

KLIWAS Schriftenreihe KLIWAS-62/2014

**Potentielle Auswirkungen des anthropogenen
Klimawandels auf das Sturmflutrisiko an der
deutschen Nordseeküste**

Koblenz, im Februar 2014



BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE

Freie Universität  Berlin

**UNIVERSITY OF
BIRMINGHAM**





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

**KLIWAS Schriftenreihe
KLIWAS-62/2014**

**Potentielle Auswirkungen des anthropogenen
Klimawandels auf das Sturmflutrisiko an der
deutschen Nordseeküste**

Autoren:

**Daniel J. Befort¹,
G.C. Leckebusch^{1,2},
U.Ulbrich¹,
G. Rosenhagen³,
H. Heinrich⁴,
A. Ganske⁴**

¹Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin,

²School of Geography, Earth and Environmental
Sciences, University of Birmingham,

³Deutscher Wetterdienst, Hamburg,

⁴Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie,
Hamburg

DOI:

10.5675/Kliwas_62/2014_Sturmflutrisiko_2

Seite

Kapitel

Inhaltsverzeichnis

07	1	EINLEITUNG
08	1.1	PROJEKTSTRUKTUR
10	2	DATEN UND MODELLE
10	2.1	STURMFLUTENATLAS DER STATION CUXHAVEN
10	2.2	WINDMESSUNGEN AN DER STATION SCHARHÖRN
10	2.3	RE-ANALYSE-DATEN
11	2.4	ECHAM5/MPI-OM
11	2.5	COSMO-CLM
13	3	METHODIK
13	3.1	REGION NORDSEE UND REGION DEUTSCHE BUCHT
13	3.1.1	REGION DEUTSCHE BUCHT
13	3.1.2	REGION NORDSEE
14	3.2	EFFEKTIVWIND
15	3.3	ALGORITHMUS ZUR IDENTIFIKATION VON STURMEREIGNISSEN
18	4	ERGEBNISSE AUS ERA-40 REANALYSEDATEN UND ECHAM5 GLOBALMODELLSIMULATIONEN
18	4.1	ZUSAMMENHANG ZWISCHEN WINDGESCHWINDIGKEIT BZW. -RICHTUNG UND WINDSTAU AN DER STATION CUXHAVEN
21	4.2	IDENTIFIKATION VON STURMEREIGNISSEN IM ERA40 ZEITRAUM (1957–2002)
21	4.2.1	ZUORDNUNG VON STURMEREIGNISSEN ZU HISTORISCHEN STURMFLUTEN
22	4.2.2	CHARAKTERISTIKA DER STURMEREIGNISSE, DIE HISTORISCHEN STURMFLUTEN ZUGEORDNET WERDEN KONNTEN
22	4.3	IDENTIFIKATION STURMFLUTRELEVANTER STURMEREIGNISSE IN DEN ECHAM5-MODELLDATEN
28	5	ERGEBNISSE AUS ERA-40 REANALYSEDATEN UND ECHAM5 GLOBALMODELLSIMULATIONEN
28	5.1	CCLM SIMULATIONEN AUSGEWÄHLTER HISTORISCHER STURMFLUTEREIGNISSE
34	5.2	CCLM SIMULATIONEN ECHAM5 20C UND A1B
37	6	ZUSAMMENFASSENDER DISKUSSION
40	7	LITERATUR

Seite

Abbildung

Abbildungsverzeichnis

12	2.1	MODELLREGION FÜR DIE COSMO-CLM REGIONALMODELLSIMULATIONEN
13	3.1	VERWENDETE GITTERPUNKTE FÜR DIE DEUTSCHE BUCHT IN DEN DREI VERWENDETEN MODELLEDATENSÄTZEN , A) ERA40 (T159), B) ECHAM5 (T63), C) CCLM (0.165°X0.165°)
14	3.2	NORDSEE-REGION IN DEN ZWEI VERWENDETEN MODELLEDATEN, A) ERA40 (T159), B) ECHAM5 (T63)
15	3.3	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG ZUR BERECHNUNG DES EFFEKTIVWINDS V_{EFF} DURCH PROJEKTION DES IM DATENSATZ VORHANDENEN HORIZONTALEN WINDVEKTORS V_{HOR} AUF DIE RICHTUNG 295°
16	3.4	STURM VINCINETTE, 15.2.BIS 17.02 1962, IDENTIFIZIERT DURCH DEN TRACKINGALGORITHMUS
17	3.5	VERWENDETE REGION FÜR DAS STURM-IDENTIFIKATIONSVERFAHREN
20	4.1	SCATTERPLOT WINDSTAUMAXIMUM AN DER STATION CUXHAVEN UND EFFEKTIVWIND ZUM ERA-40 TERMIN VOR DEM WINDSTAUMAXIMUM
20	4.2	SCATTERPLOT WINDSTAUMAXIMUM AN DER STATION CUXHAVEN UND MAXIMALER EFFEKTIVWIND ZUM ERA-40 TERMIN VOR BZW. NACH DEM WINDSTAUMAXIMUM
20	4.3	SCATTERPLOT EFFEKTIVWIND ZU DEN ZEITPUNKTEN VON ERA-40 WÄHREND DER STURMFLUTVERLÄUFE UND GLEICHZEITIGER WINDSTAU AN DER STATION CUXHAVEN
21	4.4	MAXIMALER KORRELATIONSKOEFFIZIENT FÜR JEDE GITTERBOX ZWISCHEN EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEIT UND WINDSTAU AN DER STATION CUXHAVEN
21	4.5	ZEITDIFFERENZ ZWISCHEN DER ZEITGLEICHEN BETRACHTUNG UND DEM ZEITPUNKT MAXIMALER KORRELATION DES EFFEKTIVWINDS UND DES WINDSTAUS
21	4.6	LEAD-LAG KORRELATION ZWISCHEN EFFEKTIVWIND (GEMITTELT ÜBER DEUTSCHE BUCHT REGION) UND WINDSTAU IN CUXHAVEN
23	4.7	HISTOGRAMM DER ANZAHL DER TRACKS BEZÜGLICH DER MAXIMALEN EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEIT SOWIE DER STURMFLUTTRACKS. DEN STURMFLUTTRACKS WURDE HIERBEI DER MAXIMALE EFFEKTIVWIND ZUM ERA40-TERMIN VOR/NACH DEM WINDSTAUMAXIMUM ZUGEORDNET
24	4.8	HISTOGRAMM DER ANZAHL DER TRACKS BEZÜGLICH DER MAXIMALEN EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEIT SOWIE DER STURMFLUTTRACKS. DEN STURMFLUTTRACKS WURDE HIERBEI DER MAXIMALE EFFEKTIVWIND DES TRACKS GEMÄß ERA40 ZUGEORDNET

Seite

Abbildung

Abbildungsverzeichnis

26	4.13	ANZAHL DER TRACKS BEZÜGLICH IHRER MAXIMALEN EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEIT ÜBER DER DEUTSCHEN BUCHT REGION FÜR DIE DREI DATENSÄTZE ERA40, 20C (BEIDE 1969-2000) UND A1B (2069-2100)
27	4.14	ANZAHL DER EREIGNISSE BEZÜGLICH DER ABSOLUTEN ÜBERSCHREITUNG DES 95.03 PERZENTILS DER EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEIT ÜBER DER DEUTSCHEN BUCHT REGION FÜR DIE ZWEI DATENSÄTZE 20C (1969-2000) UND A1B (2069-2100)
29	5.1	VERTEILUNG DER WINDGESCHWINDIGKEIT, -RICHTUNG UND EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEIT FÜR MESSDATEN AN DER STATION SCHARHÖRN, CCLM UND ERA40 FÜR 19 STURMFLUTEREIGNISSE
31	5.2	ZEITLICHER VERLAUF DER WINDGESCHWINDIGKEIT, -RICHTUNG UND DER EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEIT FÜR DIE STURMFLUT ERA40_S30
32	5.3	ZEITLICHER VERLAUF DER WINDGESCHWINDIGKEIT, -RICHTUNG UND DER EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEIT FÜR DIE STURMFLUT ERA40_S2
33	5.4	BODENDRUCKFELD (ISOLINIEN) IN HPA SOWIE EFFEKTIVWINDFELD (FARBIG) IN M/S VOM 03.01.1976 06:00 UTC (HAUPTTERMIN VON STURMFLUT ERA40_S2) AUS ERA40 UND CCLM.
35	5.5	MAXIMALE EFFEKTIVWINDGESCHWINDIGKEIT ÜBER DER DEUTSCHEN BUCHT FÜR DIE 60 STÄRKSTEN EREIGNISSE. ECHAM5 (20C), CCLM (20C), CCLM MITTEL (20C), ECHAM5 (A1B), CCLM (A1B), CCLM MITTEL (A1B)

Seite

Tabelle

Tabellenverzeichnis

25	4.1	ANZAHL DER TRACKS IN DER GESAMTEN TRACKINGREGION, SOWIE MIT EINEM WINDFELD ÜBER DER NORDSEEREGION FÜR ERA40, ECHAM5 20C (1969-2000) UND A1B (2069-2100)
30	5.1	LISTE DER 30 STÄRKSTEN STURMFLUTEREIGNISSE GEMESSEN AM MAXIMALEN WINDSTAU AN DER STATION CUXHAVEN
35	5.2	AUFLISTUNG DER 60 STÄRKSTEN STURMEREIGNISSE (20C UND A1B) GEMESSEN AN DEM MAXIMALEN EFFEKTIVWIND ÜBER DER DEUTSCHEN BUCHT REGION

1 Einleitung

Im BMVBS-Forschungsvorhaben KLIWAS „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt“ und des darin enthaltenen Projektes „Parametrisierung Klimawandelszenarien Küste/See“ werden vom DWD (Seewetteramt Hamburg) und dem BSH die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Seeschifffahrt, Küsten und Häfen untersucht. Sturmfluten sind eine der bedeutendsten Naturgefahren für die norddeutsche Küstenregion und können große Personen- und Sachschäden in den betroffenen Regionen verursachen. Sie müssen deshalb bei der Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Deutschen Küsten in besonderem Maße berücksichtigt werden. Dazu wurden mit einem Kooperationsprojekt von KLIWAS mit dem Meteorologischen Institut der FU Berlin (Prof. Dr. U. Ulbrich, Dr. G.C. Leckebusch und D.J. Befort) Untersuchungen zur möglichen zukünftigen Änderung der Häufigkeit von Sturmfluten durchgeführt.

Für die Entstehung einer Sturmflut ist neben den meteorologischen Bedingungen (Sturmstärke und Windrichtung) auch die Koinzidenz mit der richtigen Tidephase von Bedeutung. Eine Sturmflut ist an der deutschen Nordseeküste definiert als ein Wasserstand von mehr als 1.5 Meter über dem mittleren Hochwasser (MHW), eine schwere Sturmflut mit einem Wasserstand von mehr als 2.5 Meter über MHW und eine sehr schwere bei einem Wasserstand von mehr als 3.5 Meter über MHW. Der Gesamtwasserstand setzt sich hierbei aus der astronomischen Tide, dem Windstau sowie externen Parametern, wie beispielsweise Fernwellen, zusammen. Üblicherweise wird der Windstauanteil aus der Differenz zwischen dem gemessenen Wasserstand und der astronomischen Tide berechnet. Fernwellen sind dementsprechend im Windstau implizit enthalten. Eine umfassende Darstellung der Charakteristiken von Sturmfluten findet man in [5].

Schwere Sturmfluten stehen typischerweise mit großskaligen Stürmen mit hohen Windgeschwindigkeiten und auflandigen Winden über der Deutschen Bucht im Zusammenhang, also bei hohem Windstau. Im Extremfall kann dabei der Windstau Werte von mehr als 4 Meter erreichen, wie im Fall des Adolph-Berpohl-Orkans am 23.02.1967. Jedoch werden nicht alle Sturmfluten durch Sturmgebiete verursacht, die sich räumlich über die ganze Nordsee erstrecken und die in der ganzen Deutschen Bucht Sturmfluten hervorrufen. So wurden zwischen 1964 und 2008 nur in 53 % aller Fälle an allen Pegeln der Deutschen Nordseeküste gleichzeitig Sturmfluten beobachtet [4].

Im Zeitraum 1948 bis 2008 wurden 166 von 347 Sturmfluten durch Tiefdruckgebiete erzeugt, die sich aus starken atmosphärischen Wellenstörungen über dem zentralen Nordatlantik entwickeln. Diese Tiefdruckgebiete vertiefen sich oft sehr schnell und

bestehen nur für den Zeitraum einer Tide. Ein Beispiel hierfür ist die Sturmflut vom 3./4. Januar 1976, die an fast jedem Pegel an der Deutschen Bucht zu den seit Beginn der Messungen höchsten Wasserständen führte. Zu Beginn des Projekts wurde befürchtet, dass solche Stürme in den Ergebnissen von Klimamodellen oder in Reanalysedaten nicht gefunden werden können, da die zeitliche und räumliche Auflösung der Daten zu grob ist. Dies ließ sich aber im Laufe des Projekts widerlegen

Auf Grund der Projektlaufzeit von einem Jahr wurden die Untersuchungen auf Sturmfluten in Cuxhaven beschränkt. Cuxhaven dient bei vielen Untersuchungen von Sturmfluten als Referenzort, da in Cuxhaven bei fast allen Windgeschwindigkeiten und -richtungen der Windstau als mittlerer Wert für die gesamte Deutsche Bucht betrachtet werden kann [10]. Des Weiteren liegt für Cuxhaven ein hundertjähriger Sturmflutkatalog vor, in dem Gesamttide, astronomische Tide sowie Windstau für alle Ereignisse im Zeitraum enthalten sind. Der Wert des mittleren Hochwassers für den Bezugszeitraum 2000 bis 2005 liegt für Cuxhaven bei 6,54 Meter und das mittlere Niedrigwasser bei 3,59 Meter, dementsprechend liegt der mittlere Tidenhub bei 2,95 Meter [1].

Es stellt sich in Zusammenhang mit den durch den Klimawandel möglichen Änderungen die Frage, ob und in wieweit diese mit einer Veränderung des Sturmflutpotentials an der deutschen Nordseeküste verbunden sein könnten. Für die Beantwortung dieser Frage wird im Projekt zunächst der Zusammenhang von Sturmereignissen mit Sturmfluten für die Vergangenheit statistisch quantifiziert. Anhand von drei für ein Klimaszenario (A1B) durchgeführten Simulationen werden dann relevante Sturmereignisse identifiziert, um darüber die Veränderung des Sturmflutrisikos abzuschätzen.

1.1 Projektstruktur

Die Arbeiten in diesem Projekt können in fünf Teile aufgliedert werden. In einem ersten Schritt wurde die robuste Beziehung zwischen dem Windstau an der Station Cuxhaven und der Windrichtung bzw. -geschwindigkeit hinsichtlich der Winddaten der örtlich und zeitlich zuzuordnenden ERA-40 Termine bzw. Gitterpunkte untersucht. Hierbei wurden Ansätze früherer Arbeiten (z.B. Bestimmung Effektivwind Cuxhaven, [10]) auf die dem Projekt zur Verfügung stehende Datensätze angewendet. Dieser Arbeitsschritt ist essentiell, da weder in Reanalysedaten noch in Klimamodell-daten Angaben über den Windstau enthalten sind.

In einem zweiten Schritt wurden potentiell sturmflutträchtige Situationen im ERA-40 Reanalysedatensatz identifiziert. Hierfür wurde ein an der Freien Universität Berlin entwickelter Trackingalgorithmus verwendet um großskalige Windfelder zu identifizieren. Bei der Abschätzung des Sturmflutrisikos anhand von Windstau ist nämlich zu berücksichtigen, dass schwere Sturmfluten typischerweise im Zusammenhang mit großskaligen Stürmen stehen, also hohe Windgeschwindigkeiten über der Deutschen Bucht und dementsprechend hohen Windstauwerten nicht als einziges Indiz ausrei-

chen. Hier muss also auch eine Zuordnung zu ausgedehnten Starkwindfeldern gegeben sein. Anhand des Sturmflutatlases der Station Cuxhaven konnte somit die Methodik validiert werden.

In einem dritten Schritt wurde die Methodik auf ECHAM5 Klimamodelldaten angewendet. Hierbei wurden für das rezente Klima die drei Realisierungen der 20C Modellsimulationen und für das zukünftige Klima die drei Realisierungen des SRES A1B Szenarios verwendet. Aufgrund der kurzen Projektlaufzeit von einem Jahr wurde die Untersuchung auf die Zeiträume 1969 bis 2000 (20C) und 2069 bis 2100 (A1B) beschränkt. Der Vergleich der Anzahl identifizierter sturmflutrelevanter Ereignisse in 20C und A1B ermöglicht eine erste grobe Abschätzung, ob es durch die anthropogene Klimaänderung zu einer Änderung des Risikos für Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste kommt. Da die Wetterentwicklung im Modell keine Vorhersage der realen Wetterabfolge ist, werden nur die mit dem Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen verbundenen längerfristigen (klimatische) Entwicklungen in ihrer statistischen Gesamtheit abgebildet. Die Frage nach der Phase der astronomischen Tide macht in diesem Zusammenhang keinen Sinn: Ein hoher Windstauwert, der sich aus der Modellsimulation ergibt, kann prinzipiell mit jeder möglichen Phase der astronomischen Tide verbunden sein. Hier stellt sich daher die Frage, ob sich die extremen Windstauwerte unter steigenden Treibhausgaskonzentrationen ändern und sich somit ein verändertes Sturmflutrisiko ergibt.

Der letzte Teil des Projekts beschäftigt sich mit der Simulation einzelner Sturmereignisse mit dem Regionalmodell COSMO-CLM in einer horizontalen Auflösung von ca. 18km.

Zunächst wurden hierbei die stärksten dreißig realen Sturmflutereignisse (gemessen an ihrem maximalen Windstau) nachsimuliert. Der Vergleich der modellierten Windgeschwindigkeiten mit den Beobachtungen an der Station Scharhörn ermöglicht eine Validation der Modellergebnisse.

Weiterhin wurden die 60 stärksten Ereignisse in den ECHAM5 Klimamodellsimulationen nachsimuliert. Hierbei wurde jedes Ereignis insgesamt fünf Mal simuliert, wobei sich die einzelnen Simulationen durch geringe Abweichungen der geographischen Lage der Modellregion unterscheiden.

Diese Simulationen dienen dabei nicht zur Abschätzung der Veränderung des Sturmflutrisikos an der deutschen Nordseeküste, sondern können von den Projektpartnern des BSH als Antrieb für Wasserstandsmodelle verwendet werden.

2 Daten und Modelle

2.1 Sturmflutenatlas der Station Cuxhaven

Dem Projekt stand der Sturmflutatlant der Station Cuxhaven zur Verfügung ([6]). Dieser enthält für den Zeitraum von 1901 bis 2008 insgesamt 167 Sturmfluten. Alle aufgelisteten Sturmfluten sind durch ein minimales Wasserstandsmaximum von 1.5 Meter über mittlerem Hochwasser (MHW) gekennzeichnet. Der Sturmflutatlant enthält drei Datensätze, nämlich für den Gesamtwasserstand, die astronomische Tide und den Windstau. Während der Gesamtwasserstand an der Station Cuxhaven gemessen wurde, basiert die benutzte astronomische Tide auf Berechnungen mit einem Gezeitenmodell. Der Windstau entspricht der Differenz aus Gesamtwasserstand und astronomischer Tide. Die im Katalog angegebene Größe wird also nicht allein vom Wind beeinflusst, sondern auch von anderen Faktoren wie Luftdruck, Temperatur und Fernwellen. Die zeitliche Auflösung der Angaben beträgt 5 Minuten, wobei nur die Werte für die direkten Sturmflutereignisse enthalten sind, d.h. es sind keine kontinuierlichen, lückenlosen Zeitreihen von Wasserstandshöhen, astronomischer Tide oder Windstaukurven verfügbar.

2.2 Windmessungen an der Station Scharhörn

Zur Validierung der im Projekt durchgeführten Simulationen historischer Sturmflutereignisse wurden Windmessungen an der Station Scharhörn der Hamburg Port Authority verwendet. Dieser Datensatz beinhaltet für den Zeitraum vom 01.01.1976 bis 31.12.1990 sowie vom 01.11.1992 bis 06.05.2009 stündliche Werte für Windgeschwindigkeit und -richtung. Die stündlichen Werte wurden hierbei seit 1998 laut Auskunft von Frau Ganske aus 10 minütlichen Mittelwerten berechnet.

2.3 Reanalyse-Daten

Für die Identifikation von historischen Sturmereignissen und für die Betrachtung der meteorologischen Situation bei Sturmfluten wurde der Reanalyse Datensatz ERA-40 ([12]) verwendet. Dieser Datensatz umfasst den Zeitraum 1957 bis 2002 und liegt in einer horizontalen Auflösung von 1.125° (ca. 125 km) vor. Für die Auswertungen wurden die Variablen Zonalwind und Meridionalwind in 10 Meter Höhe verwendet, die in einer zeitlichen Auflösung von 6 Stunden archiviert sind. Dabei ist einzuschränken, dass die im Datensatz vorhandenen Gitterpunkts-Werte jeweils räumlich ausgedehnte Gitterzellen repräsentieren, und nicht identisch zu denen der Stationsmessungen in der Region sein müssen. Bei der Windgeschwindigkeit in 10 Meter Höhe ist zudem festzuhalten, dass diese über das im Reanalyse-Modell implementier-

te Grenzschichtschema aus den (auf Modellflächen berechneten) analysierten Werten bestimmt wird.

2.4 ECHAM5/MPI-OM

Im Projekt werden für die Abschätzung des zukünftigen Sturmflutpotentials die für die Klimaforschung in Deutschland bereitgestellten SRES Szenarienläufe des globalen gekoppelten (Atmosphäre-Ozean) Modells ECHAM5/MPI-OM in einer horizontalen Auflösung von 1.875° (ca. 210 km) verwendet. Für das rezente Klima liegen die drei Realisierungen der 20C Simulationen vor, wobei in der hier beschriebenen Arbeit der Zeitraum 1969 bis 2000 als repräsentativ für das heutige Klima angesehen wird. Als Szenario für ein zukünftiges Klima werden die drei Realisierungen des A1B Treibhausgasantriebs verwendet, der etwa einem „business as usual“ entspricht, also von einem geringen Erfolg der Klimaschutzbemühungen ausgeht. Hier wurden die Daten der Periode 2069 bis 2100 verwendet.

2.5 COSMO-CLM

Um auch die kleinräumige Struktur und zeitliche Entwicklung von den in den ECHAM5-Daten identifizierten Sturmereignissen einschätzen zu können, wurden die 60 stärksten potentiell sturmflutrelevanten Ereignisse aus den ECHAM5 Simulationen mit dem regionalen Klimamodell COSMO-CLM hochaufgelöst nachsimuliert. COSMO-CLM (CCLM) [15] ist eine Weiterentwicklung des Lokalmodells (LM) des Deutschen Wetterdienstes. Eine der wichtigsten Änderungen ist hierbei, dass das CCLM, anders als das LM, ein nichthydrostatisches Modell ist. Hochaufgelöste Simulationen, bei denen nicht-hydrostatische Effekte einen größeren Einfluss haben, sind dadurch möglich. Allerdings ist die Rolle der nicht-hydrostatischen Einflüsse bei der hier verwendeten horizontalen Auflösung von 18 km als eher gering einzuschätzen ([11]; [13]).

Die in diesem Projekt verwendete Modellregion ist in Abbildung 2.1 graphisch dargestellt. Diese erstreckt sich von ca. 10° West bis 40° Ost sowie 30° Nord bis 65° Nord und umfasst somit ganz Europa sowie Teile Westrusslands und Nordafrikas. Die horizontale Ausdehnung beträgt 257 Gitterboxen in x-Richtung und 271 Gitterboxen in y-Richtung bei einer horizontalen Auflösung von $0.165^\circ \times 0.165^\circ$ (ca. 18 km). Das Regionalmodell wird an den Rändern des Rechengebiets mit Daten aus globalen Datensätzen angetrieben. Mit dem Modell wurden zunächst historische Sturmfluten als Simulationen über eine Dauer von jeweils 7-9 Tagen nachgerechnet, wobei die ERA-40 Reanalysen als Antrieb verwendet wurden. Weiterhin wurden 60 potentielle Sturmflutereignisse aus den ECHAM5-Simulationen in entsprechender Weise regionalisiert. Die Sensitivität der dabei betrachteten Ereignisse gegenüber kleinen Änderungen der Randbedingungen wurde getestet, indem jedes Sturmereignis insgesamt 5 Mal mit dem Regionalmodell simuliert wurde. Dazu wurde die Modelldomain jeweils um 8 Gitterpunkte in jede der vier Himmelsrichtungen verschoben.

Potentielle
Auswirkungen des
anthropogenen
Klimawandels
auf das Sturmflut-
risiko an der
deutschen Nord-
seeküste

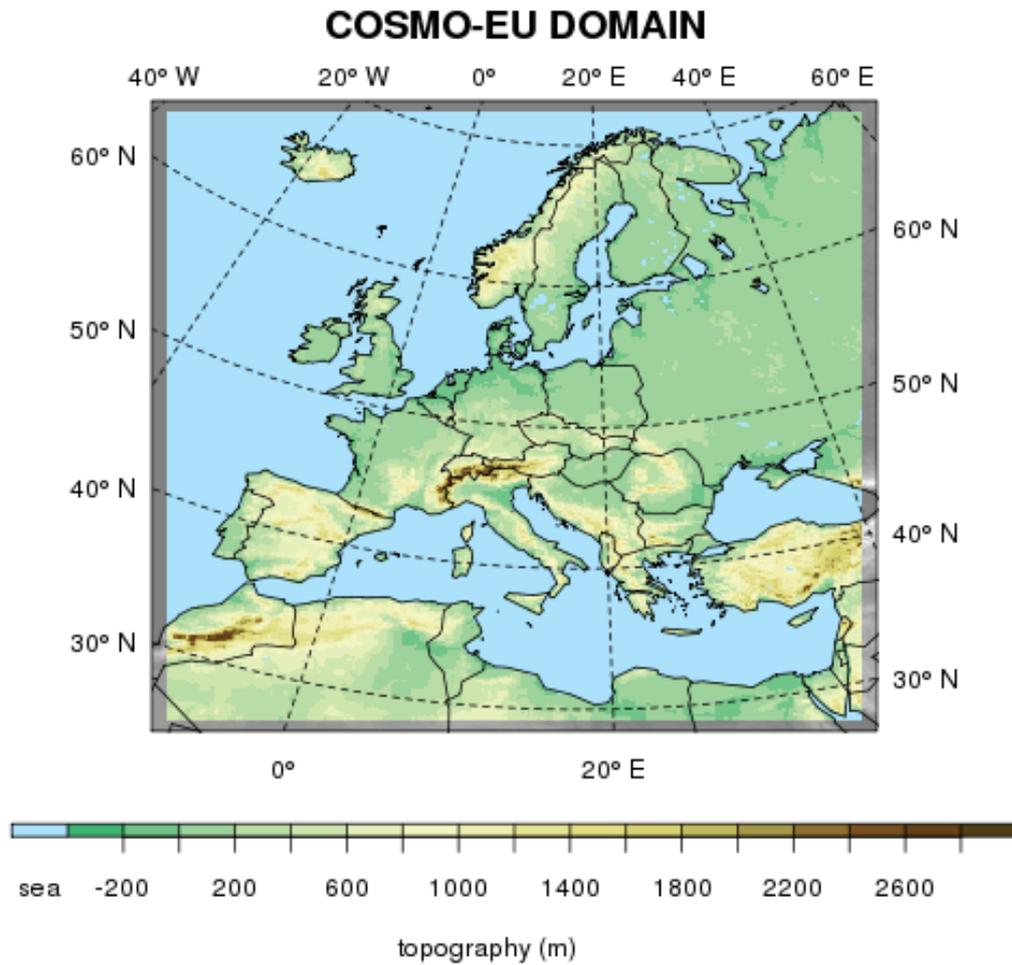


Abbildung 2.1: Modellregion für die COSMO-CLM Regionalmodellsimulationen

3 Methodik

3.1 Region Nordsee und Region Deutsche Bucht

3.1.1 Region Deutsche Bucht

Die in den nachfolgenden Auswertungen betrachtete Region „Deutsche Bucht“ wurde in Anlehnung an die Vorhersagegebietes des Seewetterberichts des DWD definiert ([14]). Sie ist in Abbildung 3.1 a-c für die unterschiedlichen Modelldaten-Gitter dargestellt. Der Landanteil der jeweiligen Gitterboxen wird in den Abbildungen über die jeweilige Farbgebung angezeigt. Für das ERA-40 Gitter (111 km, zugehörig zur spektralen Auflösung T159) werden 7 Gitterboxen als Region Nordsee definiert (Abb. 3.1a, entsprechend Ganske, 2011 [3]). Das Gebiet erstreckt sich von 4° bis 9° Ost und 53.5° bis 56° Nord und umfasst nur Gitterboxen mit einem Landanteil von weniger als 20%. Im Falle von ECHAM5 umfasst die Region nur zwei Gitterboxen (Abbildung 3.1b). In den CCLM Simulationen werden insgesamt 231 Gitterboxen verwendet (Abbildung 3.1c).

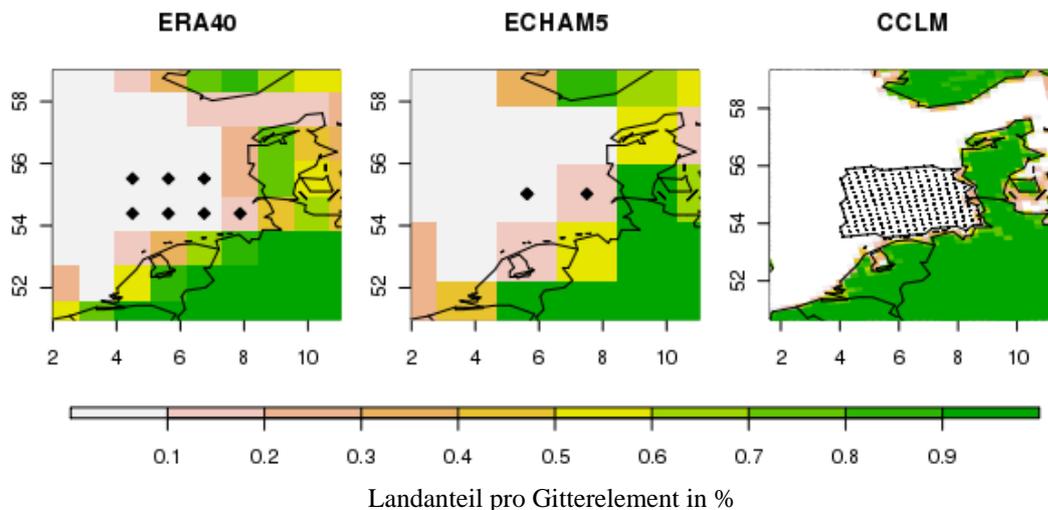


Abbildung 3.1 Verwendete Gitterpunkte (schwarze Rauten) für die Deutsche Bucht in den drei verwendeten Modelldatensätzen , a) ERA40 (T159), b) ECHAM5 (T63), c) CCLM (0.165°x0.165°)

3.1.2 Region Nordsee

Die Region Nordsee wird für die Bestimmung potentiell sturmflutrelevanter Ereignisse betrachtet, die über den Algorithmus zur Identifikation von Sturmfeldern (siehe Abschnitt 3.3) identifiziert wurden. Abbildung 3.2 zeigt die Gitterpunkte, die die Region in ERA-40 und ECHAM5 definieren. Das Gebiet umfasst alle Gitterboxen zwischen 3° West und 10° Ost sowie 50° Nord und 60° Nord. Für ERA-40 sind das insgesamt 99, für ECHAM5 35 Gitterboxen. Es ist anzumerken, dass aufgrund der Lage

der Gitterpunkte und der von ihnen repräsentierten Gebiete die Nordseeregion im ERA40 Datensatz gegenüber dem ECHAM5-Datensatz eine nach Norden und Westen etwas erweiterte Ausdehnung aufweist. Da die Betrachtung der Nordseeregion nur für die Identifikation von Sturmfeldern in den gröber aufgelösten Datensätzen aus ERA40 und ECHAM verwendet wird, erfolgt keine Definition für das Modell CCLM.

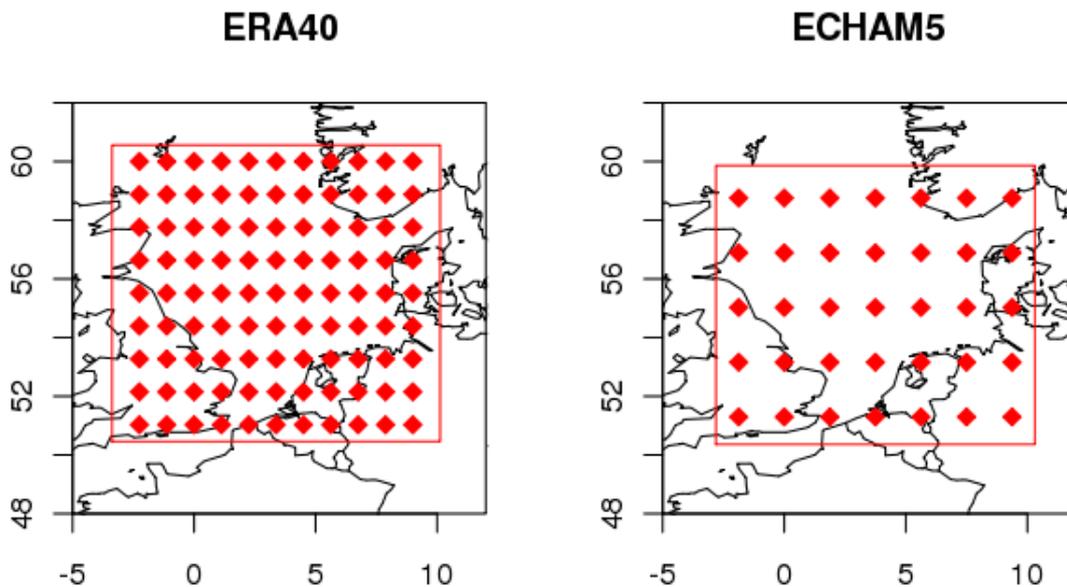


Abbildung 3.2: Nordsee-Region in den zwei verwendeten Modelldaten, a) ERA40 (T159), b) ECHAM5 (T63)

3.2 Effektivwind

In Anlehnung an das KFKI Projekt MUSE ([7]) wurde auch in diesem Projekt der Effektivwind verwendet. Der Effektivwind ist hierbei definiert als die auf 295° (WNW) projizierte Windgeschwindigkeit in 10-Meter Höhe. Um lokale Windgeschwindigkeitsmaxima nicht über zu bewerten, wurde der Effektivwind auf Grundlage des Windmittels über alle Gitterboxen der Deutschen Bucht bestimmt. Abbildung 3.3 zeigt schematisch die Berechnung des Effektivwindes für einen beliebigen Windvektor.

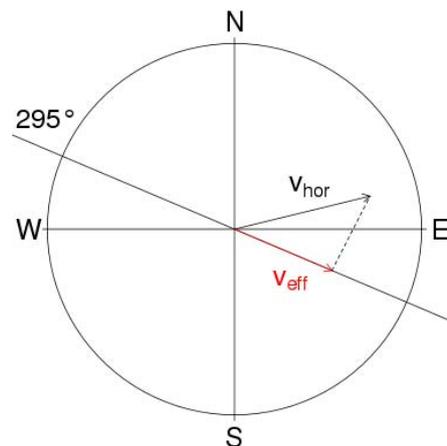


Abbildung 3.3 Schematische Darstellung zur Berechnung des Effektivwinds v_{eff} durch Projektion des im Datensatz vorhandenen horizontalen Windvektors v_{hor} auf die Richtung 295°. Positive Werte von v_{eff} bedeuten, dass der horizontale Wind eine Komponente aus WNW hat.

3.3 Algorithmus zur Identifikation von Sturmereignissen

Die Identifikation von Sturmereignissen in Modell- und Reanalysedaten wird unter Verwendung eines objektiven Algorithmus durchgeführt ([8], [9]), in dem solche Sturmfelder identifiziert werden, die eine minimale Windgeschwindigkeit, Mindestgröße und Mindestandauer überschreiten.

Dabei werden in einem ersten Schritt zu jedem Zeitschritt diejenigen Gitterboxen identifiziert an denen die Windgeschwindigkeit in 10 Meter Höhe eine gewählte Perzentilschwelle überschreitet. Für die Arbeiten in diesem Projekt wurde in Anlehnung an frühere Arbeiten das lokale 98. Perzentil verwendet ([8],[9]).

In einem zweiten Schritt werden zusammenhängende Gebiete, d.h. benachbarte Gitterboxen, die eine Überschreitung des Perzentils aufweisen, zu einem Sturmfeld zusammengefasst.

Diese so identifizierten Sturmfelder müssen eine Mindestgröße überschreiten, die im Fall von ERA-40 auf 20, im Fall von ECHAM5 auf 8 Gitterboxen festgelegt wurde. Die Festlegung erfolgte aufgrund einer ersten Sichtung von Sturmfeldern zu historischen Sturmflutereignissen, wobei die unterschiedliche Anzahl der Gitterboxen durch die gröbere Auflösung der ECHAM5 (1.875°) gegenüber den ERA-40 Reanalysedaten (1.125°) begründet ist. In beiden Datensätzen entspricht das einer minimalen Fläche von ca. 156000 km² (in 60° nördlicher Breite). Diese Identifikation von Sturmfelder wird für jeden Zeitschritt des jeweiligen Datensatzes durchgeführt.

In einem letzten Schritt werden die so identifizierten Sturmfelder zeitlich miteinander verbunden. Dies wird durch ein einfaches Nearest-Neighbour-Verfahren realisiert, d.h. ein Sturmfeld wird mit dem nächstliegenden Sturmfeld im darauffolgenden Zeit-

schritt verbunden. Dabei darf eine maximale Zugdistanz des Sturmfeldes, welches sich aus einem festen Anteil von 600 Kilometern und einem dynamisch bestimmten Anteil (der Hälfte der Sturmfeldausdehnung) berechnet, nicht überschritten werden.

Die so identifizierten Sturmereignisse müssen des Weiteren eine Mindestandauer besitzen, welche auf 4 Zeitschritte, d.h. 18 Stunden, festgelegt wurde. Kürzere Sturmereignisse werden nicht weiter berücksichtigt.

Es stellte sich heraus, dass es bei räumlich relativ hoch aufgelösten Daten zu einem „Zerfallen“ der Sturmgebiete in kleineren Teilbereichen kommen kann, die formal nicht das Kriterium eines ausgedehnten Sturmereignisses erfüllen. Um dies zu verhindern wird zusätzlich zum 98. Perzentils eine weitere Perzentilschwelle (in diesem Fall das 95. Perzentil) festgelegt, auf deren Basis eine Umhüllende des tatsächlichen Sturmfeldes bestimmt wird, innerhalb derer alle relevanten Teilregionen enthalten sind. Bei dieser Wahl der Perzentilschwelle kommt es nach Tests mit ausgewählten Ereignissen noch nicht zu einer Kombination von Windfeldern, die weit voneinander entfernt oder offensichtlich zu unterschiedlichen Tiefdrucksystemen gehören, und somit getrennt zu betrachten wären. Die Charakteristika eines Sturmereignisses werden aber nicht anhand des gesamten vom 95. Perzentil eingeschlossenen Bereichs, sondern nur über die Gitterboxen bestimmt, an denen das lokale 98. Perzentil überschritten ist.

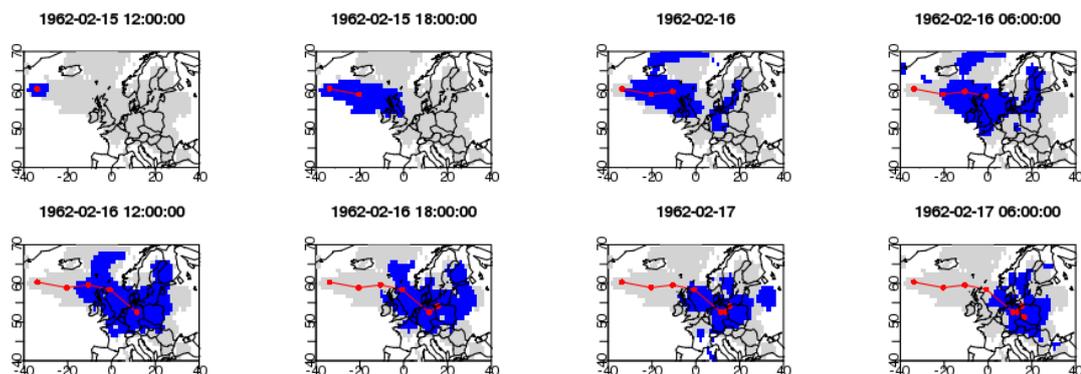


Abbildung 3.4: Sturm Vincinette, 15.2.bis 17.02 1962, identifiziert durch den Trackingalgorithmus (roter Punkt: Sturmfeldschwerpunkt, blau: Gitterboxen mit Windgeschwindigkeit über dem 98. Perzentil (dieser Zeitschritt), grau: Gitterboxen mit Windgeschwindigkeit über dem 95. Perzentil (während des gesamten Tracks))

Für die Identifikation von Sturmereignissen wurde eine Region betrachtet, die Europa sowie den Nordwestatlantik beinhaltet und sich geographisch von -40° Ost bis 40° West und 25° Nord bis 80° Nord erstreckt. Sie ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

Potentielle
Auswirkungen des
anthropogenen
Klimawandels
auf das Sturmflut-
risiko an der
deutschen
Nordseeküste

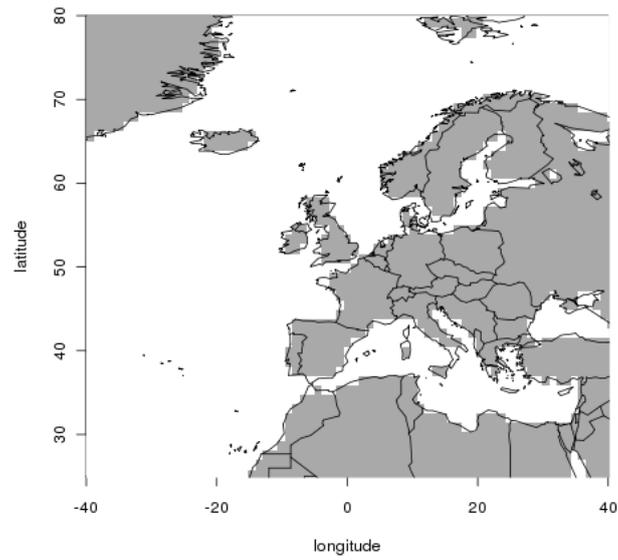


Abbildung 3.5: Verwendete Region für das Sturm-Identifikationsverfahren

4 Ergebnisse aus ERA-40 Reanalysedaten und ECHAM5 Globalmodellsimulationen

Für die Untersuchung der Änderung des Sturmflutpotentials an der Deutschen Nordseeküste aufgrund von anthropogenen Klimaänderungen wurden drei Szenarienläufe mit dem Modell ECHAM5 verwendet, denen ein anwachsender Treibhausgasantrieb nach dem SRES-Szenario A1B zugrunde liegt. Die Simulationen liefern Windgeschwindigkeiten, auf deren Basis das Sturmflutrisiko abgeschätzt werden kann. Dabei werden astronomische Tiden nicht berücksichtigt, deren Koinzidenz mit hohen Windstauwerten als zufällig angenommen wird. Der Zusammenhang zwischen Windstau an der Station Cuxhaven und der Windgeschwindigkeit bzw. -richtung wurde daher als erster Schritt in Anlehnung an die Arbeiten von Müller-Navarra et al. [10] sowie aus dem KFKI Projekt MUSE, quantifiziert.

Als Grundlage des Konzepts der Identifikation sturmflutrelevanter Situationen im Klimamodell wurden in einem zweiten Schritt beobachtete Sturmflutereignisse zwischen 1957 und 2002 großskaligen Sturmfeldern im Bereich der Nordsee zugeordnet. Anhand der ERA-40-Reanalysen wurden Schwellwerte der betrachteten meteorologischen Parameter und somit Charakteristika solcher Situationen bestimmt.

Anschließend wurden die erarbeiteten Ansätze auf die ECHAM5 Simulationen für die Perioden mit heutigem (20C) und A1B-Treibhausgasantrieb angewandt, um die Änderung des Sturmflutpotentials an der Deutschen Nordseeküste abzuschätzen.

4.1 Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit bzw. -richtung und Windstau an der Station Cuxhaven

Die Beziehung zwischen Windgeschwindigkeit bzw. -richtung und Windstau wurde anhand der im ERA40-Datensatz archivierten Angaben zur Windgeschwindigkeit und den Windstauwerten für 83 Sturmflutereignisse des Zeitraums 1957 bis 2002 an der Station Cuxhaven untersucht, um auf dem Zusammenhang aufbauend eine Mindestwindgeschwindigkeit zu ermitteln, von der aus dann statistisch auf das Auftreten von Sturmfluten geschlossen werden kann. Ein Sturmflutkatalog, der den Windstau als den um die astronomische Tide bereinigten Wasserstand enthält, war nur für diese Station verfügbar. In Anlehnung an das KFKI Projekt MUSE („Modellunterstützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit“) wurde dazu der Effektivwind als die Projektion des Windvektors auf eine Richtung von 295° gemittelt über die Deutsche Bucht berechnet. Der Zusammenhang zwischen Windstau und Effektivwind wurde im Projekt auch weitergehend betrachtet, um das Potential für Verbesserungen der Zuordnung zu erkunden. So wird weiter unten auch eine Untersuchung daraufhin dargestellt, ob es Zeitverschiebungen zwischen dem Auftreten

von Effektivwind an verschiedenen Orten (aus Reanalysen) und Windstau in Cuxhaven gibt.

Da für die Frage der Schäden nur die höchsten Wasserstände und damit die höchsten Windstauwerte wichtig sind, wurde in einem ersten Schritt zu jedem historischen Sturmflutereignis zunächst nur der maximale Windstauwert identifiziert. Dieses Maximum auf Basis 5-minütig aufgelöster Daten kann nicht ohne weiteres den aus ERA-40 berechneten Effektivwind-Werten in 6-stündiger Auflösung zugeordnet werden. Daher wurde zunächst jedem Windstaumaximum die Effektivwindgeschwindigkeit zum ERA-40 Termin vor dem beobachteten Maximum zugeordnet. Abbildung 4.1 zeigt den Scatterplot beider Größen. Es zeigt sich ein nur mäßig enger statistischer Zusammenhang zwischen den beiden Größen, wobei deutliche Ausreißer erkennbar sind. Dies kann mehrere Gründe haben: zum einen können im Extremfall bis zu 5 Stunden und 55 Minuten zwischen dem gemessenen Windstauwert und dem Effektivwind aus ERA-40 liegen (z.B. Windstaumaximum 05:55 Uhr und Effektivwind um 00:00 Uhr). Tatsächlich könnte in manchen Fällen der Effektivwind nach dem Ereignis ebenso relevant für einen solchen Vergleich sein. Aus diesem Grund wurde als zweite Möglichkeit die höhere der Effektivwindgeschwindigkeiten vor und nach dem Windstaumaximum berücksichtigt (Abbildung 4.2). Der Korrelationskoeffizient nach Spearman ist mit 0.63 höher als bei alleiniger Verwendung des Termins vor dem Windstaumaximum (Korrelationskoeffizient nach Spearman von 0.57).

Durch die Verwendung aller ERA-40 Termine (d.h. Effektivwinde während des Sturmflutverlaufs gemäß Sturmflutatlant) und der gleichzeitigen Werte des Windstaus, wird nicht mehr nur die maximale Sturmfluthöhe als Zielgröße betrachtet. Vielmehr ist hierbei der (physikalisch als realistisch anzusehende) Vermutung zugrunde gelegt, dass der Effektivwind zu jedem Zeitpunkt über den Verlauf des Ereignisses mit der Windstauhöhe zusammenhängt. Abbildung 4.3 stellt diesen Zusammenhang dar, der sich mit einem Korrelationskoeffizient von 0.72 als noch klarer ergibt als der in Abb. 4.2 dargestellte. Es wird aber deutlich, dass die höchsten Werte des Effektivwindes und somit des (in erster Näherung) höchsten Windstaus bei sechs-stündlichen Daten nicht typischerweise getroffen werden.

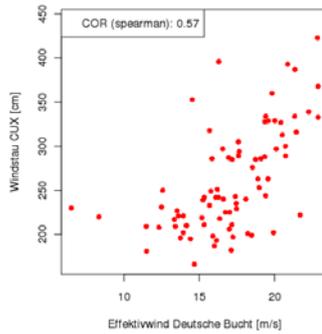


Abbildung 4.1: Scatterplot Windstaumaximum an der Station Cuxhaven und Effektivwind zum ERA-40 Termin vor dem Windstaumaximum

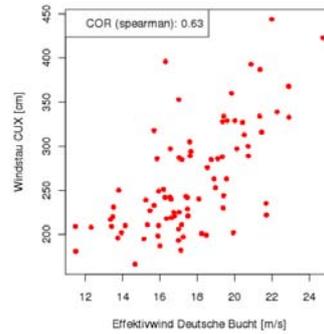


Abbildung 4.2: Scatterplot Windstaumaximum an der Station Cuxhaven und maximaler Effektivwind zum ERA-40 Termin vor bzw. nach dem Windstaumaximum

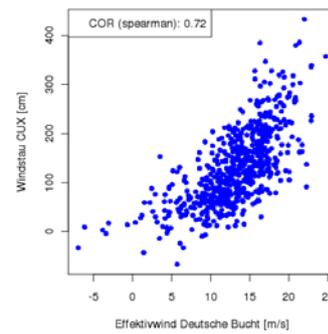


Abbildung 4.3: Scatterplot Effektivwind zu den Zeitpunkten von ERA-40 während der Sturmflutverläufe und gleichzeitiger Windstau an der Station Cuxhaven

Als Exkurs zur Identifikation möglicher Verbesserungen der Methodik wurde untersucht, welcher zeitliche Versatz zwischen den Werten der Zeitreihen des Windstaus (5-minütig) und des Effektivwinds zur optimalen Korrelation führt. Betrachtet man zunächst jede individuelle Gitterbox und den dortigen Effektivwind, so erhält man die maximalen Korrelationswerte und den zugehörigen Zeitversatz. In Abbildung 4.4 ist ein klarer Nordost-Südwest Gradient der Korrelationswerte deutlich zu erkennen, wobei die höchsten Werte an der Westgrenze der Region erreicht werden. Wie zu erwarten sind die Korrelationswerte im Nordosten deutlich geringer, was auf einen schwächeren Zusammenhang zwischen dem dortigen Effektivwind und dem Windstau an der Station Cuxhaven hinweist.

Abbildung 4.5 zeigt den optimalen Zeitversatz an jeder Gitterbox. Auch hier ergibt sich ein deutlicher Unterschied zwischen dem Nordosten und dem Südwesten der betrachteten Region, wobei die Zeitdifferenz von Südwesten (maximale Korrelation bei Zuordnung von Effektivwind ca. 3-4 Stunden vor den Windstau in Cuxhaven) nach Nordosten hin (optimale Korrelation bei Lag 0) abnimmt. An der zur Station Cuxhaven nächsten Gitterbox, mit einem Landanteil von weniger als 50%, ist ein Lag von ca. 1.5 Stunden optimal. Gemittelt über das Gebiet der Deutschen Bucht (schwarz umrandet in Abbildung 4.5) ergibt sich demnach eine maximale Korrelation bei einem Zeitversatz von ca. 2-3 Stunden mit maximalen Korrelationswerten von bis zu 0.8 (Abbildung 4.6). Eine weitere Verbesserung der Einschätzung von Windstauhöhen wäre unter Umständen möglich, wenn je nach Ort andere effektive Windrichtungen gewählt worden wären. Eine weitergehende Untersuchung dieser Zusammenhänge konnte aufgrund der engen Zeitvorgaben des Projekts sowie der Datenlage nicht durchgeführt werden.

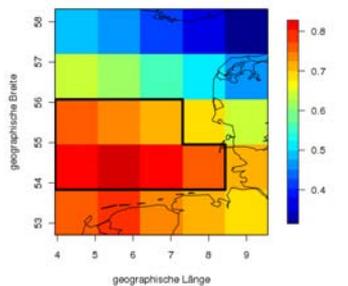


Abbildung 4.4: Maximaler Korrelationskoeffizient für jede Gitterbox zwischen Effektivwindgeschwindigkeit und Windstau an der Station Cuxhaven

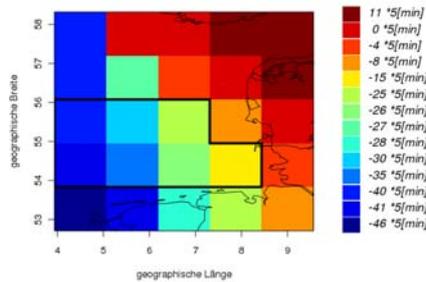


Abbildung 4.5: Zeitdifferenz zwischen der zeitgleichen Betrachtung und dem Zeitpunkt maximaler Korrelation des Effektivwinds und des Windstaus

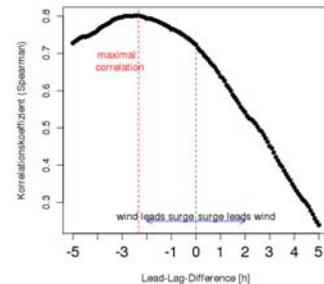


Abbildung 4.6: Lead-Lag Korrelation zwischen Effektivwind (gemittelt über Deutsche Bucht Region) und Windstau in Cuxhaven

Ein weiteres Problem der hier verwendeten direkten Zuordnung von Effektivwind und Windstau ist, dass nicht anzunehmen ist, dass der im Sturmflutkataleg angegebene Windstau allein vom momentanen Wind verursacht wird. Auch andere hydrologische Faktoren, wie z.B. Fernwellen sind im Windstau implizit enthalten. Außerdem haben auch andere Größen wie atmosphärische Schichtung oder Wasserstand einen Einfluss. Die genannten Verbesserungsmöglichkeiten können in der vorliegenden Untersuchung nicht weiter verwendet werden, unter anderem da die auszuwertenden Reanalyse- und Globalmodelldaten nur in 6-stündiger Auflösung vorliegen.

4.2 Identifikation von Sturmereignissen im ERA40 Zeitraum (1957–2002)

Für die Identifikation von Sturmereignissen wird der in Abschnitt 3.3 beschriebene Identifikationsalgorithmus, basierend auf dem Betrag der Windgeschwindigkeit in 10 Metern, verwendet. In Anbetracht der Tatsache, dass nur eins der 83 historisch beobachteten Ereignisse des Sturmflutatlases im Sommerhalbjahr stattgefunden hat, wurden Sturmereignisse nur für die Monate September bis einschließlich Mai identifiziert. Allerdings liegt der Berechnung des 98. bzw. 95. Perzentsils der gesamte Zeitraum zwischen 1957 bis 2002 (also einschließlich Sommer) zu Grunde. Insgesamt werden durch den Algorithmus 3447 Sturmereignisse in der gesamten Sturmidentifikationsregion (siehe Abschnitt 3.3) identifiziert.

4.2.1 Zuordnung von Sturmereignissen zu historischen Sturmfluten

Erwartungsgemäß stehen nicht alle identifizierten Sturmereignisse im Zusammenhang mit Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste. Viele der im nordatlantischen

Bereich identifizierten Sturmfelder betreffen nämlich nicht die Nordseeregion. Um Stürme auszuschließen, die zu weit entfernt von der deutschen Küste auftreten, wurde ein Ortskriterium verwendet. Nur solche Stürme wurden berücksichtigt, deren Windfeld (d.h. eine Überschreitung des lokalen 98. Perzentils) mindestens eine Gitterbox der Nordseeregion (s. Abschnitt 3.1.2) betrifft. Von den insgesamt 3447 identifizierten Stürmen erfüllen 1340 dieses Kriterium, und kommen somit als mögliche Verursacher einer Sturmflut in Frage.

Für die Zuordnung historischer Sturmfluten zu diesen Sturmereignissen wurde zusätzlich ein zeitliches Kriterium verwendet, dass nämlich der Sturm zum Zeitpunkt vor dem Windstaumaximum existierte. Die Kombination beider Kriterien bewirkt, dass 77 der insgesamt 82 historischen Sturmfluten jeweils in ERA-40 identifizierten Sturmereignissen zugeordnet werden können. Alle anderen Sturmereignisse haben nicht zu einer Sturmflut im Katalog geführt. Dies kann beispielsweise daran liegen, dass das Ortskriterium keine sehr enge Verbindung zur deutschen Bucht impliziert, dass keine Berücksichtigung der Effektivwindgeschwindigkeit erfolgt, und schließlich die zeitliche Koinzidenz mit der astronomischen Flut fehlen kann, wodurch auch Ereignisse mit hohen Windstauwerten nicht im Katalog aufgenommen sind.

4.2.2 Charakteristika der Sturmereignisse, die historischen Sturmfluten zugeordnet werden konnten

Jedem identifizierten Sturmflutereignis kann ein Effektivwind im Bereich der Deutschen Bucht zugeordnet werden. Auf Basis der zeitlichen Auflösung der ERA-40 Reanalysedaten wurde hier jetzt jedem Sturmereignis der höhere Wert aus den Effektivwindgeschwindigkeiten zum Zeitpunkt vor bzw. nach dem Windstaumaximum in Cuxhaven zugeordnet. Wie bereits in Abschnitt 4.1 gezeigt, führt dieses Verfahren nicht zu einer optimalen Zuordnung zwischen Effektivwindgeschwindigkeit und Windstaumaximum. Der höchste statistische Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen besteht bei einem Zeitversatz von ca. 2-3 Stunden. Diese Tatsache kann wegen der 6-stündigen Auflösung der ERA-40 Reanalyse-Daten nicht berücksichtigt werden.

Abbildung 4.7 zeigt als Häufigkeitsverteilung für die identifizierten großskaligen Sturmereignisse (vgl. 3.3), deren Sturmfeld (Überschreitung des 98. Perzentils) die Nordsee betrifft, wobei die einzelnen Säulen die jeweils aus ERA-40 Daten abgeschätzte maximale Effektivwindgeschwindigkeit (grau) zeigen. Dazu wurde über die Dauer der Sturmereignisse der Mittelwert über der Deutschen Bucht betrachtet. Die entsprechenden Häufigkeiten für die Sturmereignisse, die einer Sturmflut zugeordnet werden konnten (rot), weichen deutlich von der Gesamtverteilung ab. Es bestätigt sich die Erwartung, dass Ereignisse mit höherem Effektivwind im Bereich der Deutschen Bucht mit einer höheren Wahrscheinlichkeit zu einer Sturmflut führen. Während für die Abbildung 4.7 den beobachteten Sturmflutereignissen der maximale Effektivwind vor bzw. nach dem Windstaumaximum (aus Sturmflutatlant Cuxhaven) zugeordnet wurde, ist in Abbildung 4.8 der maximale Effektivwind gemittelt über die

Deutsche Bucht im gesamten zeitlichen Verlauf des Sturms zugeordnet worden. Auch hier werden nur die Zeitpunkte betrachtet, an denen das 98. Perzentil über der Nordsee-Region überschritten wurde. Dieser Ansatz führt zu einem sehr ähnlichen Ergebnis (Abb. 4.8) wie das vorher angewandte Verfahren. Allerdings kommt es beim 1. Ansatz (Abb. 4.7) für einzelne Effektivwindgeschwindigkeiten vor, dass die Anzahl der einer Sturmflut zugeordneten Ereignisse größer als die mit den grauen Balken dargestellte Gesamtzahl ist. Dies kann damit erklärt werden, dass die höchste Effektivwindgeschwindigkeit nicht notwendig unmittelbar vor oder nach einem Windstaumaximum auftritt, und so der gleiche Sturm in den beiden Verteilungen unterschiedlichen Effektivwind-Geschwindigkeiten zugeordnet wird.

Wenn auch den Sturmflutereignissen der maximale Effektivwindwert während des Tracks zugeordnet wird, tritt dieser Effekt nicht auf. Wie in Abbildung 4.8 sichtbar lassen sich alle Sturmzugbahnen mit einer maximalen Effektivwindgeschwindigkeit von mehr als 19.75 m/s (als Mittelwert über die ERA-40 Gitterpunkte im Bereich der Deutschen Bucht) aufgetretenen Sturmfluten zuordnen. Bei dieser Stärke des Effektivwindes über der Deutschen Bucht treten Sturmfluten offenbar unabhängig von der astronomische Tide auf.

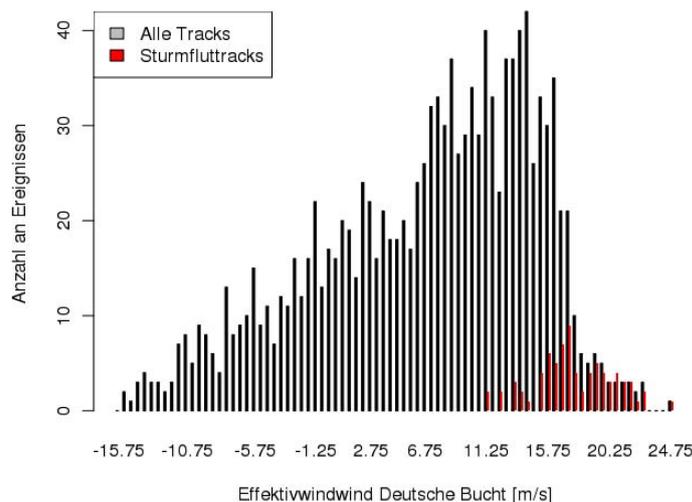


Abbildung 4.7: Histogramm der Anzahl der Tracks bezüglich der maximalen Effektivwindgeschwindigkeit (grau) sowie der Sturmfluttracks (rot). Den Sturmfluttracks wurde hierbei der maximale Effektivwind zum ERA40-Termin vor/nach dem Windstaumaximum zugeordnet

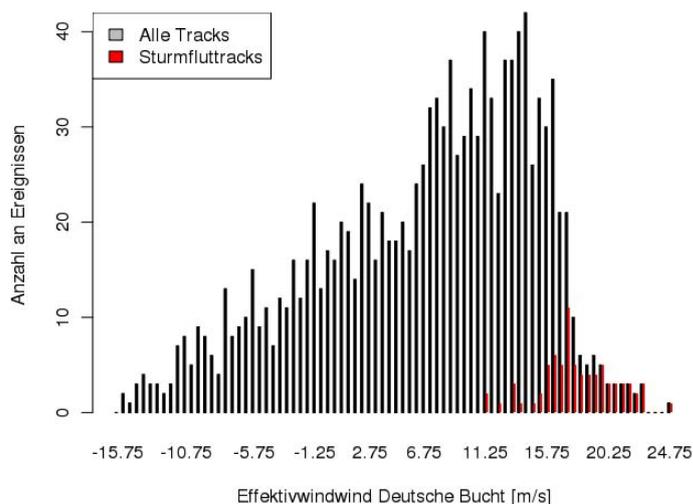


Abbildung 4.8: Histogramm der Anzahl der Tracks bezüglich der maximalen Effektivwindgeschwindigkeit (grau) sowie der Sturmfluttracks (rot). Den Sturmfluttracks wurde hierbei der maximale Effektivwind des Tracks gemäß ERA40 zugeordnet

Das Ergebnis, dass die maximalen Effektivwindgeschwindigkeit zur Identifikation sturmflutträchtiger Sturmereignisse aus dem Katalog der Sturmereignisse, die die Nordsee berühren, geeignet ist, wird für die Anwendung auf die Klimamodell-Daten verwendet. Durch Kombination mit der Sturmfeld-Identifikation kann die Mehrzahl der historischen Sturmfluten auch einem Sturmereignis zugeordnet werden. Die aus ERA-40 bestimmte Effektivwindgeschwindigkeit lässt sich wegen systematischer Unterschiede (z.B. Gitterpunktausdehnung) nicht direkt auf Klimamodelle übertragen.

Stattdessen wird der zugeordnete Perzentilwert verwendet. Die niedrigste ERA-40 Effektivwindgeschwindigkeit in der Deutschen Bucht, bei der eine Sturmflut in Cuxhaven beobachtet wurde, beträgt 11,476 m/s. Dies entspricht exakt einem Perzentilwert von 95,03. Dieser Perzentilwert gehört zu einer Effektivwindgeschwindigkeit in der ECHAM5-Simulation für heutigen Treibhausgasantrieb, nämlich 11,167 m/s. Dieser Wert wird für die Identifikation von (potentiellen) Sturmflutereignissen in den gesamten ECHAM-Simulationen verwendet.

4.3 Identifikation sturmflutrelevanter Sturmereignisse in den ECHAM5-Modelldaten

Entsprechend der Analyse sturmflutrelevanter Situationen im ERA-40 Zeitraum wurde dieselbe Methodik auf die ECHAM5 Modelldaten angewendet. Es soll hier allerdings nochmals darauf hingewiesen sein, dass zwar die Mindestgröße der identifizierten Sturmsysteme in ECHAM5 mit ca. 156000 qkm äquivalent zu jener in ERA-40

ist, jedoch dass dies im Fall von ECHAM5 einer Mindestanzahl von 8 Gitterboxen in 60° nördlicher Breite entspricht (entsprechend 20 Gitterboxen in ERA-40 bei 60° Nord).

Aufgrund der Tatsache, dass nur Ereignisse in den Monaten September bis Mai identifiziert werden, umfasst der Zeitraum für die drei 20C Realisierungen die Winter 1969/1970 bis 1999/2000 bzw. für die drei A1B Realisierungen die Winter 2069/2070 bis 2099/2100. Für die Berechnung der Windgeschwindigkeiten, die an den einzelnen Gitterpunkten im ECHAM-Modell dem 98. bzw. 95. Perzentil entsprechen, gehen alle Windgeschwindigkeiten des kompletten Zeitraums (nicht nur Winter) der drei 20C Realisierungen zwischen dem 01.08.1969 und dem 01.08.2000 ein. Die sich so ergebenden Windgeschwindigkeiten werden also für die Identifikation von Sturmereignissen sowohl in den 20C als auch in den A1B-Perioden der Modellsimulationen verwendet.

Tabelle 4.1 listet die Anzahl der Ereignisse in den einzelnen 20C bzw. A1B Läufen sowie ERA-40 (1969-2000) auf. Hierbei ist erkennbar, dass die absolute Anzahl der Ereignisse in der gesamten Identifikationsregion in 20C höher ist als in den A1B Läufen bzw. ERA-40. Dieser Unterschied ist aber nicht vorhanden, wenn nur die Sturmzugbahnen gezählt werden, die mindestens einen Zeitschritt mit einem Windfeld über der Nordsee-Region besitzen. Im Gegensatz dazu ist die Anzahl für die 20C Simulationsperioden im Ensemble-Mittel geringer als für die A1B-Perioden.

Tabelle 4.1: Anzahl der Tracks in der gesamten Trackingregion, sowie mit einem Windfeld über der Nordseeregion für ERA40, ECHAM5 20C (1969-2000) und A1B (2069-2100)

Datensatz	ERA-40	20C 1	20C 2	20C 3	A1B 1	A1B 2	A1B 3
Tracks gesamt	2408	2754	2752	2673	2404	2506	2428
Tracks mit Windfeld über Nordseeregion	952	900	866	909	921	943	903

Abbildung 4.13 zeigt die Häufigkeitsverteilung der maximal aufgetretenen Effektivwindgeschwindigkeit über der Deutschen Bucht für die identifizierten Sturmzugbahnen in den einzelnen Simulationen und für ERA-40 (1969-2000). Auffällig ist, dass in ERA-40 verglichen mit ECHAM5 20C und A1B deutlich mehr Tracks mit einer maximalen Effektivwindgeschwindigkeit zwischen 6 m/s und 15 m/s identifiziert werden. Dies ist zu einem Teil darin begründet, dass die Strömung in den ECHAM5 Simulationsdaten im Mittel zonaler ist als in ERA-40.

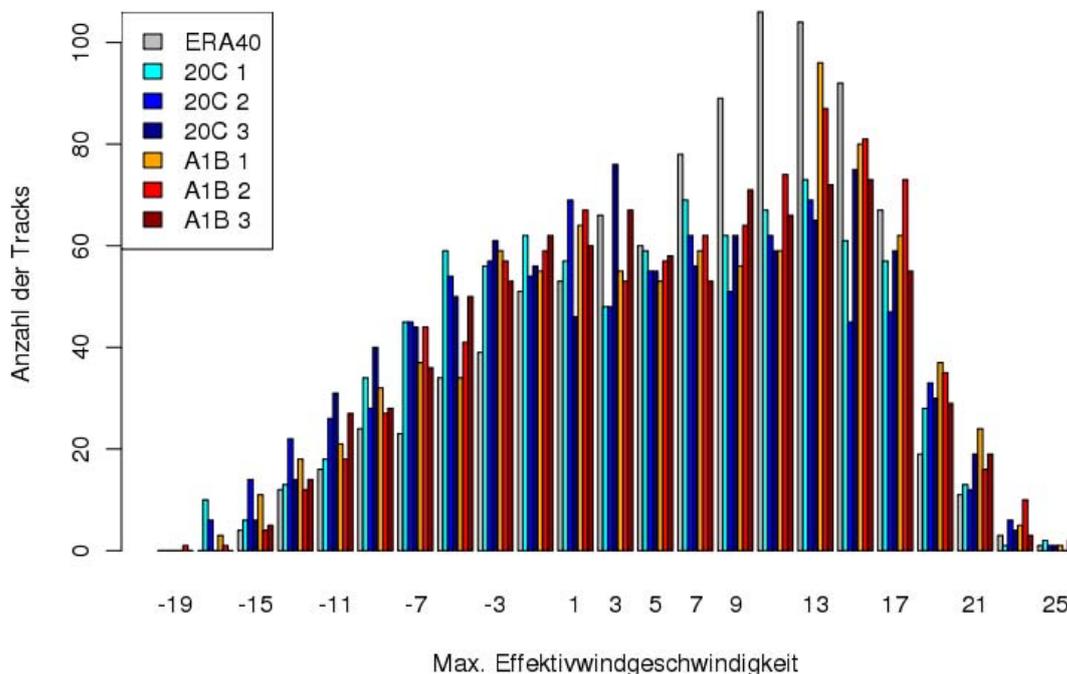


Abbildung 4.13: Anzahl der Tracks bezüglich ihrer maximalen Effektivwindgeschwindigkeit über der Deutschen Bucht Region für die drei Datensätze ERA40, 20C (beide 1969-2000) und A1B (2069-2100)

Im Abschnitt 4.2.2 wurde gezeigt, dass der minimale Effektivwindgeschwindigkeitswert, der mit einer historischen Sturmflut im ERA-40 Zeitraum verbunden war, bei 11.475 m/s liegt, was dem 95.03 Perzentil entspricht. Diesem Perzentilwert entspricht in den ECHAM5 20C Simulationsdaten aller drei Realisierungen ein Effektivwindwert von 11.167 m/s. Daraus folgend sind nur Tracks als sturmflutrelevant einzuordnen, bei denen der Effektivwind höher als 11.167 m/s ist.

Abbildung 4.14 zeigt die Anzahl der Sturmereignisse in 20C und A1B, die dieses Kriterium erfüllen, wobei diese Anzahl nach Klassen der absoluten Überschreitung der Grenzgeschwindigkeit aufgetragen ist. Es zeigt sich, dass in allen Klassen die Anzahl der A1B Sturmereignisse höher ist als jene in den 20C Realisierungen. Insgesamt sind laut oben genanntem Kriterium der Effektivwindgeschwindigkeit 781 Sturmereignisse in 20C (20C1:268 Ereignisse, 20C2: 238 Ereignisse, 20C3: 275 Ereignisse) und 948 Sturmereignisse in A1B (A1B1: 335 Ereignisse, A1B2: 332 Ereignisse, A1B3: 281 Ereignisse) als potentiell sturmflutrelevant zu identifizieren, was einem prozentualen Anstieg um ca. 21% entspricht. Betrachtet man nur die 60 nach dem stärksten Effektivwind über der Deutschen Bucht ausgewählten Ereignisse (siehe Abschnitt 5.2), entstammen 36 aus den A1B und 24 aus den 20C.

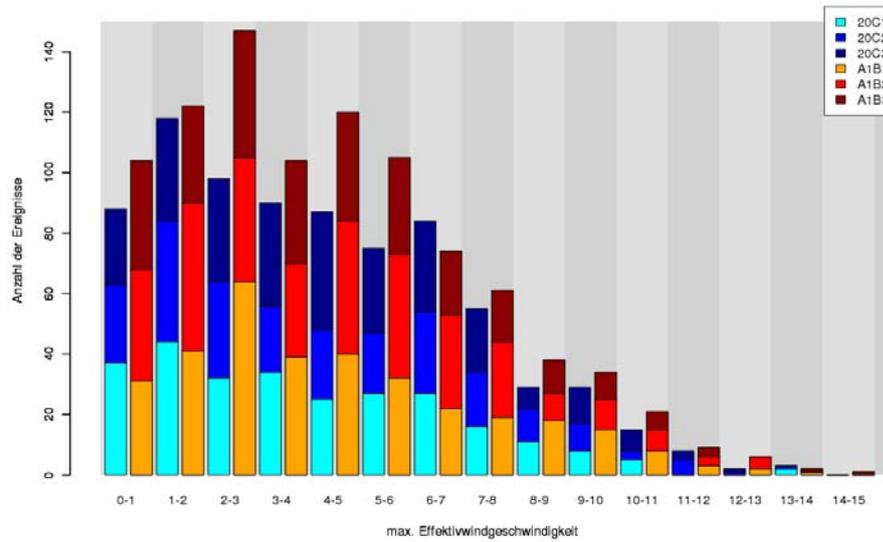


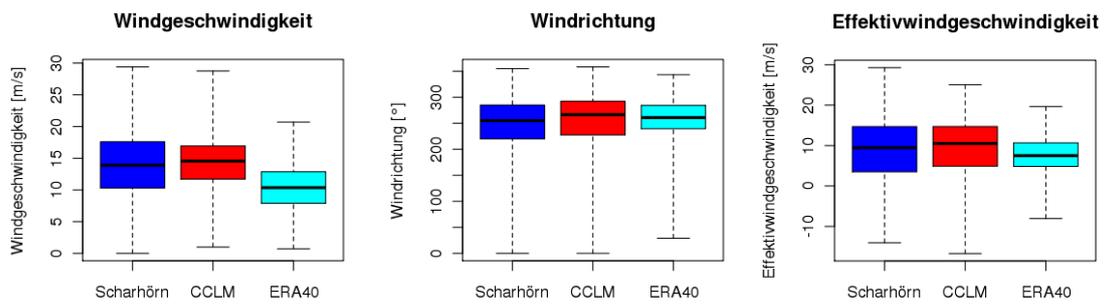
Abbildung 4.14: Anzahl der Ereignisse bezüglich der absoluten Überschreitung des 95.03 Perzentils der Effektivwindgeschwindigkeit über der Deutschen Bucht Region für die zwei Datensätze 20C (1969-2000) und A1B (2069-2100)

5 Ergebnisse aus ERA-40 Reanalysedaten und ECHAM5 Globalmodellsimulationen

5.1 CCLM Simulationen ausgewählter historischer Sturmflutereignisse

Als Teil des Projektes wurden hoch aufgelöste Simulationen zur Regionalisierung potentiell sturmflutträchtiger Sturmereignisse durchgeführt, die in den globalen Modellrechnungen mit dem ECHAM-Modell unter heutigem und verändertem Treibhausgasantrieb identifiziert wurden (siehe Abschnitt 4.4). Zur Validierung dieser Simulationsergebnisse wurden 30 historische Sturmfluten nachsimuliert. Dabei wurde jeweils eine horizontale Auflösung von $0.165^\circ \times 0.165^\circ$ (entspricht etwa 18 km) gewählt. Die Auswahl der historischen Ereignisse erfolgte dabei anhand des maximalen Windstaus (und nicht anhand der Gesamtwasserhöhe). Eine Übersicht über die stärksten 30 Ereignisse ist in Tabelle 5.1 aufgeführt. Zusätzlich zum Termin des höchsten Windstaus sind Start- und Endzeitpunkt der CCLM Simulation sowie die Verfügbarkeit von Windmessungen an der Station Scharhörn in der Tabelle angegeben. Diese Messdaten, die für 19 der 30 Ereignisse vorliegen, dienen hierbei zur Validierung der vom CCLM simulierten Windgeschwindigkeiten.

Abbildung 5.1 zeigt die einzelnen Verteilungen der Windgeschwindigkeit, -richtung und des Effektivwindes für ERA-40, CCLM und die Messungen an der Station Scharhörn für diese 19 Sturmflutereignisse. Im Fall von ERA-40 und CCLM wurde jeweils die nächstliegende Gitterbox zur Station Scharhörn gewählt. In die Boxplots gehen im Fall von CCLM und Scharhörn stündliche, im Fall von ERA-40 6-stündliche Werte in die Verteilungen ein. Deutlich zu erkennen ist, dass vor allem die Windgeschwindigkeitsverteilung bei ERA-40 schmaler und der Median geringer als beobachtet ist. Auch CCLM zeigt eine im Vergleich zu den Messdaten zu schmale Verteilung, aber eine deutlich bessere Übereinstimmung des Medians der Windgeschwindigkeit. Dieselbe Charakteristik ist auch für die Windrichtung erkennbar, obwohl nicht so stark ausgeprägt wie bei der Windgeschwindigkeit. Dies resultiert in eine zu schmale Verteilung der Effektivwindes in ERA-40 verglichen mit den Stationsmessungen. Im Fall des CCLM ist deutlich erkennbar, dass die maximal erreichte Effektivwindgeschwindigkeit deutlich geringer ist als in den Beobachtungsdaten.



Potentielle Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels auf das Sturmflutrisiko an der deutschen Nordseeküste

Abbildung 5.1: Verteilung der Windgeschwindigkeit, -richtung und Effektivwindgeschwindigkeit für Messdaten an der Station Scharhörn (stündl. Daten), CCLM (stündl. Daten, nächste Gitterbox zu Scharhörn) und ERA40 (6-stündliche Daten, nächste Gitterbox zu Scharhörn) für 19 Sturmflutereignisse. Die Grafiken zeigen jeweils den Median (schwarze horizontale Linie), den Bereich der beiden mittleren Quartile (farbige Bereiche) und die maximalen/minimalen Werte.

Tabelle 5.1: Liste der 30 stärksten Sturmflutereignisse gemessen am maximalen Windstau an der Station Cuxhaven

Rang	Datum/ Uhrzeit (max. Windstau)	Windstau [cm] (Cuxhaven)	Start (CCLM Simula- tion)	Ende (CCLM Simula- tion)	Scharhörn
1	23.02.67/ 18:35	444	18.02.67	25.02.67	
2	03.01.76 09:45 - 09:50	423	29.12.75	05.01.76	x
3	26.02.02/ 19:20	396	21.02.02	28.02.02	x
4	26.02.90/ 20:10	393	21.02.90	28.02.90	x
5	17.02.62 01:05 - 01:25	387	12.02.62	19.02.62	
6	03.12.99/ 19:55	368	28.11.99	05.12.99	x
7	01.02.83 22:10 – 22:25	360	26.01.83	03.02.83	x
8	26.01.90 05:50 – 05:55	353	21.01.90	28.01.90	x
9	15.01.68/ 17:05	339	10.01.68	17.01.68	
10	19.11.73/ 17:40	334	14.11.73	21.11.73	
11	20.12.93 01:40 – 01:45	334	15.12.93	22.12.93	x
12	18.01.83 10:00	333	13.01.83	20.01.83	x
13	06.11.85 11:30 – 11:50	329	01.11.85	08.11.85	x
14	14.02.89 12:50 – 12:55	329	09.02.89	16.02.89	x
15	06.12.73/ 20:20	328	01.12.73	08.12.73	
16	24.11.81/ 06:55	327	19.11.81	26.11.81	x
17	31.12.77/ 01:25	318	26.12.77	02.01.78	x
18	10.01.95/ 07:30	316	05.01.95	12.01.95	x
19	28.01.94/ 17:15	313	23.01.94	30.01.94	x
20	02.11.65/ 01:25	305	28.10.65	04.11.65	
21	30.01.00/ 04:30	300	25.01.00	01.02.01	x
22	13.02.65 20:20 – 20:30	297	08.02.65	15.02.65	
23	01.01.81 14:35 – 14:40	297	27.12.80	03.01.81	x
24	13.11.73/ 11:55	294	08.11.73	15.11.73	
25	12.02.62 21:15 – 21:25	289	07.02.62	14.02.62	
26	21.01.76 02:05 – 02:10	289	16.01.76	23.01.76	x
27	16.11.73 03:00 – 03:05	288	11.11.73	18.11.73	
28	23.02.02/ 04:50	287	18.02.02	25.02.02	x
29	15.01.84 03:25 – 03:35	286	10.01.84	17.01.84	x
30	05.02.99 05:10 – 05:15	286	01.02.99	07.02.99	x

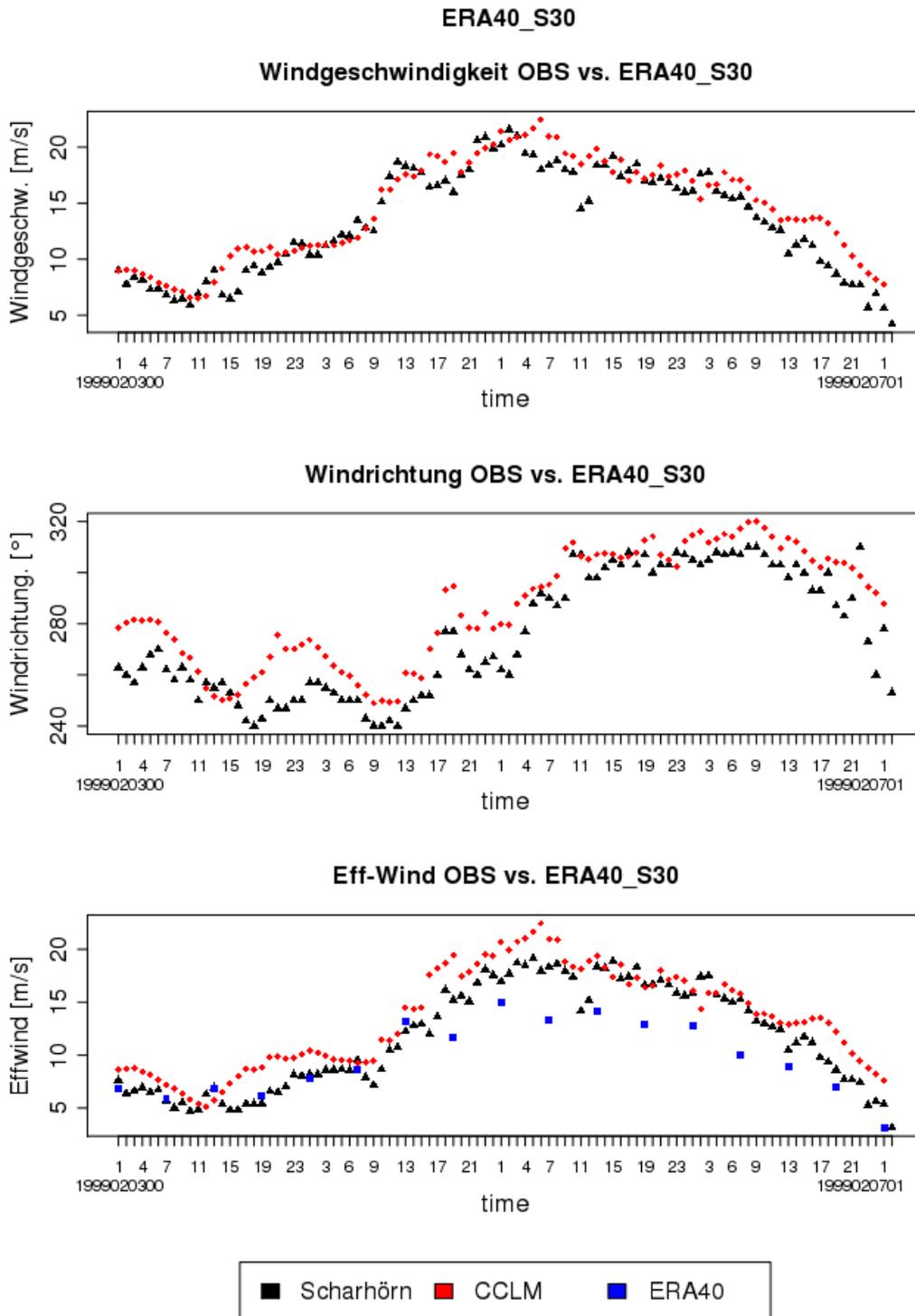


Abbildung 5.2: Zeitlicher Verlauf der Windgeschwindigkeit, -richtung und der Effektivwindgeschwindigkeit für die Sturmflut ERA40_S30

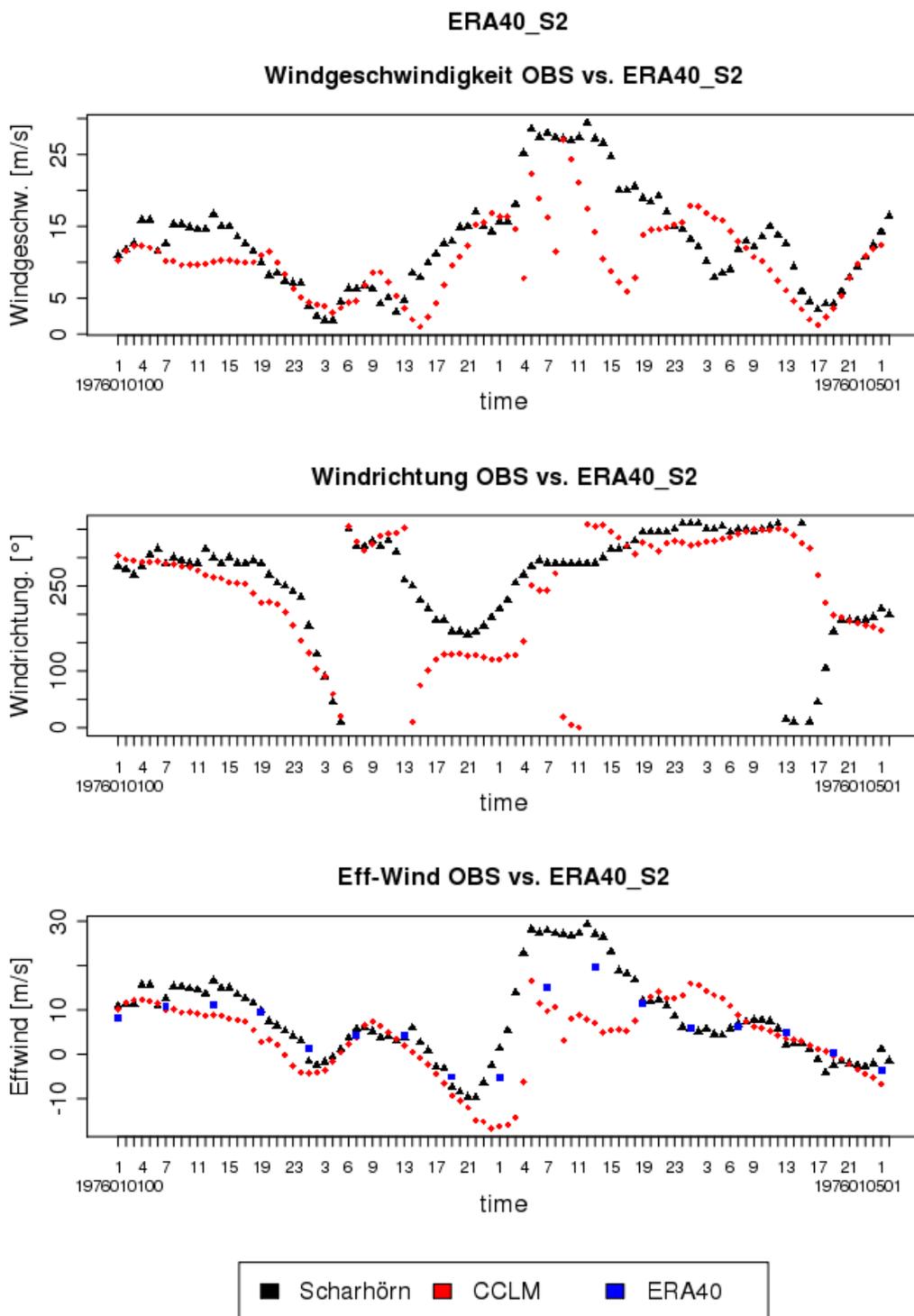


Abbildung 5.3: Zeitlicher Verlauf der Windgeschwindigkeit, -richtung und der Effektivwindgeschwindigkeit für die Sturmflut ERA40_S2

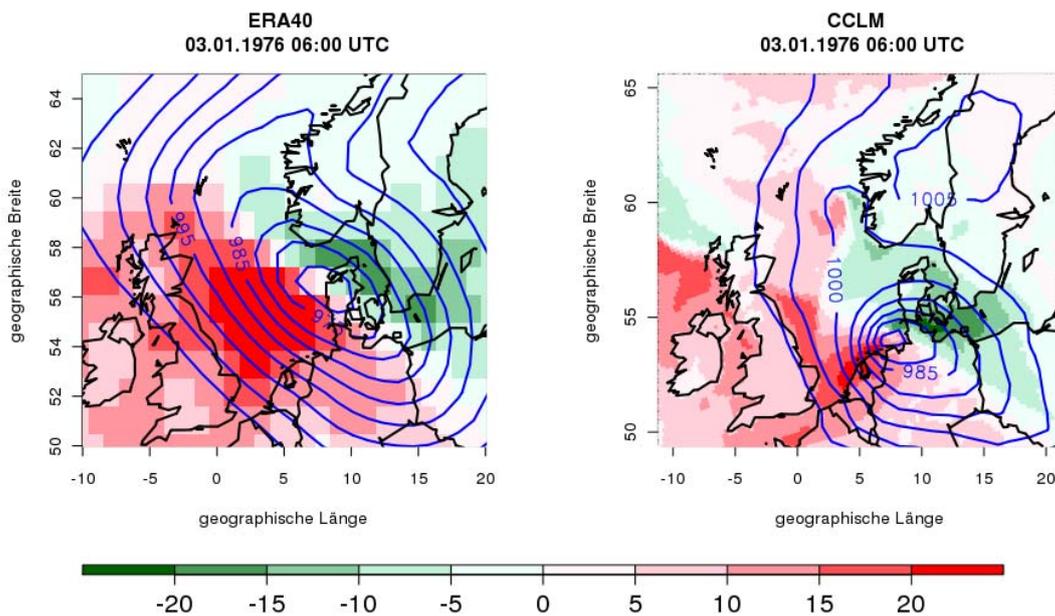


Abbildung 5.4: Bodendruckfeld (Isolinien) in hPa sowie Effektivwindfeld (farbig) in m/s vom 03.01.1976 06:00 UTC (Haupttermin von Sturmflut ERA40_S2) aus ERA40 und CCLM.

Abbildungen 5.2 und 5.3 zeigen den zeitlichen Verlauf für Windgeschwindigkeit, -richtung und Effektivwind für zwei ausgewählte Sturmflutsimulationen, nämlich denen mit Windstaumaximum am 5.2.1999 und 3.1.1976. Im Fall der Sturmflut ERA40 vom 5.2.1999 (Abbildung 5.2) ist eine relativ gute Übereinstimmung zwischen Messungen und den CCLM Ergebnissen im Verlauf aller drei betrachteter Größen zu erkennen, wobei hinsichtlich der Windrichtung eine systematische Abweichung über dem ganzen Zeitraum aufzutreten scheint. Der Effektivwind ist in diesem Fall deutlich stärker als im Fall von ERA-40. Im Gegensatz hierzu gibt es größere Abweichungen zwischen den Ergebnissen des CCLM und der Beobachtungen für die Sturmflut ERA-40_S2 (Abbildung 5.3). Es ist insbesondere ein deutlicher Abfall der mit CCLM simulierten Windgeschwindigkeit zum Termin des maximal beobachteten Effektivwindes zu erkennen.

Abbildung 5.4 veranschaulicht die synoptische Situation zum letzt genannten Fall anhand des Effektivwindes (farbig) und des Bodendruckfeldes (Isolinien). Das Zentrum der Zyklone ist demnach im ERA-40 Fall über Dänemark zu finden, was zu starken WNW Winden entlang der deutschen Nordseeküste führt. Im Fall von CCLM, das innerhalb seiner Modellgebiets eine leicht andere Entwicklung der Zyklone berechnen kann (da es nur am Rand durch die Reanalyse-Daten angetrieben wird und nicht im Inneren der Modellregion festgelegt ist), ist das Zentrum der Zyklone über Niedersachsen zu finden. Dementsprechend treten hohe Effektivwindgeschwindigkeiten vor allem an der Küste der Niederlande auf. An diesem Beispiel ist gut zu erken-

nen, warum vor allem kleinskalige synoptische Systeme eine andere Entwicklung im CCLM aufweisen können als in den anderen Datensätzen, wobei in den meisten Fällen die Entwicklung in ERA-40 durch das Analyseschema sehr nahe an den beobachteten synoptischen Strukturen gehalten wird.

5.2 CCLM Simulationen ECHAM5 20C und A1B

Für die Auswahl der hochaufgelösten Simulationen der 60 stärksten Ereignisse aus den ECHAM5 Simulationsdaten wurde der maximal im Modell aufgetretene Effektivwind über der Deutschen Bucht (gemittelt über die entsprechenden Gitterpunkte) als Kriterium herangezogen. Tabelle 5.2 listet die 60 stärksten Sturmereignisse auf, von denen 24 aus den 20C Realisierungen und 36 aus den A1B Läufen stammen.

Abbildung 5.5 zeigt die maximal aufgetretenen Effektivwindgeschwindigkeiten über der Deutschen Bucht Region für die 60 simulierten Sturmereignisse in den ECHAM5 Daten (blau und rot, Kreuz) samt den entsprechenden Ergebnissen der Regionalisierung im CCLM (cyan und orange). Dabei geben die Balken die Spannbreite des maximalen Effektivwindes der 5 CCLM Ensemble-Member wieder. Die Spannbreite erreicht bis zu 5 m/s. Die deutlich höchsten Werte der Effektivwindgeschwindigkeit erreichen im CCLM dabei 25.94 m/s bzw. 26.89 m/s, obwohl diese beiden Stürme im Ranking der ECHAM5 Effektivwindgeschwindigkeiten nur auf Position 7 bzw. 9 zu verzeichnen sind. Eine Vergleichbarkeit der absoluten Effektivwindgeschwindigkeiten zwischen ECHAM5 und CCLM ist zwar möglich, jedoch können zwischen den Modellen Unterschiede in den Effektivwindgeschwindigkeitsverteilungen auftreten. Auch hier wäre es sinnvoll die absolute Überschreitung des 95. Perzentils zu verwenden, jedoch liegt keine durchgängige CCLM Simulation mit dieser Modellversion vor, womit eine Berechnung des 95. Perzentils unmöglich ist.

Die in diesem Projekt mit dem CCLM nachsimulierten Sturmereignisse wurden daher nicht zur Abschätzung der Veränderung des Sturmflutrisikos an der deutschen Nordseeküste verwendet, sondern dienen für die Projektpartner des BSH zum Antrieb der Wasserstandsmodelle.

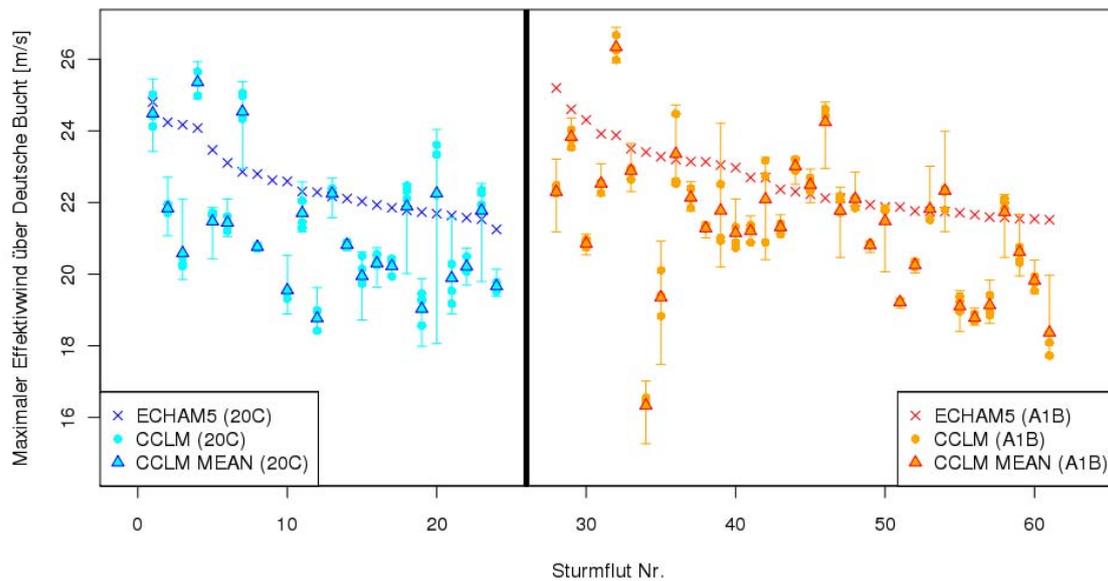


Abbildung 5.5: Maximale Effektivwindgeschwindigkeit über der Deutschen Bucht für die 60 stärksten Ereignisse. Blau (Kreuz): ECHAM5 (20C), cyan (Punkte) CCLM (20C, 5 Member), blau (Dreieck) CCLM Mittel (20C, 5 Member), rot (Kreuz): ECHAM5 (A1B), orange (Punkte) CCLM (A1B, 5 Member), rot (Dreieck) CCLM Mittel (A1B, 5 Member). Die angegebenen Spannbreiten geben den Wertebereich an, der mit den 5 CCLM Simulationen des jeweiligen Ereignisses berechnet wurde.

Tabelle 5.2: Auflistung der 60 stärksten Sturmereignisse (20C und A1B) gemessen an dem maximalen Effektivwind über der Deutschen Bucht Region. Spalte 1: Rang des Ereignisses, Spalte 2: ECHAM5 Modelllauf, Spalte 3: Tag des aufgetretenen Effektivwindmaximums, Spalten 4 und 5: Start und Ende der CCLM Simulationen, Spalte 6: Maximaler Effektivwindwert

Rang	EH5 Lauf	Datum der max. Effektivwindgeschw.	Startdatum CCLM	Enddatum CCLM	max. Effektivwindgeschw.[m/s]
1	A1B3	29.11.2097	24.11.2097	03.12.2097	25.1973
2	20C1	16.11.1997	11.11.1997	20.11.1997	24.8070
3	A1B1	28.10.2079	23.10.2079	01.11.2079	24.6045
4	A1B3	06.01.2098	01.01.2098	10.01.2098	24.306
5	20C2	07.11.1980	02.11.1980	11.11.1980	24.2404
6	20C1	22.12.1991	17.12.1991	26.12.1991	24.1716
7	20C3	19.01.1983	14.01.1983	23.01.1983	24.0795
8	A1B2	02.02.2076	28.01.2076	06.02.2076	23.9193
9	A1B1	06.01.2079	01.01.2079	10.01.2079	23.8789
10	A1B2	09.02.2086	04.02.2086	13.02.2086	23.5041
11	20C2	05.11.1990	31.10.1990	09.11.1990	23.4692
12	A1B2	03.11.2087	29.10.2087	07.11.2087	23.4089
13	A1B2	06.12.2074	01.12.2074	10.12.2074	23.2807
14	A1B1	05.12.2074	30.11.2074	09.12.2074	23.2019

Potentielle Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels auf das Sturmflutrisiko an der deutschen Nordseeküste	15	A1B2	11.09.2074	06.09.2074	15.09.2074	23.1438
	16	A1B1	27.12.2079	22.12.2079	31.12.2079	23.1391
	17	20C3	14.11.1987	09.11.1987	18.11.1987	23.1075
	18	A1B1	29.10.2083	24.10.2083	02.11.2083	23.0468
	19	A1B1	28.12.2078	23.12.2078	01.01.2079	22.9732
	20	20C3	21.12.1997	16.12.1997	25.12.1997	22.8568
	21	20C2	02.12.1978	27.11.1978	06.12.1978	22.7965
	22	A1B2	02.03.2085	25.02.2085	06.03.2085	22.6990
	23	A1B3	26.01.2097	21.01.2097	30.01.2097	22.6961
	24	20C3	21.12.1994	16.12.1994	25.12.1994	22.6235
	25	20C2	19.12.1971	14.12.1971	23.12.1971	22.5912
	26	A1B3	11.11.2084	06.11.2084	15.11.2084	22.3668
	27	20C2	08.01.1973	03.01.1973	12.01.1973	22.3087
	28	A1B3	02.11.2076	28.10.2076	06.11.2076	22.3041
	29	20C2	31.12.1993	26.12.1993	04.01.1994	22.2885
	30	A1B2	04.02.2076	30.01.2076	06.02.2076	22.2314
	31	20C2	30.09.1982	25.09.1982	04.10.1982	22.1685
	32	A1B2	21.02.2095	16.02.2095	25.02.2095	22.1240
	33	A1B2	07.02.2094	02.02.2094	11.02.2094	22.1204
	34	20C1	25.11.1989	20.11.1989	29.11.1989	22.1102
	35	20C3	26.12.1990	21.12.1990	30.12.1990	22.0331
	36	A1B2	24.09.2098	19.09.2098	28.09.2098	22.0130
	37	A1B3	14.11.2093	09.11.2093	18.11.2093	21.9372
	38	20C2	03.10.1980	28.09.1980	07.10.1980	21.9324
	39	A1B3	13.01.2098	08.01.2098	17.01.2098	21.8771
	40	A1B3	03.10.2093	28.09.2093	07.10.2093	21.8761
	41	20C3	06.01.1987	01.01.1987	10.01.1987	21.8537
	42	20C1	23.09.1997	18.09.1997	27.09.1997	21.7789
	43	A1B1	09.01.2076	04.01.2076	13.01.2076	21.7641
	44	A1B1	04.02.2090	30.01.2090	06.02.2090	21.7500
	45	A1B1	12.10.2079	07.10.2079	16.10.2079	21.7468
	46	20C3	26.01.1970	21.01.1970	30.01.1970	21.7336
	47	A1B3	22.11.2087	17.11.2087	26.11.2087	21.7122
	48	20C2	01.12.1983	26.11.1983	05.12.1983	21.6885
	49	A1B2	09.01.2084	04.01.2084	13.01.2084	21.6598
	50	20C3	10.11.1995	05.11.1995	14.11.1995	21.6387
	51	A1B1	25.12.2086	20.12.2086	29.12.2086	21.5931
	52	A1B2	29.10.2092	24.10.2092	02.11.2092	21.5854
	53	20C2	25.11.1976	20.11.1976	29.11.1976	21.5761
	54	A1B1	31.10.2093	26.10.2093	04.11.2093	21.5475
	55	A1B1	24.12.2094	19.12.2094	28.12.2094	21.5414
	56	20C3	14.02.1978	09.02.1978	18.02.1978	21.5345
	57	A1B1	06.09.2076	01.09.2076	10.09.2076	21.5191
	58	A1B2	08.03.2091	03.03.2091	12.03.2091	21.4899
	59	A1B3	09.11.2088	04.11.2088	13.11.2088	21.3195
	60	20C3	16.12.1992	11.12.1992	20.12.1992	21.2492

6 Zusammenfassende Diskussion

In diesem Projekt sollte die Änderung des Sturmflutenpotentials an der deutschen Nordseeküste unter veränderten klimatischen Bedingungen untersucht werden. Hierfür wurden die Ergebnisse von jeweils drei Modellläufen des gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modells ECHAM5/OM1, die mit beobachteten Treibhausgaskonzentrationen (20C) und einem Szenario von deren zukünftiger Entwicklung (A1B) angetrieben wurden, für die Zeitscheiben 1969 bis 2000 bzw. 2069 bis 2100 ausgewertet.

Dazu wurden zunächst die operationell verwendeten Verfahren anhand von Reanalyse-Datensätze validiert, um daraus ein objektives Verfahren für die Identifikation sturmflutrelevanter Ereignisse zu entwickeln. Dieses Verfahren wurde schließlich auf die Modelldaten angewandt.

Als erster Schritt wurde daher die operationell verwendete Verbindung zwischen der Windgeschwindigkeit bzw. -richtung und dem Windstau für die Station Cuxhaven als exemplarische Repräsentantin der deutschen Nordseeküste für die zeitlich und räumlich gering aufgelösten ERA-40 Daten validiert. In Anlehnung an das KFKI Projekt MUSE wurde auch in diesem Projekt die auf 295° projizierte Windgeschwindigkeit (Effektivwind) über der Deutschen Bucht berechnet. Es bestätigt sich ein enger Zusammenhang zwischen dem Effektivwind, gemittelt über die Deutsche Bucht, und dem Windstau an der Station Cuxhaven mit einem Spearman-Korrelationskoeffizienten von über 0,7. Der Zusammenhang ist bei einem Zeitversatz von ca. 2-3 Stunden (wobei der Effektivwind führt) am stärksten (Korrelation von über 0,8). Diese und weitere mögliche Verbesserungen des Ansatzes, insbesondere hinsichtlich unterschiedlicher relevanter effektiver Windrichtungen im Bereich der deutschen Bucht, konnten im Rahmen des Projekts aus Zeitgründen nicht weiter verfolgt werden.

Anstatt einer Einschätzung des Sturmflutrisikos allein auf Grundlage des momentanen Effektivwindes über der Deutschen Bucht wurden nur solche Ereignisse ausgewählt, die im Zusammenhang mit einem größeren Sturmfeld standen. Hierdurch wurde vermieden, dass sehr kleinräumige, kurzzeitige Ereignisse gleichwertig als sturmflutrelevant eingeschätzt wurden. Dazu wurde ein objektives Verfahren verwendet, das auf der Identifikation von größeren Sturmfeldern anhand der 6-stündigen 10-Meter Winde basiert. Insgesamt konnten 77 der 82 Sturmflutereignisse in den Monaten September bis Mai mit einem nach den gewählten Kriterien identifizierten, gröberskaligen Sturmereignis in Verbindung gebracht werden.

Es zeigte sich außerdem, dass Sturmfluten erst ab einer Effektivwindgeschwindigkeit auftraten, die dem 95. Perzentil der klimatologischen Verteilung entspricht. Dementsprechend ergibt sich über die Kombination der Identifikation von Sturmereignissen mit Hilfe des verwendeten Algorithmus und der Effektivwindgeschwindigkeit über

der Deutschen Bucht eine gute Möglichkeit zur Identifikation und Selektion potentiell sturmfluträchtiger Ereignisse in Klimamodellldaten.

Im nächsten Schritt wurden Sturmereignisse in den ECHAM5 Modelldaten identifiziert. Hierbei wurde im Fall von 20C die Winter zwischen 1969/1970 und 1999/2000 und im Fall der A1B Simulationen der Zeitraum zwischen 2069/2070 und 2099/2100 untersucht. Sturmflutrelevante Ereignisse wurden in ECHAM5 anhand des Perzentils der Effektivwindgeschwindigkeit identifiziert, das in ERA40 die Sturmflutereignisse auszeichnete (95%). Es zeigte sich gegenüber ERA-40 eine deutliche Unterschätzung der Häufigkeit von Sturmereignissen mit Effektivwindgeschwindigkeiten zwischen 6 m/s und 15 m/s, sowie einer höheren Besetzung der Klassen über 18 m/s, deren Ursache hier nicht weiter untersucht wurde. Es zeigte sich ein Anstieg dieser Ereignisse von ca. 21% in A1B gegenüber 20C.

Im Rahmen des Projekts wurden außerdem hochaufgelöste Simulationen mit dem Regionalmodell COSMO-CLM (CCLM) mit einer Gittermaschenbreite von ca. 18 km für ausgewählte Sturmepisoden durchgeführt. Diese Sturmepisoden können von den Projektpartnern vom BSH als Antrieb für Wasserstandsmodelle verwendet werden.

Zunächst wurden die 30 stärksten historischen Sturmflutereignisse betrachtet. Die Auswahl wurde hierbei anhand des maximal aufgetretenen Windstaus getätigt. Der Vergleich der Simulationsergebnisse der bodennahen Windgeschwindigkeit mit Beobachtungen an der Station Scharhörn ergab eine gegenüber den Werten in den ERA-40 Reanalysen (nächstliegender Gitterpunkt) verbesserte Übereinstimmung. Es zeigte sich weiterhin, dass synoptische Systeme im CCLM eine gegenüber den Beobachtungen leicht modifizierte Entwicklung aufweisen können, was teilweise zu großen regionalen Unterschieden im Effektivwind führt.

Entsprechend wurden die 60 stärksten Ereignisse der ECHAM5 Simulationen, gemessen am maximal aufgetretenen Effektivwind, mit dem Regionalmodell CCLM in einer horizontalen Auflösung von ca. 18 km nachsimuliert. Insgesamt wurden jeweils fünf Simulationen durchgeführt, die sich nur durch eine kleine Verschiebung des Modellgebietes unterscheiden, wobei alle Simulationen des Ensembles als in sich physikalisch konsistent angesehen werden können. Es zeigte sich ein maximaler Unterschied der einzelnen CCLM-Ensemble-Mitglieder im maximal aufgetretenen Effektivwind über der Deutschen Bucht von über 5 m/s. Für die meisten mit CCLM regionalisierten Ereignisse ist die über die fünf Ensemble-Mitglieder gemittelte maximale Effektivwindgeschwindigkeit geringer als der entsprechende Wert im antreibenden Modell ECHAM5; es gibt aber auch Ereignisse mit umgekehrten Verhältnissen.

In diesem Projekt konnte aus Zeitgründen nur die Zeiträume 1969-2000 für das rezente Klima und 2069-2100 für das A1B Szenario untersucht werden, womit keine Aussagen über mögliche dekadische bis multi-dekadische Schwankungen getroffen wer-

den können. Dieser Aspekt soll im Folgeprojekt durch die Verwendung des kompletten 20C und A1B Zeitraums weiter untersucht werden.

Auch sollte untersucht werden wie der Ansatz über die Effektivwindgeschwindigkeit den Windstau einzuschätzen weiter verbessert werden kann. Dazu können einerseits höher aufgelöste Reanalysen (ERA-Interim), andererseits die Regionalmodellsimulationen mit dem CCLM herangezogen werden.

Potentielle
Auswirkungen des
anthropogenen
Klimawandels
auf das Sturmflut-
risiko an der
deutschen
Nordseeküste

- [1] <http://www.bsh.de/aktdat/wvd/tabelb.htm> (letzter Abruf am 09.01.2012).
- [2] 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. Hólm, L. Isaksen, P. Kållberg, 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. Thépaut, 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.
- [3] A. Ganske, H. Heinrich, and G. Rosenhagen. Wind fields in the north sea region - past and possible future changes. WCRP Open Science Conference “Climate Research in Service to Society”, Oktober 2011.
- [4] Gerber, M. , A. Ganske, S. H. Müller-Navarra, G. Rosenhagen: Categorizing of Meteorological Conditions for Storm Surge Events at the German Bight, to be published (2012).
- [5] Gönnert, G.: Sturmfluten und Windstau in der Deutschen Bucht. Charakter, Veränderungen und Maximalwerte im 20. Jahrhundert. *Küste* 76, 186 – 365, 2003.
- [6] G. Gönnert and T. Buss. Sturmfluten zur Bemessung von Hochwasserschutzanlagen. *Berichte des Landesbetriebes Strassen, Brücken und Gewässer. Landesbetrieb Strassen, Brücken und Gewässer*, 2009.
- [7] Jürgen Jensen, Christoph Mudersbach, and Christian Koziar. Simulation von extremen Sturmflutwetterlagen in der Nordsee und deren statistische Analyse. In *Klimaänderung und Küstenschutz, Tagungsband der Tagung "Klimaänderung und Küstenschutz"*, pages 159–169. Gönnert, G., H. Graßl, D. Kelletat, H. Kunz, B. Probst, H. von Storch & J. Sündermann, 2004.
- [8] G. C. Leckebusch, D. Renggli, and U. Ulbrich. Development and application of an objective storm severity measure for the northeast atlantic region. *Meteorologische Zeitung*, 17:575–587, 2008.
- [9] G.C. Leckebusch, T. Kruschke, D. Renggli, P. Lorenz, J. Lange, K. Nissen, and U. Ulbrich. Sensitivities and applicability of a universal wind storm identification and tracking algorithm. in prep., 2012.
- [10] S.H. Müller-Navarra, W. Lange, S. Dick, and K.C. Soetje. Über die Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage: Hydrodynamisch-numerische Modelle der Nord- und Ostsee und empirisch-statistisches Verfahren für die Deutsche Bucht. *Promet*, 29:117–124, 2003.

[11] I. Orlanski. The quasi-hydrostatic approximation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 38:572–582, 1981.

[12] S.M. Uppala, P.W. Kållberg, A.J. Simmons, U. Andrae, V. Da Costa Bechtold, M. Fiorino, J.K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G.A. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarinen, N. Sokka, R.P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M.A. Balmaseda, A.C.M. Beljaars, L. Van De Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Hólm, B.J. Hoskins, L. Isaksen, P. A. E. M. Janssen, R. Jenne, A.P. McNally, J.-F. Mahfouf, J.-J. Morcrette, N.A. Rayner, R.W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K.E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo, and J. Woollen. The era-40 re-analysis. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 131(612):2961–3012, 2005.

[13] F.K. Wippermann. The applicability of several approximations in mesoscale modelling - a linear approach. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, 54:11, 1981.

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

[15] www.clm-community.eu



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



**BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE**



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



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: Daniel J. Befort¹, G.C. Leckebusch^{1,2},
U.Ulbrich¹, G. Rosenhagen³, H. Heinrich⁴,
A. Ganske⁴
¹FU Berlin, ²Universität of Birmingham,
³DWD, ⁴BSH

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

Druck: Bundesanstalt für Gewässerkunde

DOI: 10.5675/Kliwas_62/2014_Sturmflutrisiko_2