen: Lauf 1 weist einen signifikanten Anstieg von etwa 3 Ereignissen in den gesamten 200 Jahren mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,001 auf. Auch bei Lauf 2 ist ein Anstieg zu verzeichnen, welcher jedoch nicht statistisch signifikant ist. Lauf 3 zeigt dahingegen einen negativen Trend, dessen statistische Signifikanz jedoch nicht gegeben ist.

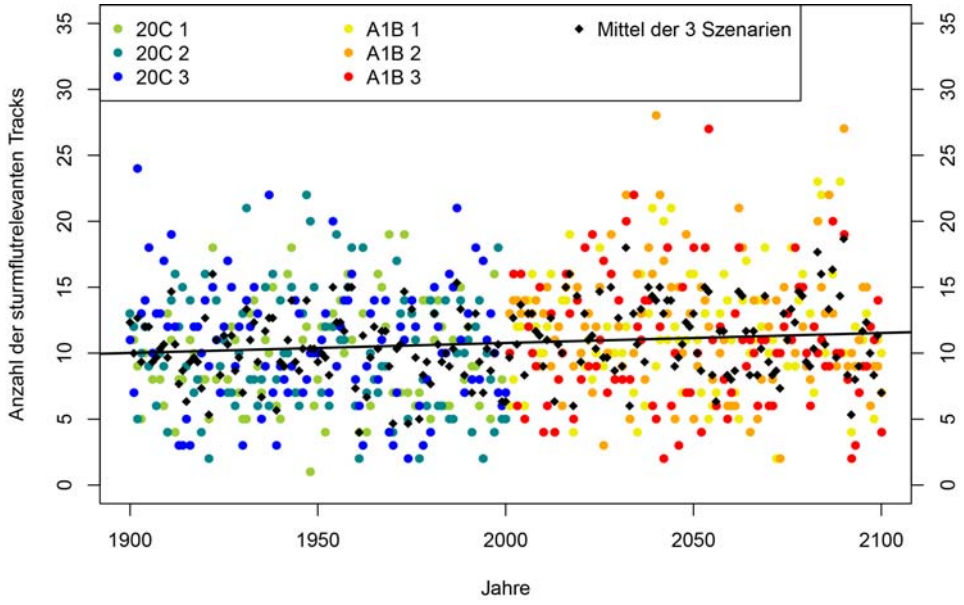


Abbildung 5: Anzahl der sturmflutrelevanten Ereignisse pro Jahr von 1900 bis 2100 für die 3 Realisierungen von 20C (grün bis blau) und von A1B (gelb bis rot). Die schwarzen Vierecke geben das Ensemble-Mittel von 20C und A1B an. Die schwarze Linie markiert den statistisch signifikanten linearen Trend mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von α = 0,01.

In Abbildung 6 ist das 30-Jahre gleitende Mittel der Anzahl potentieller Sturmfluterereignisse für die drei Läufe und für das Mittel der Läufe dargestellt. Neben ausgeprägten dekadisch bis multidekadischen Schwankungen ist auch die erhöhte Anzahl von sturmflutträchtigen Ereignissen in den A1B-Szenarien gut erkennbar.

In Abbildung 7 ist die Anzahl der Ereignisse in 20C und A1B bezüglich der absoluten Überschreitung des Schwellwertes von 9,837 m/s angegeben, um so hinsichtlich der Intensität dieser Ereignisse zu differenzieren. Ebenfalls angegeben sind die prozentualen Veränderungen der Ensemblemittel aus den drei Modellläufen, aufgeteilt nach Klasse der Überschreitung des Grenzwerts. Es zeigt sich, dass in der Mehrzahl aller Klassen die Anzahl der A1B Sturmereignisse höher ist als jene in den 20C Simulationen. Lediglich Überschreitungen von 8 bis 11 m/s und von 12 bis 13 m/s nehmen in den A1B Läufen ab. Bei den Sturmereignissen mit einer Überschreitung von 14 m/s und mehr sind die prozentualen Veränderungen aufgrund der geringen Ereigniszahlen nicht aussagekräftig. Eine hohe Zunahme von mindestens 10% tritt bei den Überschreitungen 2 m/s bis 7 m/s auf. Besonders extreme Ereignisse mit Überschreitungen

von 11-12 m/s und 13-14 m/s über dem Schwellwert von 9,837 m/s werden in den A1B Läufen häufiger, wobei die Anzahl der Ereignisse mit Effektivwindgeschwindigkeiten von 20,837 m/s bis 21,837 m/s um fast 130% zunehmen.

Abbildung 7 zeigt auch die Verteilungen der extremen Effektivwindgeschwindigkeiten gemittelt über die Deutsche Bucht für alle ECHAM5-Läufe. Ein Chi-Quadrat-Test nach Pearson mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,05 ergibt, dass alle Verteilungen der gleichen Grundgesamtheit entspringen und somit bei gleichzeitiger Bewertung sämtlicher Geschwindigkeitsklassen keine statistisch signifikanten Änderungen feststellbar sind.

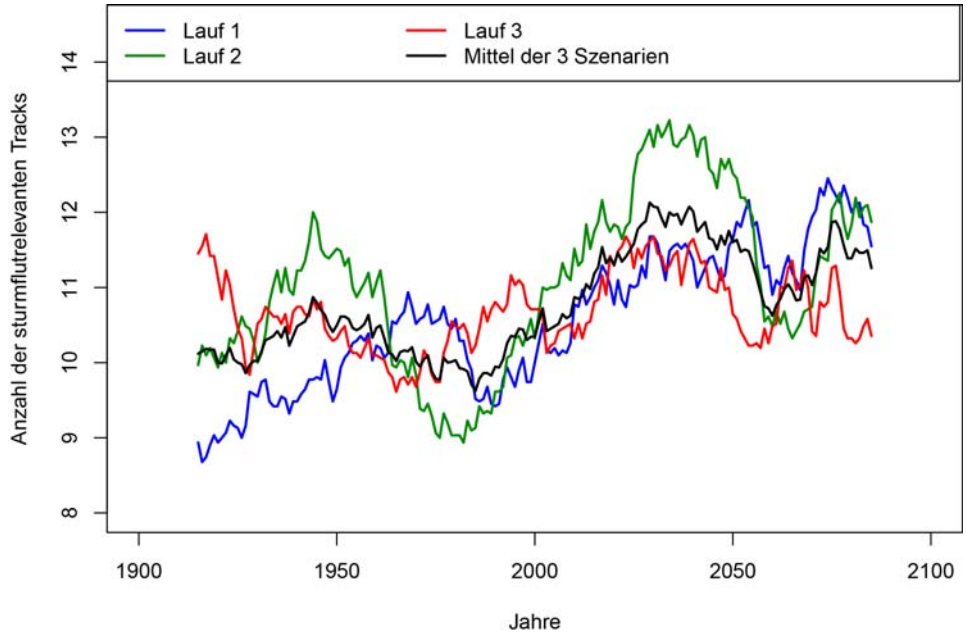
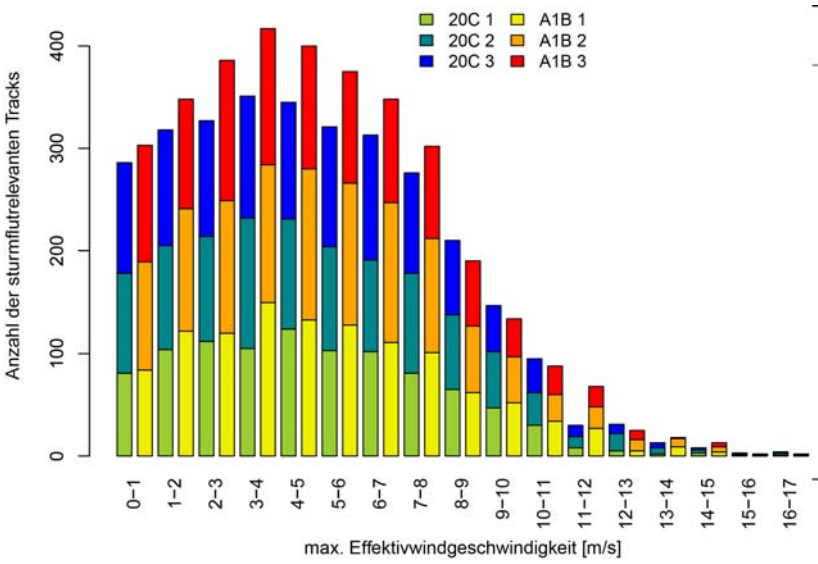
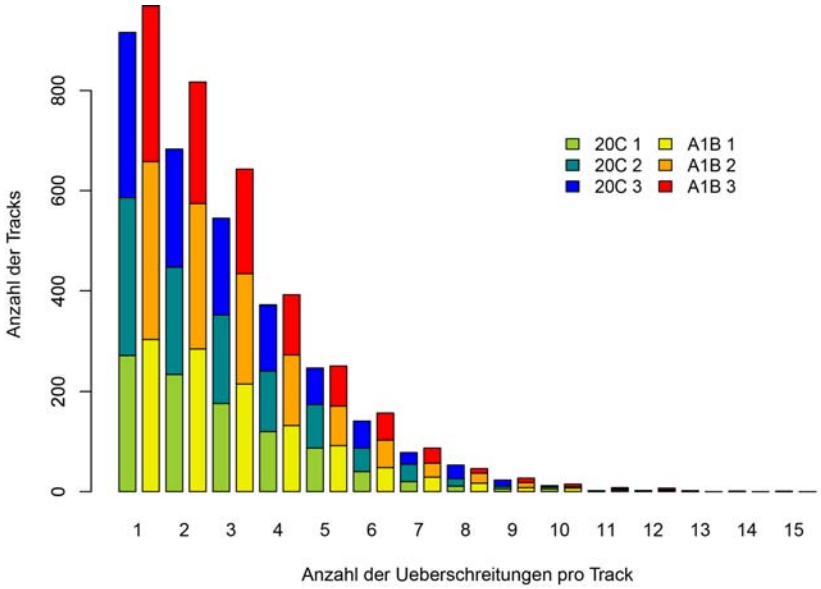


Abbildung 6: 30-Jahre gleitendes Mittel der Anzahl sturmflutrelevanter Ereignisse pro Jahr von 1915 bis 2085 für die 3 Läufe (Lauf 1: blau, Lauf 2: grün, Lauf 3: rot) und für das Mittel aus den Läufen (schwarz).



Überschreitung des Schwellwertes [m/s]	Zunahme [%]
0-1	5,94 %
1-2	9,43 %
2-3	18,04 %
3-4	18,80 %
4-5	15,94 %
5-6	16,82 %
6-7	11,18 %
7-8	9,42 %
8-9	- 9,52 %
9-10	- 8,84 %
10-11	- 7,37 %
11-12	126,67 %
12-13	- 19,35 %
13-14	38,46 %
14-15	62,5 %
15-16	- 33,34 %
16-17	- 50,00 %

Abbildung 7: Anzahl der Ereignisse bezüglich ihrer Überschreitung des Schwellwertes von 9,837 m/s über der Region Deutsche Bucht für die zwei Datensätze 20C (1901–2000, grün bis blau) und A1B (2001–2000, gelb bis rot) (links) und die prozentuale Veränderung von den 20C-Läufen zu den A1B-Läufen (rechts).



Anzahl	20C	A1B
1	29,76 %	28,34 %
2	22,19 %	23,90 %
3	17,71 %	18,81 %
4	12,09 %	11,47 %
5	8,02 %	7,34 %
6-7	7,12 %	7,14 %
8-9	2,47 %	2,14 %
10-11	0,45 %	0,67 %
12-15	0,19 %	0,20 %

Abbildung 8: Anzahl der sturmflutrelevanten Tracks bezüglich ihrer Anzahl an Zeitschritten mit Überschreitungen der kritischen effektiven Windgeschwindigkeit (links) für die 20C-Läufe (1901–2000, grün bis blau) und die A1B-Läufe (2001–2100, gelb bis rot) sowie der prozentuale Anteil an Überschreitungen von 20C und A1B bezüglich der Gesamtanzahl an Tracks in dem jeweiligen Jahrhundert (rechts).

4.2 Andauer der Sturmereignisse

Neben der Anzahl der sturmflutrelevanten Tracks kann sich auch die Dauer eines Sturmereignisses verändern. Hierfür wird die Anzahl der Zeitschritte betrachtet, die in der Nordseeregion liegen und bei der die effektive Windgeschwindigkeit von 9,837

m/s überschritten wird. Ist die Anzahl der Überschreitungen innerhalb eines Tracks höher, ist der Sturm länger sehr stark und hat somit ein erhöhtes Sturmflutpotential, selbst wenn die maximale Effektivwind-Geschwindigkeit unverändert ist. Die Dauer der Überschreitung des Grenzwertes in der Nordseeregion wird in Abbildung 8 dargestellt. Es ergibt sich für die simulierten Jahrhunderte mit A1B-Antrieb eine gegenüber 20C erhöhte Zahl von Tracks in den einzelnen Andauerklassen. Normiert auf die jeweilige Zahl an Tracks in den beiden Jahrhunderten ist aber keine eindeutige Verlagerung der Verteilung hin zu längeren Andauern erkennbar.

4.3 Stärke der potentiellen Sturmflutereignisse

Um die Veränderung in der Effektivwindgeschwindigkeit über der Deutschen Bucht zu untersuchen, sind der Median (oben), das 0,95-Perzentil (Mitte) und das Maximum (unten) des Effektivwindes aus den 20C-Läufen (türkis) und den A1B-Läufen (orange) auf Basis einzelner Jahreswerte der 3 Simulationen in Abbildung 9 dargestellt. Zusätzlich wurde das gleitende 5-jährige Mittel eingetragen (fett gedruckte Linie). Erkennbar sind in allen drei Abbildungen dekadisch bis multidekadische Variationen innerhalb der gesamten Zeitreihe. Diese wären bei Betrachtung der individuellen Simulationen deutlich größer als beim hier dargestellten Ensemblemittel. Ein Trend in den Effektivwindgeschwindigkeiten kann für die gezeigten statistischen Werte nicht festgestellt werden. Dieser Auswertungsansatz liefert also einen scheinbar deutlich von den vorherigen Aussagen abweichenden Schluss. Es wird deutlich, dass die geeignete Definition des Untersuchungsgegenstandes von essentieller Bedeutung ist.

4.4 Saisonale Variationen

Die Variationen des Effektivwindes innerhalb einer Saison (September bis einschließlich Mai) sind in Abbildung 10 für die drei Realisierungen von 20C (türkis) und für A1B (orange) dargestellt. Hierbei werden die Verteilungen der Geschwindigkeiten mittels sogenannter Box-Whisker-Plots dargestellt. Sowohl in den Daten der 20C-Läufe als auch in denen der A1B-Läufe ist für den Median ein schwach ausgeprägter saisonaler Gang zu erkennen. Die stärksten Variationen treten bei den extremsten Effektivwindgeschwindigkeiten auf mit einem Maximum in den Monaten Dezember und Januar und einem Minimum im April und Mai. Zwischen den simulierten Jahrhunderten mit historischem und A1B-Szenario-Treibhausgasantrieb gibt es für die Monate September bis März kaum Unterschiede. Signifikante Änderungen in Form von Zunahmen der Effektivwindgeschwindigkeit treten lediglich im Monat Mai auf.

Durch eine geringe Anzahl an Sturmereignissen im Frühling kann eine minimale Zunahme an Überschreitungen in den A1B-Läufen zu großen Unterschieden in den Medianwerten führen. Aus diesem Grund sind in Tabelle 3 die Anzahl der Überschreitungen der Effektivwindgeschwindigkeit von 9,837 m/s in jedem Monat für die 20C-Läufe und die A1B-Läufe sowie der prozentuale Anteil jedes Monats bezüglich aller extremen Effektivwinde der Sturmflut-Saison (in Klammern dahinter) angegeben.

Eine besonders starke Zunahme an Überschreitungen findet in den Monaten November, Februar, März und Mai statt, wobei beim Monat Mai bei den A1B Simulationen mehr als 2,6-mal so viele Überschreitungen auftreten wie bei denen für das rezente Klima. Trotz einer Zunahme der Anzahl potentiell sturmflutträchtiger Ereignisse in den Monaten Dezember und Januar nimmt deren Anteil hinsichtlich aller Überschreitungen der Saison ab. Somit treten in den A1B-Läufen im Vergleich zur Gesamtanzahl weniger Überschreitungen im Winter und mehr im Spätherbst und Spätwinter bis Frühling auf.

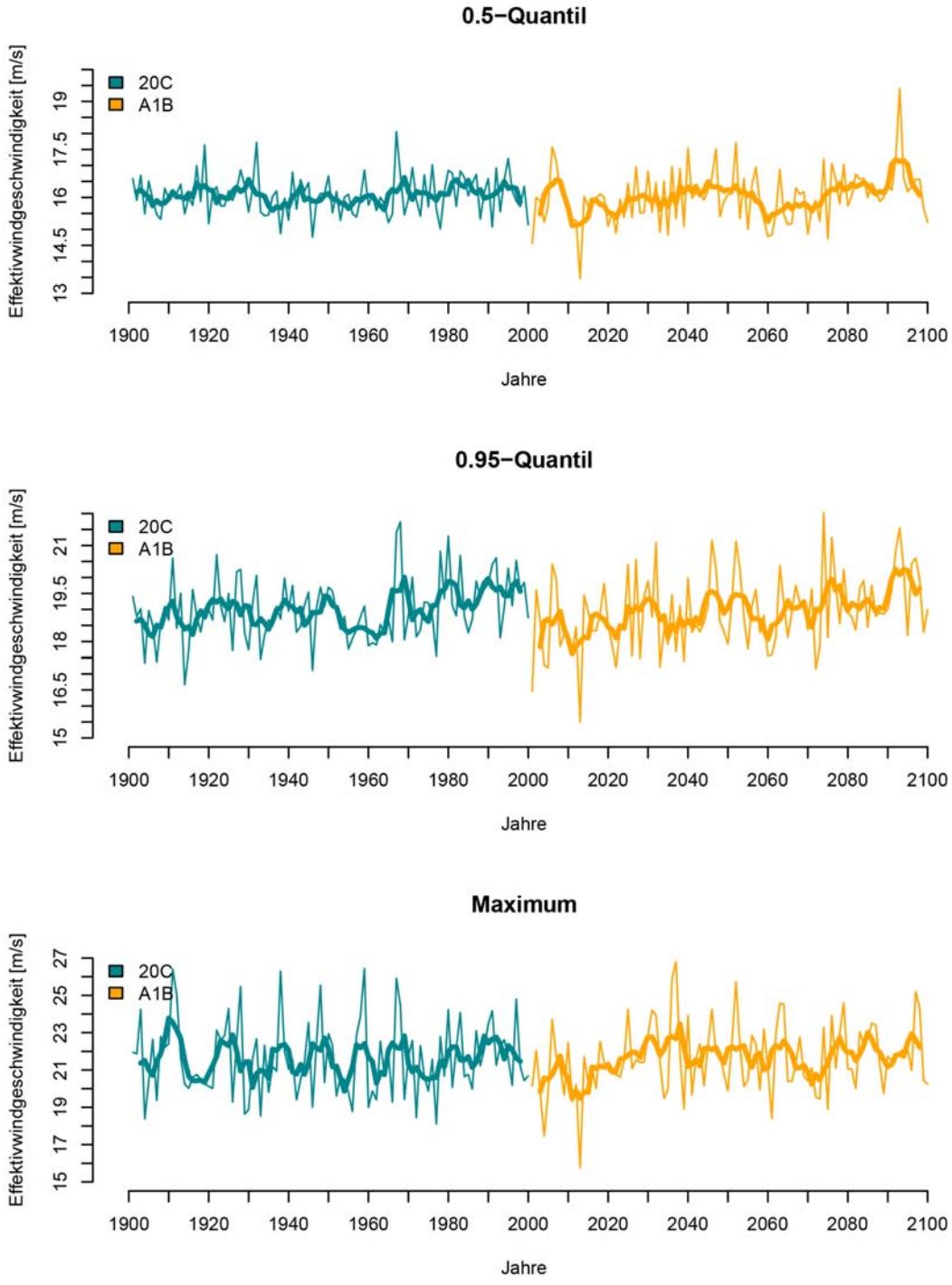


Abbildung 9: Median (oben), 0,95-Quantil (Mitte) und Maximum (unten) der Effektivwindgeschwindigkeiten größer 9,837 m/s für jedes Jahr von 1900 bis 2100 für das Mittel aus den 20C-Läufen (türkis) und das Mittel aus den A1B-Läufen (orange). Zusätzlich eingetragen ist das 5-jährige gleitende Mittel.

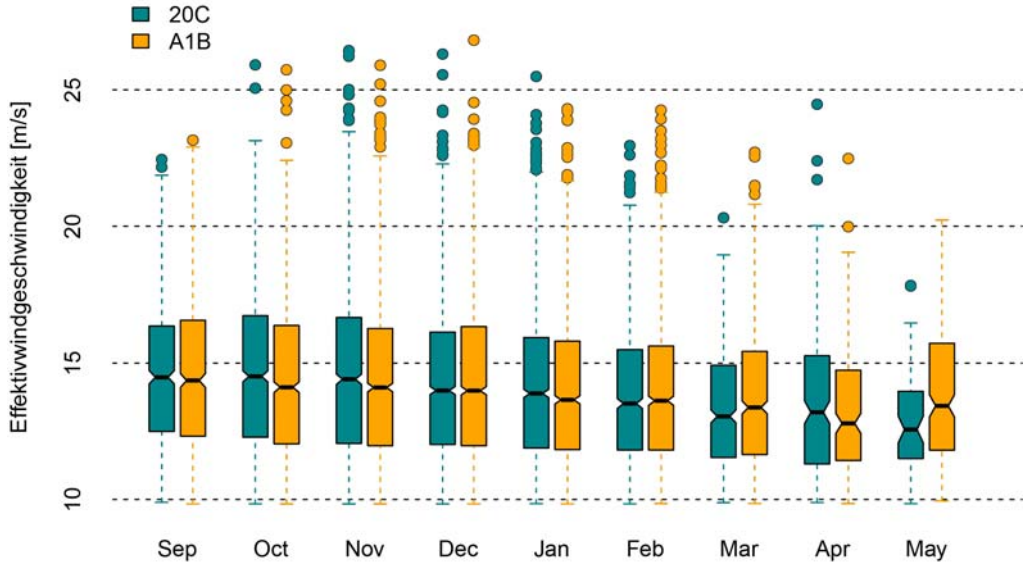


Abbildung 10: Box-Whisker-Plots der Effektivwindgeschwindigkeiten gemittelt über die Deutsche Bucht größer dem Schwellwert von 9,837 m/s für die Monate September bis Mai für die 20C- Läufe (1901-2000, türkis) und die A1B-Läufe (2001-2100, orange). Der schwarze horizontale Balken innerhalb der Box markiert den Median und die obere bzw. untere Grenze der Box das obere bzw. untere Quartil. Die Whiskers stellen das 1,5-fache des Interquartilabstandes bzw. das Maximum und Minimum des Effektivwindes dar. Die Datenpunkte außerhalb der Whiskers werden als Ausreißer betrachtet. Überschneiden sich die eingeschnürten Bereiche um den Median zweier Box-Plots nicht, ist dies ein starker Hinweis auf signifikant unterschiedliche Mediane.

Tabelle 3: Anzahl der Überschreitungen des Effektivwindes gemittelt über die Deutsche Bucht von 9,837 m/s für jeden Monat der Saison (September bis einschließlich Mai) sowie deren prozentualer Anteil an allen Überschreitungen (in Klammern dahinter) für alle Läufe von 20C (1901–2000) und A1B (2001–2100). Ebenfalls angegeben sind die Veränderungen in Prozent für jeden Monat und die Veränderungen des monatlichen Anteils bezüglich der Gesamtüberschreitungen.

Monat	20C	A1B	Zunahme
September	622 (7,10 %)	674 (6,85 %)	+ 8,36 % (- 0,24 %)
Oktober	1167 (13,29 %)	1248 (12,68 %)	+ 6,94 % (- 0,61 %)
November	1481 (16,87 %)	1804 (18,34 %)	+ 21,81 % (+ 1,46 %)
Dezember	1986 (22,62 %)	2076 (21,10 %)	+ 4,53 % (- 1,53 %)
Januar	1697 (19,33 %)	1708 (17,36 %)	+ 0,65 % (- 1,97 %)
Februar	1037 (11,81 %)	1256 (12,77 %)	+ 21,12 % (+ 0,96 %)
März	500 (5,70 %)	648 (6,59 %)	+ 29,60 % (+ 0,89 %)
April	226 (2,58%)	199 (2,02 %)	- 11,95 % (- 0,55 %)
Mai	62 (0,71 %)	226 (2,30 %)	+ 264,52 % (+ 1,59 %)
Gesamt	8778 (100 %)	9839 (100 %)	12,09 % (0 %)

4.5 Wiederkehrwerte

Zur Untersuchung der Auftrittshäufigkeiten von Extremereignissen bietet die Extremwerttheorie EVT (engl. extreme value theory) einen geeigneten Ansatz. An dieser Stelle wird die Theorie nur oberflächlich behandelt und auf tiefergehende Literatur verwiesen [9]. Für Extremwerte über einem Schwellwert bietet die Extremwerttheorie den Ansatz der Threshold Models. Hierbei entspricht die Verteilung der Extremwerte bei einer geeigneten Schwelle der Verallgemeinerten Pareto Verteilung GPD (engl. Generalized Pareto Distribution). Sie ist gegeben durch:

$$H(y) = 1 - (1 + \tfrac{\xi y}{\tilde{\sigma}})]^{-1/\xi} \qquad \text{mit } \{y : y > 0\} \ , (1 + \xi y/\tilde{\sigma}) > 0$$

Hierbei ist ξ der Formparameter und σ der Skalenparameter, welcher in linearer Beziehung zum extremwertstatischen Schwellwert steht. Es ist wichtig einen geeigneten Schwellwert zu finden, denn wenn dieser zu niedrig ist, gibt es zu viele Beobachtungswerte deren Verteilung nicht der GPD entspricht. Ist die Grenze jedoch zu hoch gewählt, gibt es zu wenig Beobachtungen, um noch eine statistische Aussage treffen zu können. Eine einfache Methode einen geeigneten Schwellwert zu finden bietet der Mean Residual Life Plot (MRLP). Hierbei werden für verschiedene Schwellen *u* das Mittel der GPD bestimmt. Da der Skalenparameter linear zum Schwellwert ist, ist dies auch der Fall für das Mittel der Grenzwertüberschreitung. Die GPD liefert somit eine geeignete Näherung für den Schwellwert, bis zu dem Punkt, an dem der Mean Residual Life Plot linear in *u* ist. Für alle Effektivwindgeschwindigkeiten der 20C-Läufe ist der MRLP in Abbildung 11 dargestellt. Zusätzlich zu dem Mittel der Überschreitungen (durchgezogene Linie) ist das 95%-Konfidenzintervall (gestrichelte Linien) angegeben. In rot eingezeichnet ist der aus historischen Sturmfluten ermittelte Grenzwert von 9,837 m/s. Von allen Effektivwinden aller identifizierter Sturmtracks der drei 20C Läufe überschreiten mehr als ein Viertel diese Geschwindigkeit. Eine geeignetere Wahl wären etwa 15 m/s, da der MRLP bis zu diesem Punkt in etwa linear zur Schwelle *u* verläuft. Da die Konfidenzintervalle jedoch auch bis zu einer Grenze von etwa 18 m/s sehr gering sind, fällt die Wahl bei dieser Betrachtung auf den höheren Schwellwert. Lediglich circa 3 % aller Effektivwinde der identifizierten Sturmtracks der 20C Läufe überschreiten diese Grenze. Die extremwertstatistische Analyse eignet sich besonders für Effektivwindgeschwindigkeiten, die mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Sturmflut führen, da wie in Abschnitt 3.2 gezeigt wurde, die historischen Sturmfluten in Cuxhaven ab einer Effektivwindgeschwindigkeit von etwa 19 m/s unabhängig von der astronomischen Tide auftreten.

Eine weitere Methode zur Überprüfung der Schwellwertwahl stellt eine Modelldiagnose dar. Diese besteht aus vier Abbildungen; dem Probability Plot, dem Quantil Plot, dem Return Level Plot und der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung. Beim Probability Plot und dem Quantil Plot werden die Werte der Beobachtungen und die Werte des Modells, sprich der GPD, in einem Scatterplot dargestellt. Umso näher die Punkte an der Winkelhalbierenden liegen, desto besser kann das Modell die Beobachtungen

wiedergeben. Der Return Level Plot gibt die Wiederkehrwerte in einem bestimmten Wiederkehrintervall an. Der Density Plot gibt die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Beobachtungen sowie der GPD an. Abbildung 12 zeigt die Modelldiagnose für den Schwellwert 9,837 m/s (a) und den Schwellwert 18 m/s (b) für die 20C-Läufe. Auch diese Darstellung bestätigt, dass eine Grenzwertwahl von 18 m/s geeigneter für die extremwertstatistische Analyse ist.

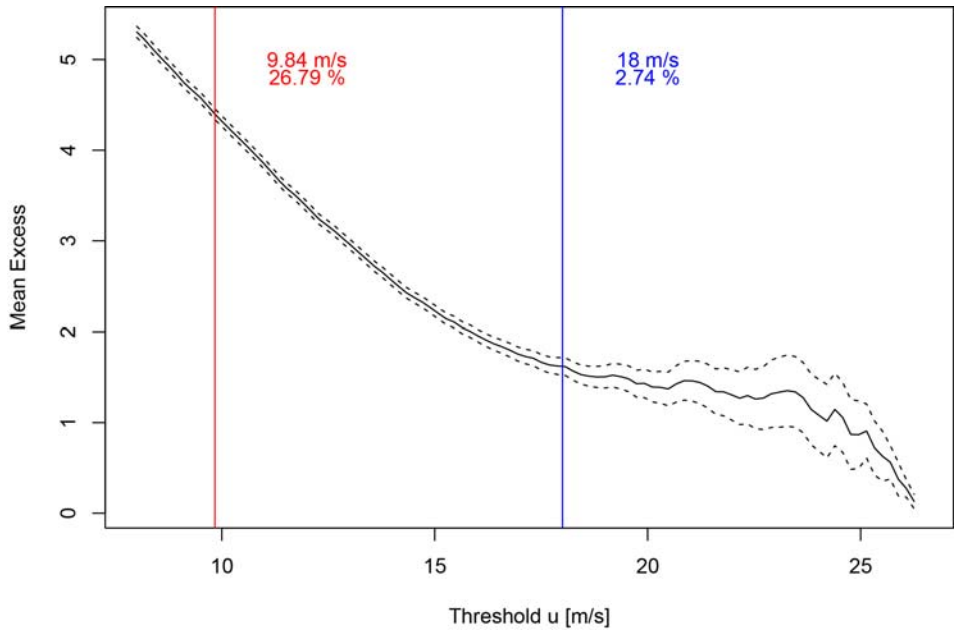
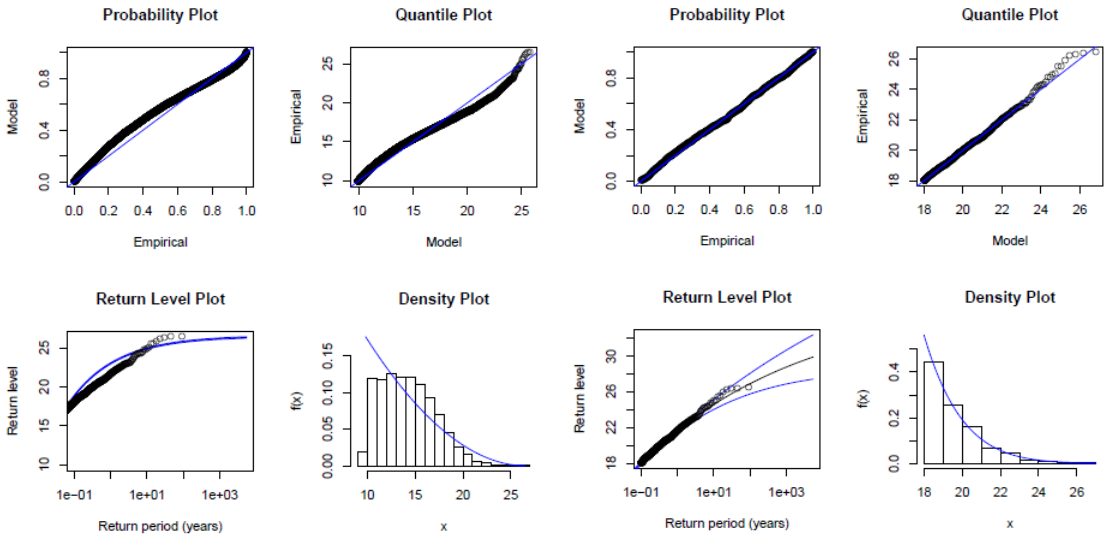


Abbildung 11: Mean Residual Life Plot für die Effektivwindgeschwindigkeiten aller 20C-Läufe. Dargestellt sind die Mittel der Überschreitungen (durchgezogene Linie) und die 95%-Konfidenzintervalle (gestrichelte Linien). In rot eingetragen ist der aus historischen Sturmfluten bestimmte Schwellwert und in blau die extremwertstatistisch ermittelte Grenze. Ebenfalls angegeben sind die prozentualen Überschreitungen aller Effektivwinde der 20C Läufe.



(a) Schwellwert: 9,837 m/s (b) Schwellwert: 18 m/s

Abbildung 12: Modelldiagnose mit Probability Plot (links oben), Quantil Plot (rechts oben), Return Level Plot (links unten) und der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung (rechts unten) für den Schwellwert von 9,837 m/s (a) und den Schwellwert von 18 m/s der 20C-Läufe.

In Abbildung 13 sind die Wiederkehrwerte zu bestimmten Wiederkehrperioden für die Läufe von 20C (türkis) und von A1B (orange) dargestellt. Der Wiederkehrwert entspricht dabei der Effektivwindgeschwindigkeit in m/s, die in einem entsprechenden Wiederkehrintervall statistisch einmal auftritt. Zu deren Berechnung stehen alle Überschreitungen von 20C und A1B, deren Verteilungen in Abbildung 14 dargestellt sind, zur Verfügung. Da in Abschnitt 4.2 gezeigt wurde, dass keine signifikante Änderung der Sturmdauer auftritt, ist diese Darstellung sehr ähnlich zu Abbildung 7, bei der die Anzahl der sturmflutrelevanten Ereignisse dargestellt ist. Die erhöhte Anzahl an Überschreitungen in den A1B-Läufen bei den Effektivwindgeschwindigkeiten von 18 m/s bis 22 m/s spiegelt sich auch in den um etwa 0,5 m/s höheren Return Levels wieder, deren Wiederkehrintervall von mehrmals im Jahr bis alle 3 bis 4 Jahre reicht. Eine erhöhte Anzahl von Überschreitungen führt zu einem geringeren Wiederkehrintervall, in dem die Geschwindigkeit statistisch einmal auftritt. Bei den Wiederkehrwerten von 22 m/s bis 24 m/s treten zwischen den 20C-Läufen und den A1B-Läufen kaum Unterschiede auf, da auch die Anzahl der Überschreitungen kaum variiert. Die multidekadisch auftretenden Effektivwindgeschwindigkeiten sind bei 20C höher als bei A1B. Diese Differenzen lassen sich ebenfalls mit Hilfe der Abbildung 14 anhand der Anzahl der Überschreitungen mit Geschwindigkeiten von 24 m/s -26 m/s erklären. Anders als bei den anderen Klassen ist die Anzahl der Überschreitungen hier für 20C minimal größer als bei A1B. Besonders bei hohen Wiederkehrwerten haben geringe Änderungen in der Anzahl an Überschreitungen einen größeren Einfluss auf die Wiederkehrperiode. Zur Veranschaulichung soll folgendes Beispiel dienen: Eine Ef-

fektivwindgeschwindigkeit von 24 m/s wird in 20C von 1901–2000 2 mal simuliert. Somit tritt diese Geschwindigkeit statisch einmal in 50 Jahren auf. Wird in A1B von 2001–2100 nur noch eine Überschreitung mit 24 m/s simuliert, entspricht dieser Wert einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren. Aus diesem Grund sind die Konfidenzintervalle für hohe Wiederkehrintervalle auch wesentlich größer.

Da die Return Levels aus der GPD bestimmt wurden, ist es möglich auch für höhere Effektivwind von 26 m/s und mehr ein Wiederkehrintervall zu bestimmen, obwohl solche Geschwindigkeiten nicht simuliert wurden. Hierbei ist anhand der Sättigung der Kurve erkennbar, dass es eine obere Grenze bezüglich der möglichen auftretenden Geschwindigkeiten gibt, die bei $u - \sigma/\xi$ liegt. Für 20C ergibt sich für diese Grenze ein Effektivwind von etwa 36,1 m/s und für A1B von ca. 29,9 m/s.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass häufigere Ereignisse von mehrmals im Jahr bis alle 3-4 Jahre in den Zukunftssimulationen zunehmen während multidekadisch auftretende Effektivwindgeschwindigkeiten abnehmen. Da die hier betrachteten Wiederkehrwerte mit großer Wahrscheinlichkeit immer zu einer Sturmflut führen, gilt diese Untersuchung nicht der Abschätzung des Sturmflutpotentials sondern es bleibt zu klären, ob geringfügige Änderungen in den Wiederkehrwerten signifikante Veränderungen in der Stärke der Sturmflut auslösen.

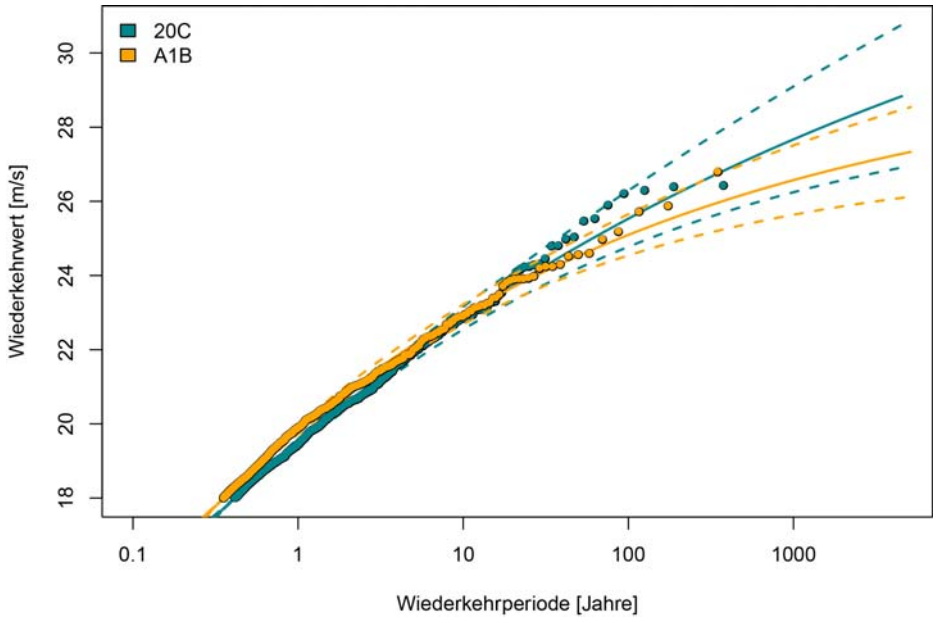


Abbildung 13: Wiederkehrwerte in m/s (Ordinate) für verschiedene Wiederkehrperioden in Jahre (Abszisse) für die Läufe von 20C (1901–2000, türkis) und von A1B (2001–2100, orange). Eingegangen sind alle Effektivwindgeschwindigkeiten ab 18 m/s. Zusätzlich eingetragen ist das 95%- Konfidenzintervall (gestrichelte Linien).

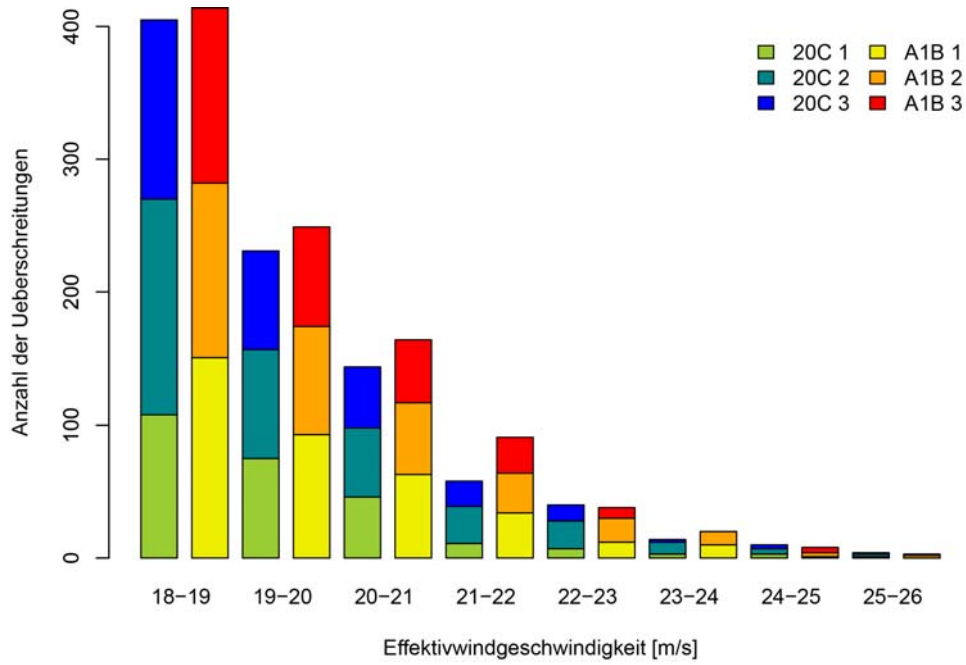


Abbildung 14: Anzahl des Auftretens der Effektivwindgeschwindigkeiten von 18 m/s bis 26 m/s für die 20C-Läufe (blau bis grün) und A1B-Läufe (gelb bis rot).

5 CCLM Simulationen

Im Rahmen des Projekts wurden Simulationen mit dem Regionalmodell COSMO-CLM mit einer Auflösung von 0.165° x 0.165° (≈ 18km) für beobachtete und potentielle Sturmflutereignisse durchgeführt. Die Modellkonfiguration des CCLM ist dabei identisch zur ersten Projektphase, mit einer horizontalen Auflösung von 18km und 32 vertikalen Schichten. Der interne Zeitschritt beträgt 150 Sekunden. Die Modellregion für die zentrale Realisierung ist in Abbildung 15 dargestellt.

Die Arbeiten können äquivalent zu den Arbeiten in PAK1 in zwei Abschnitte unterteilt werden.

Zunächst wurden die 15 stärksten Sturmflutereignisse während des Zeitraums 1979 bis 2008, gemessen am maximalen Windstau gemäß des Sturmflutenatlas der Station Cuxhaven [3], simuliert.

In einem zweiten Schritt wurden die 15 stärksten Ereignisse der ECHAM5/MPIOM Simulationen, gemessen am maximal aufgetretenen Effektivwind über der Deutschen Bucht im Zeitraum 1901 bis 1970 bzw 2001 bis 2071, mit dem Regionalmodell COSMO- CLM nachsimuliert.

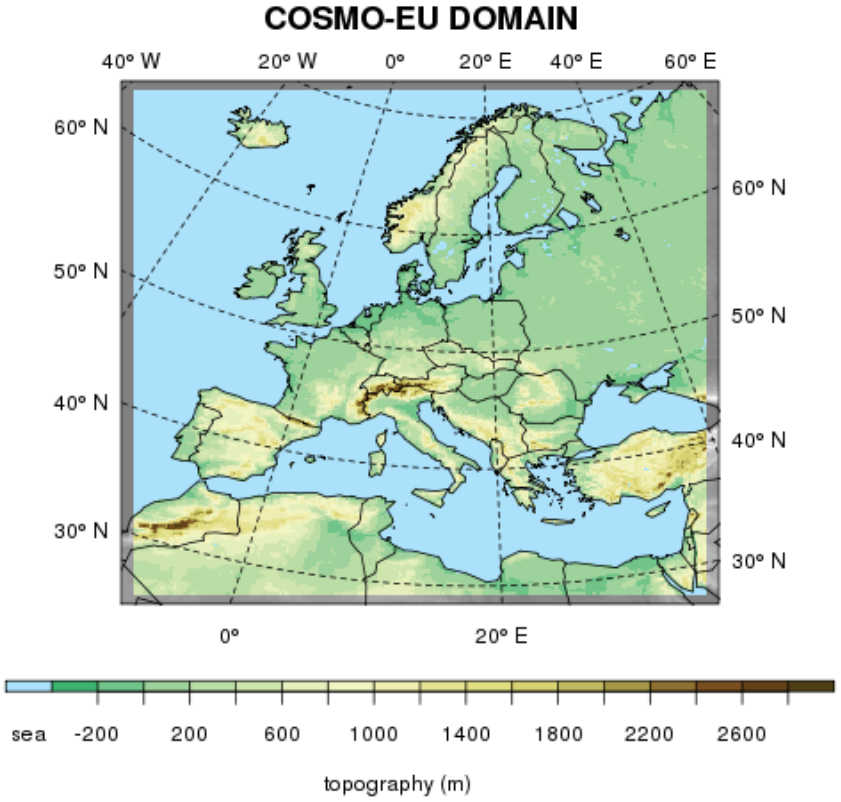


Abbildung 15: Verwendete Modellregion für zentrale Realisierung

Einschub: Unterschiede der CCLM Simulationen aus PAK1 und PAK2

In der ersten Projektphase wurden CCLM Simulationen für beobachtete Sturmflutereignisse und potentielle Sturmflutereignisse aus den ECHAM5 Modellsimulationen regionalisiert. Der Unterschied zu den Arbeiten in dieser Phase besteht darin, dass damals die 30 stärksten beobachteten Sturmflutereignisse während des Zeitraums 1957 bis 2002 ausgewählt wurden und die Simulationen mit ERA-40 Reanalysedaten angetrieben wurden. Im Gegensatz hierzu werden hier die stärksten Sturmflutereignisse im ERA-Interim Zeitraum (1979 bis 2008) ausgewählt und mit ERA-Interim Reanalysen am Rand des Modellgebiets angetrieben.

Des Weiteren wurden in der ersten Projektphase bezüglich der Szenarienläufe nur die Zeiträume 1970 bis 2000 und 2070 bis 2100 untersucht. Dementsprechend wurden die 60 stärksten potentiellen Sturmflutereignisse auch nur aus diesen Zeiträumen bestimmt und regionalisiert. Im Gegensatz hierzu wurde in dieser Phase der gesamte Zeitraum von 1900 bis 2000 (20C) und 2001 bis 2001 (A1B) untersucht. Die ausgewählten potentiellen Sturmflutereignisse die hier regionalisiert wurden, wurden demnach aus dem Zeitraum 1900 bis 1970 und 2001 bis 2070 ausgewählt.

Zusammen mit den Ergebnissen der ersten Projektphase ist somit der gesamte Zeitraum der 20C und A1B ECHAM5 IPCC-AR4 Simulationen abgedeckt

5.1 CCLM Simulationen angetrieben mit ERA-Interim Reanalysen

Die ERA-Interim Daten liegen für den Zeitraum von 1979 bis 2011 vor. Da der hier verwendete Sturmflutkatalog nur Sturmfluten zwischen 1900 und 2008 beinhaltet, werden nur Ereignisse der Jahre 1979 bis 2008 für die Simulationen ausgewählt.

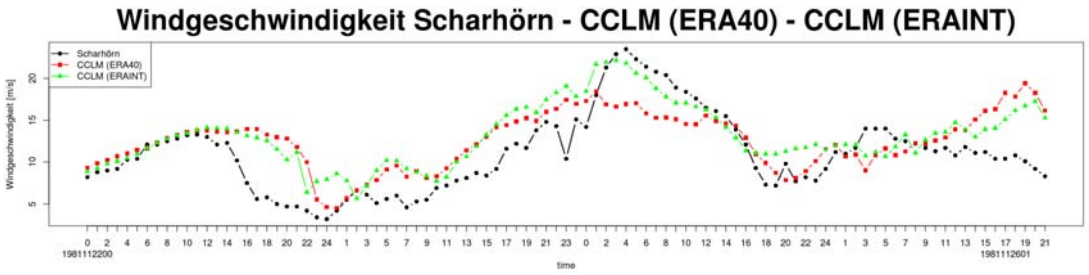
Tabelle 4 listet die stärksten Ereignisse des oben genannten Zeitraums auf, wobei zusätzlich zur Angabe des maximal aufgetretenen Windstauwertes und dessen Zeitpunkt auch Start und Ende der CCLM Simulationen angegeben sind.

Anhand der Tabelle 4 ist erkennbar, dass 14 der 15 Ereignisse im Zeitraum zwischen 1957 und 2002 beobachtet wurden. Demnach wurden diese Sturmfluten bereits mit ERA-40 Antrieb regionalisiert. Einzige Ausnahme bildet das sechst-stärkste Ereignis im März 2008. Für die 14 Sturmflutereignisse, für die CCLM Simulationen mit ERA-40 (aus PAK1) sowie ERA-Interim Antrieb (aus PAK2) vorliegen, wurde ein Vergleich der Effektivwindgeschwindigkeiten, Windrichtung sowie Windgeschwindigkeit durchgeführt.

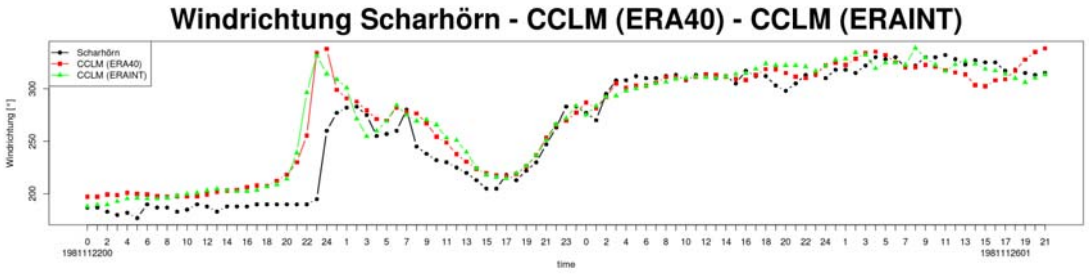
Tabelle 4: 15 stärkste Sturmflutereignisse 1979 bis 2008 gemessen am maximal aufgetretenen Windstau an der Station Cuxhaven. Angegeben sind Datum und Uhrzeit, Höhe des maximalen Windstaus, Start- und Enddatum der CCLM Simulation

Rang	Datum (max. Windstau)	Windstau [cm]	Start CCLM	Ende CCLM
1	26.02.02 / 19:20	396	21.02.2002	01.03.2002
2	26.02.90 / 20:10	393	21.02.1990	01.03.1990
3	03.12.99 / 19:55	368	28.11.1999	06.12.1999
4	01.02.83 / 22:10 – 22:25	360	27.01.1983	04.12.1983
5	26.01.90 / 05:50 – 05:55	353	21.01.1990	29.01.1990
6	01.03.08 / ca. 14:30 & 14:40	353	25.02.2008	04.03.2008
7	20.12.93 / 01:40-01:45	334	15.12.1993	23.12.1993
8	18.01.83 / 10:00	333	13.01.1983	21.01.1983
9	06.11.85 / 11:30 - 11:50	329	01.11.1985	09.11.1985
10	14.02.89 / 12:50 -12:55	329	09.02.1989	17.02.1989
11	24.11.81 / 06:55	327	19.11.1981	27.11.1981
12	10.01.95 / 07:30	316	05.01.1995	13.01.1995
13	28.01.94 / 17:15	313	23.01.1994	31.0.1.1994
14	30.01.00 / 04:30	300	25.01.2000	02.02.2000
15	01.01.81 / 14:35 -14:40	297	27.12.1980	04.01.1981

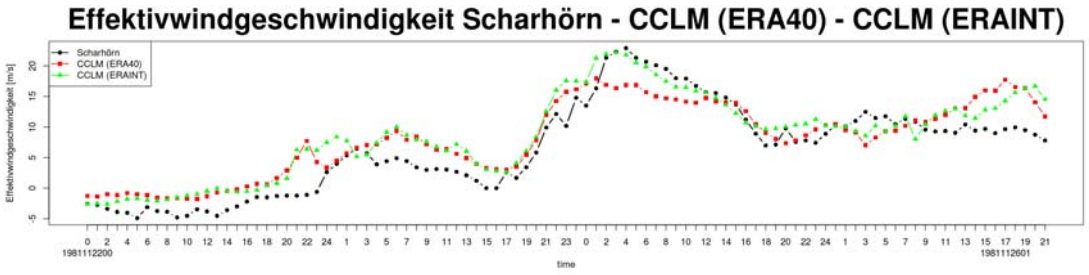
Ein Vergleich der verschiedenen mit CCLM erzeugten Windgeschwindigkeiten und Windmessungen an der Station Scharhörn (bereitgestellt von der Hamburg Port Authority) zeigen die Abbildungen 16 für das Sturmflutereignis im November 1981.



(a)



(b)



(c)

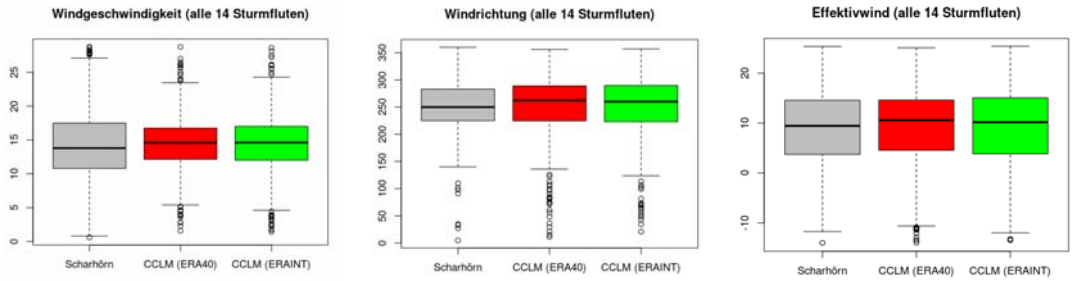
Abbildung 16: Vergleich von (a) Windgeschwindigkeit (b) Windrichtung und (c) Effektivwind-geschwindigkeit für die Sturmflut vom November 1981 für CCLM angetrieben mit ERA-40 (rot) bzw. ERA-Interim (grün) sowie Beobachtungen an der Station Scharhörn (schwarz)

Deutlich zu erkennen ist, dass die momentan-Windgeschwindigkeiten der beiden CCLM Simulationen anfangs sehr ähnlich sind, zum Zeitpunkt der stärksten absoluten Windgeschwindigkeiten aber deutlich voneinander abweichen. Die CCLM Simulation angetrieben mit ERA-Interim Reanalysen (grün) ergibt dabei einen Wert, der deutlich näher an der Beobachtung liegt als das Pendant bei ERA40-Antrieb (rot). Der Vergleich der Windrichtungen (b) zeigt dagegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden CCLM Simulationen.

Die Abbildung 17 (a-c) zeigt die Verteilungen der Windgeschwindigkeiten auf Basis aller 14 Sturmflutereignisse, die mit beiden Antrieben berechnet wurden.

Im Vergleich zur Station Scharhörn sind die Ergebnisse der mit ERA-Interim angetriebenen CCLM Simulation im zeitlichen Verlauf näher an den Daten für Scharhörn, was sich sowohl in einer höheren Korrelation (basierend auf stündlichen Werten) als

auch in einem geringeren RMSE für alle drei betrachteten Größen (siehe Tabelle 5) niederschlägt.



(a) (b) (c)

Abbildung 17: Box-Whisker-Plots von (a) Windgeschwindigkeit in m/s (b) Windrichtung in Grad und (c) Effektivwindgeschwindigkeit in m/s für alle 14 Sturmflutereignisse für CCLM angetrieben mit ERA-40 (rot) bzw. ERA-Interim (grün) sowie Beobachtungen an der Station Scharhörn (grau). Angegeben sind Median, 25. sowie 75. Perzentil, Minimum und Maximum, sowie Ausreißer (Punkte).

Tabelle 5: Korrelation, RMSE für die CCLM Simulationen mit ERA-40 bzw. ERA-Interim Antrieb für die drei Parameter: Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Effektivwindgeschwindigkeit an der Station Scharhörn (Beobachtungen) oder nächstliegender Gitterpunkt (ERA-40 & ERA- Interim)

Parameter	Korrelation		RMSE	
	ERA-40	ERA-Interim	ERA-40	ERA-Interim
Windgeschwindigkeit	0.73	0.79	3.5 m/s	3.17 m/s
Windrichtung	0.77	0.82	31.36°	28.36°
Effektivwindgeschwindigkeit	0.86	0.89	3.94 m/s	3.52 m/s

Für die 15 Sturmflutereignisse wurden insgesamt fünf CCLM Simulationen mit leicht unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt. Abbildung 18 stellt die maximal aufgetretenen Effektivwindgeschwindigkeiten über einem der Gitterpunkte der Deutschen Bucht Region während des jeweiligen Simulationszeitraumes (wie Tabelle 4 angegeben) graphisch dar. Die Sturmflutereignisse sind anhand ihres maximal auftretenden Windstaus (Sturmflut #1: Sturmflut mit höchstem Windstau, Sturmflut #2: Sturmflut mit zweithöchsten beobachteten Windstau, usw.) aufgelistet. Deutlich zu erkennen ist, dass die maximale Effektivwindgeschwindigkeit über der Deutschen Bucht Region nicht eng mit der Höhe des Windstaus zusammenhängt. Dies könnte an der Größe der Region an sich und durch die vielen Gitterpunkte (bedingt durch die relativ feine Auflösung des Regionalmodells) bedingt sein. Interessant wäre die Untersuchung inwieweit die zeitliche Abfolge des Windfeldes über der Deutschen Bucht und die Windstauhöhe an der Station Cuxhaven zusammenhängen. In der ersten Projektphase wurde hierbei schon erste Untersuchungen zu dem zeitlichen Versatz von Effektivwindgeschwindigkeit und Windstauhöhe durchgeführt. Festzuhalten bleibt,

dass die maximale Effektivwindgeschwindigkeit über der gesamten Deutschen Bucht Region nicht immer ein guter Proxy für die Windstauhöhe zu sein scheint (z.B. Sturmflut Nr. 1).

Abbildung 18 zeigt deutlich, dass es für einige Sturmfluten einen deutlichen Spread in der maximalen Effektivwindgeschwindigkeit zwischen den einzelnen Ensemble-mitgliedern gibt.

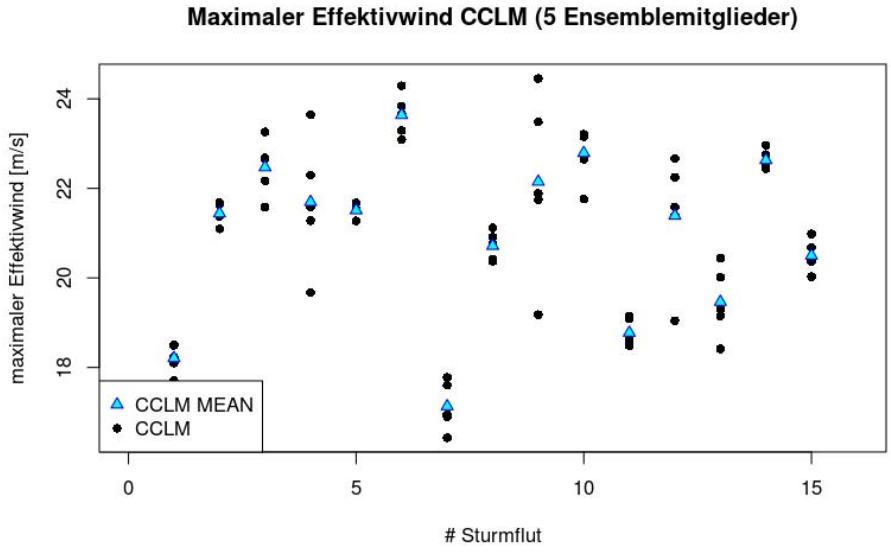


Abbildung 18: Maximale aufgetretene Effektivwindgeschwindigkeit über der Deutschen Bucht Region in den 5 CCLM Ensemblemitgliedern (•) für alle 15 Simulationen mit ERA-Interim Antrieb aus Tabelle 4. Zusätzlich ist das Mittel der 5 CCLM Simulationen (Δ) dargestellt.

5.2 CCLM Simulationen angetrieben ECHAM5

Potentielle Sturmflutereignisse in den ECHAM5/OM1 IPCC AR4 Szenarienläufen für die Forcingperioden und -intensitäten A1B und 20C wurden entsprechend des PAK1-Ansatzes unter Verwendung des Sturmidentifikationsverfahrens identifiziert.

Tabelle 6 listet die 19 stärksten Ereignisse (gemessen am maximalen Windstau über der Deutschen Bucht Region) aus den 20C (1901-2000) sowie A1B (2001-2100) Perioden auf. Vier der 19 Stürme wurden bereits in der ersten Projektphase simuliert (rot gekennzeichnet). Die weiteren 15 Ereignisse wurden mit dem Regionalmodell COSMO-CLM mit einer horizontalen Auflösung von ca. 18km in dieser Projektphase nachsimuliert, jedes Ereignis jeweils fünf mal mit leicht veränderter Position des Regionalmodell-Randes. Damit sollte die Sensitivität des Ereignisses gegenüber kleinen Änderungen bestimmt werden. Insgesamt stammen 11 der insgesamt 19 stärksten Stürme aus den 20C und 8 Stürme aus den A1B Läufen.

Tabelle 6: Liste der 19 stärksten potentiellen Sturmflutereignisse (gemessen an der maximal aufgetretenen Effektivwindgeschwindigkeit v_{eff} über der Deutschen Bucht Region) aus ECHAM5 20C und A1B. Zusätzlich ist das Datum/Uhrzeit des Auftretens der maximalen Effektivwindgeschwindigkeit, die max. Effektivwindgeschwindigkeit, sowie Start- und Enddatum der CCLM Simulation. Rot markierte Ereignisse wurden bereits in PAK1 simuliert.

Rang	Lauf	Datum [max(v_{eff})]	Start CCLM	Ende CCLM	max(v_{eff}) [m/s]
1	A1B 3	11.12.2037 18 UTC	06.12.2037	15.12.2037	26.81
2	20C 3	26.11.1959 00 UTC	21.11.1959	30.11.1959	26.44
3	20C 2	11.11.1911 18 UTC	06.11.1911	15.11.1911	26.41
4	20C 1	10.12.1938 12 UTC	05.12.1938	14.12.1938	26.31
5	20C 2	14.10.1967 12 UTC	09.10.1967	18.10.1967	25.92
6	A1B 2	30.11.2036 18 UTC	25.11.2036	04.12.2036	25.89
7	A1B 2	17.10.2052 00 UTC	12.10.2052	21.10.2052	25.73
8	20C 2	27.12.1948 00 UTC	22.12.1948	31.12.1948	25.55
9	20C 3	14.01.1928 12 UTC	09.01.1928	18.01.1928	25.48
10	A1B 3	29.11.2097 06 UTC	24.11.2097	04.12.2097	25.20
11	20C 1	15.10.1912 06 UTC	10.10.1912	19.10.1912	25.05
12	20C 1	16.11.1997 06 UTC	11.11.1997	20.11.1997	24.81
13	A1B 1	28.10.2079 06 UTC	23.10.2079	01.11.2079	24.61
14	A1B 2	10.11.2063 12 UTC	05.11.1963	14.11.1963	24.57
15	A1B 3	02.12.2064 12 UTC	28.11.2064	07.12.2064	24.53
16	20C 1	11.04.1968 06 UTC	06.04.1968	15.12.1968	24.47
17	A1B 3	06.01.2098 12 UTC	01.01.2098	10.01.2098	24.31
18	20C 2	24.11.1925 06 UTC	19.11.1925	28.11.1925	24.30
19	20C 3	25.12.1903 00 UTC	20.12.1903	29.12.1903	24.26

Abbildung 19 zeigt die maximal aufgetretenen Effektivwindgeschwindigkeiten im ECHAM5 Szenariolauf sowie in den fünf CCLM Ensemblesimulationen für die 15 potentiellen Sturmflutereignisse aus Tabelle 6.

Im Mittel weist das CCLM geringere maximale Effektivwindgeschwindigkeiten als das Globalmodell auf. Der Spread zwischen den einzelnen CCLM Realisierungen kann in einzelnen Fällen mehr als 2m/s betragen. Die Tatsache, dass die simulierten extremen Windgeschwindigkeiten im Regionalmodell geringer sind als im antreibenden Modell ist ein bekannter Effekt, der bisher auf die unterschiedliche Behandlung der bodennahen Grenzschicht zurückzuführen ist.

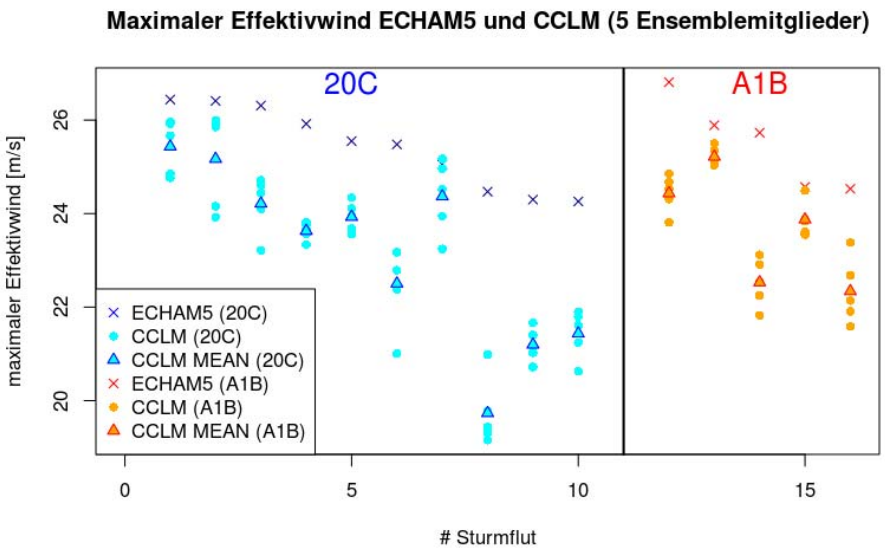


Abbildung 19: Maximal aufgetretene Effektivwindgeschwindigkeit über der Deutschen Bucht Region in ECHAM5 (×) sowie den 5 CCLM Ensemblemitgliedern (•). Zusätzlich ist das Mittel der 5 CCLM Simulationen (Δ) dargestellt. Potentielle Sturmflutereignisse aus dem 20C Zeitraum sind blau/hellblau, aus dem A1B Zeitraum sind rot/orange gekennzeichnet.

6 Zusammenfassung

Das PAK-Sturm 2 Projekt ist das Folgeprojekt von PAK-Sturm, bei dem auf Basis kürzerer Perioden aus Klimasimulationen die Änderungen des Sturmflutpotentials an der deutschen Nordseeküste unter veränderten klimatischen Bedingungen untersucht wurden.

Im aktuellen Projekt werden die Ergebnisse des gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modells ECHAM5/OM1 für drei Läufe des rezenten Klimas mit beobachteten Treibhausgaskonzentrationen (20C) sowie für die Läufe des zukünftigen Klimas mit veränderten Treibhausgaskonzentrationen (A1B) für die Zeitscheiben 1900-2000 und 2001-2100 untersucht.

Zur Abschätzung des Sturmflutpotentials dient ein objektives Verfahren, welches Stürme mit einer Mindestgröße und Mindestandauer in den Modelldaten basierend auf den momentanen 6-stündlichen 10-Meter Winden identifiziert. In Anlehnung an das KFKI Projekt MUSE wurde auch in diesem Projekt die auf 295° projizierte Windgeschwindigkeit (Effektivwind) gemittelt über die Deutsche Bucht bestimmt, da, wie in PAK-Sturm untersucht wurde, ein enger Zusammenhang zwischen dem Effektivwind und dem Windstau an der Station Cuxhaven besteht. Diese Station dient auch in diesem Projekt wieder als Repräsentant für die deutsche Nordseeküste.

Da seit dem PAK-Sturm Projekt eine verbesserte Version des Identifikationsalgorithmus vorliegt, war eine nochmalige Validierung der Methode an den Reanalysedaten von ERA40 notwendig. Mit dem verbesserten Algorithmus lassen sich nun 80 der 82 historischen Sturmfluten der Station Cuxhaven für die Monate September bis einschließlich Mai identifizieren. Es zeigt sich, dass historische Sturmfluten in Cuxhaven erst ab einer Effektivwindgeschindigkeit auftreten, die dem 91,97 Perzentil der klimatologischen Verteilung entspricht. Somit ergibt sich für das ECHAM5 Gitter ein Schwellwert von 9,837 m/s (gemittelt über die Gitterpunkte, die die Deutsche Bucht repräsentieren), ab dem Sturmflutereignisse auftreten können.

Im nächsten Schritt wurden die Sturmereignisse für die Monate September bis einschließlich Mai in den ECHAM5 Modelldaten identifiziert. Hierbei ergibt sich, dass die Anzahl der sturmflutrelevanten Ereignisse für die A1B-Läufe von 2001 bis 2100 um circa 12,4 % hinsichtlich der 20C-Läufe im Zeitraum von 1901 bis 2000 zunehmen. Die jährliche Anzahl der potentiellen Sturmflutereignisse weist im Ensemble-Mittel einen statistisch signifikanten Trend mit einer Zunahme von etwa 1,5 Ereignissen von 1900 bis 2100 auf. Bei der separaten Betrachtung der einzelnen Läufe weist jedoch lediglich Lauf 1 mit einer Zunahme von 3 Ereignissen in 200 Jahren eine signifikante Änderung auf. Des Weiteren wurde festgestellt, dass besonders Ereignisse mit einer Überschreitung von 2–7 m/s und 11–12 m/s sowie 13–14 m/s über dem

Schwellwert zunehmen, wobei sich besonders die stärkeren Ereignisse in ihrer Anzahl um bis zu maximal das 1,2-fache erhöhen. Eine Untersuchung der Andauer von potentiellen Sturmflutereignissen anhand der Anzahl der Überschreitungen des Schwellwerts im Bereich der Nordsee ergab keine relevanten Veränderungen.

Ebenfalls untersucht wurden die interannualen Variationen der Effektivwindgeschwindigkeiten für die Sturmflutsaison von September bis Mai. In den Zukunfts-Szenarien nehmen vor allem die Windgeschwindigkeiten für den Monat Mai zu. Eine Untersuchung der Anzahl der sturmflutrelevanten Ereignisse pro Monat ergab, dass es eine Verteilung der Hauptsturmflutaktivität hin zu mehr Ereignissen in Spätherbst und Spätwinter bis Frühling gibt. Ausgeprägte dekadische bis multidekadische Variationen sind sowohl im Median, im 95. Perzentil sowie in den Maximalwerten des Effektivwindes erkennbar. Eine mögliche Verknüpfung zu großskaligen Zirkulationsmustern, wie beispielsweise der NAO, wurde im Rahmen des Projektes nicht betrachtet und bietet Raum für weitere Untersuchungen. Eine gute Möglichkeit zur Untersuchung von Auftrittswahrscheinlichkeiten von Extremereignissen bietet die Extremwerttheorie. Hierbei entspricht die Verteilung von Extremwerten über einer geeigneten Schwelle der Verallgemeinerten Pareto Verteilung. Untersuchungen ergaben, dass eine Grenzwertwahl von ca. 18 m/s wesentlich besser geeignet ist als der aus historischen Sturmfluten bestimmte Schwellwert von 9,837 m/s, um extremwertstatistische Analysen durch zuführen. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass höhere Effektivwinde in den A1B-Läufen zu verzeichnen sind, die mehrmals im Jahr bis alle 3–4 Jahre auftreten, während multidekadisch auftretende Ereignisse geringere Effektivwindgeschwindigkeiten aufweisen. Hohe Konfidenzintervalle in den Bereichen von großen Wiederkehperioden weisen jedoch auf eine stark ausgeprägte statistische Unsicherheit hin. Äquivalent zur ersten Projektphase wurden auch in PAK2 Simulationen mit dem Regionalmodell COSMO-CLM durchgeführt. Zunächst wurden dabei die 15 stärksten beobachteten Sturmflutereignisse an der Station Cuxhaven im Zeitraum 1979 bis 2008 ausgewählt. Die Auswahl richtete sich dabei nicht an dem aufgetretenem maximalen Gesamtwasserstand, sondern an dem maximal aufgetretenem Windstauanteil. Diese 15 Ereignisse wurden dann mittels CCLM in einer Auflösung von ca. 18km unter Verwendung der ERA-Interim Reanalysen regionalisiert. Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen dieser Simulationen und der Ergebnisse aus PAK1 mit ERA-40 Antrieb zeigte eine bessere Darstellung des zeitlichen Verlaufs (gemessen an der Korrelation) sowie geringere Fehler (gemessen am RMSE) für die Parameter Windgeschwindigkeit, -richtung und Effektivwindgeschindigkeit für die Simulationen mit ERA-Interim Antrieb.

In einem zweiten Schritt wurden die 15 stärksten potentiellen Sturmflutereignisse aus den ECHAM5 20C und A1B Simulationsläufen nachsimuliert. Dadurch, dass jedes Ereignis aus einem Mini-Ensemble mit fünf Mitgliedern besteht, die sich nur durch leicht unterschiedliche Randbedingungen unterscheiden, kann die Sensitivität eines Ereignisses gegenüber kleinen Störungen untersucht werden. Ein Vergleich mit den maximalen Effektivwindgeschwindigkeiten aus ECHAM5 und CCLM zeigt, dass die

Windgeschwindigkeiten im Regionalmodell zumeist geringer sind. Für einige Ereignisse ist des Weiteren ein großer Spread, in Bezug auf die maximale Effektivwindgeschwindigkeit über der Deutschen Bucht, zwischen den fünf CCLM Ensemblemitgliedern zu erkennen. Die Ergebnisse der Simulationen stehen in hoher zeitlicher (stündlicher) und räumlicher Auflösung für weitere Arbeiten zur Verfügung.

7 Ausblick

Die in der ersten Phase von PAK entwickelte –und in der zweiten Phase– weiterentwickelte Methodik zur Identifikation potentieller Sturmflutereignisse in Klimamodelldaten wurde bisher alleinig auf die CMPIP3 Modellsimulationen des ECHAM5/MPI-OM Modells angewendet. Zu einer besseren Einschätzung des Sturmflutrisikos an der deutschen Nordseeküste könnte diese Methodik nun auf weitere Simulationen anderer Globalmodelle aus CMIP3 oder auf die CMIP5 Modellläufe angewendet werden.

Die Methodik zur Identifikation der Ereignisse basiert alleinig auf den Windstauwerten der Station Cuxhaven. Eine Problematik, die während der Arbeiten in diesem Projekt auftrat, ist die große Anzahl potentieller Sturmflutereignisse mit geringen Effektivwindgeschwindigkeiten, die jedoch in Beobachtungen keiner Sturmflut zugeordnet werden konnten. Dies könnte dadurch zu Stande kommen, dass der Windstau nicht zur passendenTidephase (z.B. Niedrigwasser) auftrat. Möglich ist aber auch ein Defizit in der Methodik. Mit kontinuierlichen Windstauwerten könnte diese Fragestellung untersucht werden, was zu einer größeren Sicherheit der Ergebnisse führen würde.

Durch die Verwendung weiterer Windstauwerte, auch von anderen Stationen an der Nordsee (z.B. Husum, Emden, Norderney, Niederlande, Schottland), könnten die meteorologischen Prozesse, die zu Sturmfluten führen, weiter untersucht werden. Hierbei stellt sich vor allem die Frage, in wieweit die zeitliche und räumliche Abfolge von Sturmfeldern zur Erhöhung/Erniedrigung des Windstaus führen kann. Diese Frage könnte auch durch die Verwendung von Regionalmodellsimulationen sowie Windstaumodellläufen untersucht werden. Aus den beiden Projektphasen stehen eine Mehrzahl RCM Simulationen in einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung zur Verfügung. Diese könnten zum Antreiben von Windstaumodellen verwendet werden.

8 Literatur

[1] Dr. Sylvin Müller-Navarra. Der Sturmflutwarndienst des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie. Sturmflutgefährdung der Ostseeküste – MUSTOCK Workshop, 2008.

[2] D.J. Befort, G.C. Leckebusch, U. Ulbrich, G. Rosenhagen, H. Heinrich und A. Ganske. Potentielle Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels auf das Sturmflutrisiko an der deutschen Nordseeküste, 2012. PAK-Sturm Projekt Abschlussbericht.

[3] Goennert, Gabriele; Buss, Thomas. Sturmfluten zur Bemessung von Hochwasserschutzanlagen. Landesbetrieb Strassen, Bruecken und Gewaesser, Hamburg, 2:169, 2009.

[4] http://www.clm-community.eu.

[5] D. P. Dee, S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Holm, L. Isaksen, P. Kallberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J.-N. Thepaut, and F. Vitart. The era-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Q.J.R. Meteorol. Soc., 137(656):553–597, 2011.

[6] Michael; Schneider Heiko Roeckner, Erich; Lautenschlager. IPCC-AR4 MPI-ECHAM5 T63L31 MPI-OM GR1.5L40. MPImet/MaD Germany. World Data Center for Climate, 2006.

[7] WMO Publications. No 9 Weather Reporting, 2011. Information for Shipping (Vol.D), S. 526.

[8] J. Jensen, C. Mudersbach, and C. Koziar. Simulationen von extremen Sturmflutwetterlagen in der Nordsee und deren statistische Analyse. Klimaänderungen und Küstenschutz, pages 159–169, 2004. G. Gönnert, H. Graßl, D. Kelletat, H. Kunz, B. Probst, H. von Storch und J. Sündermann.

[9] S. Coles. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer-Verlag London, 2001.

Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

www.baw.de
info@baw.de

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

Bernhard-Nocht-Straße 78
20359 Hamburg

www.bsh.de
posteingang@bsh.de

Deutscher Wetterdienst (DWD)

Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach/Main

www.dwd.de
info@dwd.de

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz

www.bafg.de
posteingang@bafg.de

BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE

bfg Bundesanstalt für Gewässerkunde

IMPRESSUM

Herausgeber:
Bundesanstalt für Gewässerkunde
KLIWAS Koordination
Am Mainzer Tor 1
Postfach 20 02 53
56002 Koblenz
Tel.: 0261 / 1306-0
Fax: 0261 / 1306-5302
E-Mail: kliwas@bafg.de
Internet: http://www.kliwas.de

Redaktion: KLIWAS-Koordination
Bundesanstalt für Gewässerkunde

Autoren: Jian Su, Hu Yang, Thomas Pohlmann
(Institute of Oceanography,
University of Hamburg)
Anette Ganske, Birgit Klein, Holger Klein,
Nikesh Narayan (BSH)

Layout: Christin Hantsche und Tobias Knapp,
Bundesamt für Seeschifffahrt
und Hydrographie - Rostock

Druck: Bundesanstalt für Gewässerkunde

DOI: 10.5675/Kliwas_61/2014_Sturmflutrisiko