

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Periodical Part, Report, Published Version

Bülow, Katharina; Ganske, Anette; Hüttl-Kabus, Sabine; Klein, Birgit; Klein, Holger; Löwe, Peter; Möller, Jens; Schade, Nils; Tinz, Birger; Heinrich, Hartmut; Rosenhagen, Gudrun

Entwicklung gekoppelter regionaler Modelle und Analyse der Klimawandelszenarien für die Nordseeregion

KLIWAS Schriftenreihe

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105384>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bülow, Katharina; Ganske, Anette; Hüttl-Kabus, Sabine; Klein, Birgit; Klein, Holger; Löwe, Peter; Möller, Jens; Schade, Nils; Tinz, Birger; Heinrich, Hartmut; Rosenhagen, Gudrun (2014): Entwicklung gekoppelter regionaler Modelle und Analyse der Klimawandelszenarien für die Nordseeregion. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde (KLIWAS Schriftenreihe, 31/2014). https://doi.org/10.5675/Kliwas_31/2014_2.01.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

KLIWAS Schriftenreihe KLIWAS-31/2014

**Schlussbericht
KLIWAS-Projekt 2.01**

**Entwicklung gekoppelter regionaler
Modelle und Analyse der Klimawandel-
szenarien für die Nordseeregion**

Koblenz, im Dezember 2014



BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE





KLIWAS Schriftenreihe KLIWAS-31/2014

Schlussbericht
KLIWAS-Projekt 2.01

Entwicklung gekoppelter regionaler
Modelle und Analyse der Klimawandel-
szenarien für die Nordseeregion

Autoren:

Katharina Bülow¹,
Anette Ganske¹,
Sabine Hüttl-Kabus¹,
Birgit Klein¹, Holger Klein¹,
Peter Löwe¹, Jens Möller¹,
Nils Schade¹, Birger Tinz²,
Hartmut Heinrich¹,
Gudrun Rosenhagen²

¹) Bundesamt für Seeschifffahrt
und Hydrographie

²) Deutscher Wetterdienst

Zitiervorschlag:

K. BÜLOW, A. GANSKE, S. HÜTTL-KABUS, B. KLEIN, H. KLEIN, P. LÖWE, J. MÖLLER, N. SCHADE, B. TINZ, H. HEINRICH, G. ROSENHAGEN (2014): Entwicklung gekoppelter regionaler Modelle und Analyse von Klimawandelszenarien für die Nordseeregion. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.01. KLIWAS-31/2014. BSH / BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas_31/2014_2.01

URL: http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_31_2014_2.01.pdf

Seite

Kapitel

Inhaltsverzeichnis

05		TABELLENVERZEICHNIS
05		ABBILDUNGSVERZEICHNIS
07	1	KURZFASSUNG
11	2	ZIELE
12	3	GEKOPPELTE REGIONALE KLIMAPROJEKTIONEN FÜR DIE NORDSEE
16	4	ATMOSPHERISCHE REGIONALE KLIMAPROJEKTIONEN
17	5	WINDKLIMA
20	6	STURMFLUTEN
22	7	MEERESSPIEGEL
25	8	SEEGANG
29	9	VERNETZUNG DES PROJEKTES, KOOPERATIONSPARTNER
30	10	ERGEBNISSE
30	10.1	ERREICHTER METHODISCH-WISSENSCHAFTLICHER FORTSCHRITT
30	10.1.1	GEKOPPELTE REGIONALE KLIMAPROJEKTIONEN FÜR DIE NORDSEE
32	10.1.2	SALZGEHALT UND WASSERTEMPERATUR
32	10.1.3	OZEANISCHE DYNAMIK
33	10.1.4	WINDGESCHWINDIGKEITEN UND WINDRICHTUNGEN
35	10.1.5	STURMFLUTEN IN DER DEUTSCHEN BUCHT
35	10.1.6	MEERESSPIEGEL
36	10.1.7	SEEGANG
38	10.2	KERNAUSSAGEN ZU DEN ERGEBNISSEN
38	10.2.1	GEKOPPELTE REGIONALE KLIMAPROJEKTIONEN FÜR DIE NORDSEE
41	10.2.2	SALZGEHALT, WASSERTEMPERATUR UND OZEANISCHE DYNAMIK
44	10.2.3	WINDGESCHWINDIGKEITEN UND WINDRICHTUNGEN ÜBER DER NORDSEE
45	10.2.4	STURMFLUTEN IN DER DEUTSCHEN BUCHT
45	10.2.5	MEERESSPIEGEL
45	10.2.6	SEEGANG

Seite	Kapitel	
47	10.3	EINSCHÄTZUNG ZUM GRAD DER BETROFFENHEIT DES SYSTEMS WASSERSTRAßE UND DES OPERATIVEN GESCHÄFTS DES BMVBS UND DER WSV
48	10.4	KERNAUSSAGEN ÜBER MÖGLICHE ANPASSUNGSOPTIONEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN
49	11	DISKUSSION UND AUSBLICK
51	12	DANKSAGUNG
52	13	LITERATUR
58	14	ABKÜRZUNGEN

Seite

Tabelle

Tabellenverzeichnis

15	1	ÜBERSICHT DER VERWENDETEN GEKOPPELTEN MODELLE
19	2	ANALYSIERTE ATMOSPHERISCHE REGIONALMODELLE
28	3	MODELLRECHNUNGEN DES CMIP3 ARCHIVS, FÜR DIE STATISTISCHES DOWNSCALING DURCHGEFÜHRT WURDE
29	4	PROJEKT 2.01, KOOPERATIONEN UND AUFTRÄGE
37	5	BANDBREITE DES 99. PERZENTILS DER SWH FÜR ANGEGEBENE 30-JAHRESPERIODEN, IM VERGLEICH ZU 1971-2000 [IN %]. DIE ERGEBNISSE WERDEN GETRENNT FÜR DIE WESTLICHE UND ÖSTLICHE NORDSEE DARGESTELLT
39	6A	BANDBREITE DER ÄNDERUNGEN FÜR VERSCHIEDENE ATMOSPHERISCHE GRÖßEN FÜR DIE NAHE ZUKUNFT (2021 – 2050) IM VERGLEICH ZUM REFERENZZEITRAUM 1961 – 1990
40	6B	BANDBREITE DER ÄNDERUNGEN FÜR VERSCHIEDENE ATMOSPHERISCHE GRÖßEN FÜR DIE FERNE ZUKUNFT 2070 - 2099 IM VERGLEICH ZUM REFERENZZEITRAUM 1961 – 1990
43	7	BANDBREITE DER ÄNDERUNGEN FÜR VERSCHIEDENE OZEANISCHE GRÖßEN IM ZEITRAUM NAHE ZUKUNFT (2021 – 2050) UND FERNE ZUKUNFT (2070 – 2099) IM VERGLEICH ZU DEM ZEITRAUM 1961 - 1990

Seite

Abbildung

Abbildungsverzeichnis

31	1A	BANDBREITEN DER ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR DIE NAHE ZUKUNFT DER ENSEMBLES ATMOSPHÄRENMODELLLÄUFE SOWIE DER DREI GEKOPPELTEN MODELLE FÜR DIE 2 M LUFTTEMPERATUR, WOLKENBEDECKUNG, SOWIE DIE KURZ- UND LANGWELIGE NETTOSTRAHLUNG FÜR DAS NORDSEEGBIET
31	1B	BANDBREITEN DER ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR DIE FERNE ZUKUNFT DER ENSEMBLES ATMOSPHÄRENMODELLLÄUFE SOWIE DER DREI GEKOPPELTEN MODELLE FÜR DIE 2 M LUFTTEMPERATUR, WOLKENBEDECKUNG, SOWIE DIE KURZ- UND LANGWELIGE NETTOSTRAHLUNG FÜR DAS NORDSEEGBIET
33	2	BANDBREITEN DER 3 GEKOPPELTEN KLIMAMODELLERGESBNISSE FÜR ÄNDERUNGEN DES MITTLEREN SALZGEHALTS AN DER OBERFLÄCHE UND DER MITTLEREN WASSERTEMPORATUR AN DER OBERFLÄCHE IN [K] FÜR DAS NORDSEEGBIET
34	3	ANOMALIEN DER 30-JÄHRIGEN GLEITENDEN MITTELWERTE DES 99. PERZENTILES DER JÄHRLICHEN HÄUFIGKEITSVERTEILUNGEN DER WINDGESCHWINDIGKEIT, BERECHNET AUS 8 RCM FÜR DIE DEUTSCHE BUCHT
34	4	ANOMALIEN DER 30-JÄHRIGEN GLEITENDEN MITTELWERTE DER JÄHRLICHEN HÄUFIGKEITEN DER WINDRICHTUNGSKLASSE NORDWEST, BERECHNET MIT 6 RCM FÜR DIE DEUTSCHE BUCHT
35	5	ANZAHL DER STURMFLUTRELEVANTEN EREIGNISSE PRO JAHR VON 1900 BIS 2100 FÜR DIE 3 REALISIERUNGEN VON 20C UND VON A1B
36	6	BANDBREITEN DER 3 GEKOPPELTEN KLIMAMODELLERGESBNISSE FÜR ÄNDERUNGEN DES MITTLEREN MEERESSPIEGELS AN DER OBERFLÄCHE IN [M]
43	7	DIE BATHYMETRIE DES REGIONALEN OZEANMODELLS HAMSOM. DAS MITTELUNGSGBIET FÜR DIE NORDSEE IST BESCHRÄNKT AUF DIE SEEPUNKTE DES JEWEILIGEN MODELLS ZWISCHEN 51° - 59.5 N UND 4°W - 8,5° E
44	8	WINDRICHTUNGSVERTEILUNGEN FÜR ALLE WINDGESCHWINDIGKEITEN (LINKS) UND WINDGESCHWINDIGKEITEN GRÖßER ALS DAS 95. PERZENTIL (RECHTS)
46	9	ÄNDERUNG DES 99. PERZENTILS DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE (SWH) IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1961-1990 IM MODELL REMO (OBEN) UND DMI-HIRHAM (UNTEN) IN [%], FÜR DIE PERIODEN 2011-2040 (LINKS), 2041-2070 (MITTE) UND 2071-2100 (RECHTS)

1 Kurzfassung

Das KLIWAS Projekt 2.01 wurde in einer Kooperation des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und des Deutschen Wetterdienstes (DWD), Seewetteramt Hamburg bearbeitet. Es hatte die Aufgabe, soweit möglich, künftige Veränderungen atmosphärischer und ozeanischer Verhältnisse abzuschätzen und zu quantifizieren. Aufbauend auf den Ergebnissen von Projekt 1.03 wurden hierfür für die Atmosphäre Ergebnisse verschiedener regionaler Klimaprojektionen aus dem EU-Projekt ENSEMBLES ausgewertet und verglichen. Dabei zeigen die unterschiedlichen Modelle und Emissionsszenarien eine Bandbreite potentieller Klimaänderungen auf, welche die gegenwärtigen Unsicherheiten dokumentiert.

Da im Projekt ENSEMBLES nur Simulationen mit ungekoppelten atmosphärischen Regionalmodellen verfügbar waren, welche ein Ozeanverhalten vorgeben, dabei aber die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ozean nicht berücksichtigen und somit keine Ergebnisse für ozeanische Parameter mit regionaler Auflösung vorlagen, wurden in Rahmen von Kooperationen mit externen Forschungseinrichtungen Simulationen mit drei verschiedenen gekoppelten regionalen Ozean-Atmosphärenmodellen gerechnet. Als Partner konnten das Schwedische Meteorologische und Hydrologische Institut (SMHI), das Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI) und die Universität Hamburg in Zusammenarbeit mit dem Climate Service Center (CSC) gewonnen werden. Allen Berechnungen lag das SRES A1B Szenario zu Grunde, alle gekoppelten Modellläufe wurden ohne Bias-Korrekturen gerechnet. Für die Atmosphäre wurden zudem Vergleiche der gekoppelten und ungekoppelten Simulationen durchgeführt, um den Mehrwert der Kopplung zu analysieren.

Ergänzt wurden diese Arbeiten durch eine Literaturrecherche zum Thema Meeresspiegelanstieg und durch Untersuchungen zu Änderungen des Sturmflutpotentials an der deutschen Nordseeküste.

Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse ist in Form von Bandbreitengraphiken und Tabellen für eine ausgewählte Anzahl von atmosphärischen und ozeanischen Parametern im Bericht dargestellt. Für die Ermittlung der Bandbreiten in der nahen (2021 - 2050) und fernen (2070 - 2099) Zukunft wurden die Ergebnisse über das gesamte Gebiet der Nordsee gemittelt und jeweils für saisonale und jährliche Änderungen dargestellt.

Änderungen der Lufttemperatur bleiben im Rahmen der Bandbreiten, die durch die ENSEMBLES Läufe aufgestellt wurden, d.h. 0.8 bis 1.9 K Temperaturerhöhung gegenüber dem Referenzzeitraum (1961 – 1990) für die nahe und 1.4 bis 3.7 K für die ferne Zukunft.

Die mittleren Änderungen der Windgeschwindigkeiten liegen zwischen -0.06 und $+0.15$ m/s (nahe Zukunft) und ± 0.26 m/s (ferne Zukunft) und sind damit deutlich geringer als die starken zwischenjährlichen Schwankungen der Windgeschwindigkeiten. Ein signifikanter Trend ist nicht zu erkennen, wobei die Wintermonate ungefähr die doppelte Bandbreite erwarten lassen.

Für die Niederschläge ergeben sich im Jahresmittel Erhöhungen von 0.8 bis 8.3 % (nahe Zukunft) bzw. -1.3 bis 15.4 % (ferne Zukunft). Die Sommermonate weisen die geringsten Zunahmen auf und lassen in der fernen Zukunft teils sogar deutliche Abnahmen erkennen.

Im Fall der Wolkenbedeckung erhöhen die gekoppelten Modellsimulationen die Bandbreite in der nahen und fernen Zukunft nach höheren Werten hin, insbesondere im Frühjahr und Sommer (max. 11 % mehr Bedeckung in der fernen Zukunft). Passend dazu steigen die Werte der langwelligen Nettostrahlung an (Wärmeabstrahlung; knapp 15 W/m² im Sommer), während die kurzwellige Nettostrahlung abnimmt (Sonneneinstrahlung; etwa -20 W/m²). Im Mittel ändert sich die Wolkenbedeckung kaum. Allerdings wird die kurzwellige Nettostrahlung eher abnehmen, und die langwellige zunehmen.

Die Oberflächentemperatur der Nordsee zeigt in allen drei gekoppelten Modellen Erwärmungssignale von 0.6 bis 1.4 K in der nahen und 1.8 bis 2.6 K in der fernen Zukunft, wobei die räumlichen Strukturen im Detail unterschiedlich sind. Eine Erklärung hierfür erfordert weitere Untersuchungen.

Im Salzgehalt lassen zwei der Modelle eine moderate Abnahme in der nahen und fernen Zukunft erwarten, ein Modell zeigt dagegen in der nahen Zukunft im Norden sogar leichte Zunahmen und in der fernen Zukunft nur schwache Abnahmen. Die Abnahme des Salzgehaltes lässt sich durch steigende Süßwassereinträge, verstärkte Niederschläge über See und Änderungen im einströmenden Atlantikwasser erklären. Die Zunahme der Oberflächentemperatur stimmt weitestgehend mit dem atmosphärischen Antrieb überein. Die Änderungen im Salzgehalt sind aber von starken multidekadischen Änderungen überlagert und das Signal zu Rauschverhältnis in den Zeitreihen ist niedrig. Alle Modelle zeigen die größten Änderungssignale im Einflussbereich des Ostseeausstroms.

Der temperaturbedingte (sterische) und der dynamische Anteil des Meeresspiegelanstiegs in der Nordsee werden in naher Zukunft nur wenige Zentimeter betragen, in der fernen Zukunft 24 bis 28 cm. Der hier analysierte sterische Meeresspiegelanstieg berücksichtigt allerdings noch nicht die Eisverluste Grönlands und der Antarktis, welche bisher nicht zuverlässig abgeschätzt werden können.

Alle Modelle zeigen zudem gute Übereinstimmung der simulierten zwischenjährlichen Variabilität des Meeresspiegels an virtuellen Pegelzeitreihen mit Beobachtungen. Der atmosphärisch induzierte Anstieg (Windschub) des Meeresspiegels ist

gering und wird für das stärkste Emissionsszenario A2 auf maximal 5 bis 6 cm abgeschätzt.

Die simulierten Windfelder als primärer Antrieb für Strömungen, Seegang und Wasserstand wurden sowohl im zeitlichen Verlauf als auch räumlich analysiert. Für den Seegang und den Wasserstand sind hierbei vor allem die hohen Perzentile von Interesse. Wegen der hohen zeitlichen Variabilität war für die Analysen der Windrichtungsänderungen eine hohe zeitliche Auflösung notwendig (mindestens 3-stündlich), was die Anzahl der zur Verfügung stehenden Modellläufe deutlich einschränkte. Dies gilt ebenfalls für die auf den Windfeldern aufbauenden Untersuchungen zur Änderungen im Sturmflutpotential unter dem A1B Szenario (Kooperation mit der Freien Universität Berlin, FUB) und den Wellenfeldern (Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum-Geesthacht, HZG).

Durch die Analyse von Zeitreihen anstatt von Zeitscheiben konnte gezeigt werden, dass die Windgeschwindigkeiten und -richtungen starken dekadischen Schwankungen unterliegen, was in der Abschätzung möglicher Änderungen mit betrachtet werden muss. Untersucht man die zeitliche Änderung von jährlichen Windrichtungshäufigkeiten für alle Windgeschwindigkeiten, lässt sich ein Anstieg der Häufigkeit von westlichen Windrichtungen bis 2100 erkennen, der aber zeitlich nicht monoton verläuft. So muss für den jeweiligen Modelllauf die größte Änderung im Vergleich zum Referenzzeitraum (1961 – 1990) nicht am Ende des 21. Jahrhunderts liegen. Für Windrichtungen, die mit höheren Windgeschwindigkeiten verknüpft sind, ergeben sich für die Mehrheit der Modelle keine statistisch signifikanten Änderungen.

Für die Sturmflutuntersuchungen wurde ein Algorithmus entwickelt, der Stürme in den Klimamodellläufen detektieren kann, die aufgrund ihrer Windrichtung und -Stärke zu Sturmfluten in Cuxhaven führen können. Dafür wurden drei Modellläufe des globalen Klimamodells ECHAM5 für den Zeitraum 1900 – 2100 unter den Annahmen des Szenarios A1B analysiert. In den drei untersuchten Zeitreihen der jährlichen Anzahl von sturmflutrelevanten Ereignissen sind die zeitlichen Schwankungen deutlich größer als die linearen Trends. Nur ein Modelllauf von dreien zeigte signifikante, aber geringe Erhöhungen der sturmflutrelevanten Ereignisse zwischen 1900 und 2100. Die verwendeten Methoden lassen sich auf andere Küstenabschnitte übertragen.

In einer Kooperation mit dem HZG wurden potentielle Änderungen im Seegang analysiert. Dazu wurde das Wellenmodell WAM4.3 mit zwei regionalen atmosphärischen Klimamodellläufen unter den Annahmen des A1B Szenarios angetrieben und damit der der Seegang in der Nordsee für den Zeitraum 1961 – 2100 bestimmt. Vergleiche der Periode 2071-2100 mit dem Referenzzeitraum 1961 – 1990 ergaben Zunahmen der mittleren und extremen signifikanten Wellenhöhen in der östlichen Nordsee von 8 bis 10 % und leichte Zunahmen (2 %) bzw. Abnahmen (-10 %) im Westen.

Zudem wurde speziell für KLIWAS ein statistisches Wellenmodell entwickelt, das, basierend auf Luftdruckdaten, künftige Änderungen in der Wellenhöhe bestimmen kann. Dies ermöglicht in Zukunft eine schnelle und kostengünstige Abschätzung der Bandbreiten aus atmosphärischen Antriebsdaten. Die Analyse von 6 Globalmodellen mit 30 Realisierungen zeigt für 20 der 30 Realisierungen einen Anstieg der Wellenhöhe zum Ende des Jahrhunderts. Dieser Anstieg ist allerdings nur für 2 der 6 Globalmodelle signifikant.

2 Ziele

Meer und Atmosphäre stehen als Hauptkomponenten des Klimasystems in einer starken Wechselbeziehung. Der Klimawandel bewirkt nicht nur Änderungen der mittleren Zustandsverhältnisse von Atmosphäre und Meer, sondern beeinflusst auch deren Dynamik und Schwankungsbreiten. Dies kann beispielsweise zu Änderungen der atmosphärischen und ozeanischen Zirkulationsmuster führen. Ferner werden Änderungen bzgl. der Intensität und Häufigkeit von atmosphärischen und ozeanographischen Extremereignissen erwartet.

Ziel dieses Projektes ist es, künftige Veränderungen atmosphärischer und ozeanographischer Verhältnisse zuverlässig abzuschätzen und - soweit möglich - zu quantifizieren. Dabei baut es auf den Ergebnissen des Projekts 1.03 „Referenzdatensätze und Klimaprojektionen für Küste und See“ sowie auch auf qualifizierten Studien externer Forschungsgruppen auf. Für die zu erwartenden Änderungen des Meeresspiegels wurde zudem bei Projektbeginn eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, und für die verschiedenen zum Meeresspiegelanstieg beitragenden Prozesse eine Übersicht der veröffentlichten Werte erstellt.

Die Ergebnisse des Projekts sollen in eine Bewertung der zu erwartenden Änderungen bzgl. ihres Umfangs und ihrer statistischen Belastbarkeit münden. Die Bestimmung der Bandbreite möglicher Änderungen soll durch die Verwendung unterschiedlicher Modellketten erfolgen. Für alle KLIWAS Gruppen war das A1B Szenario verbindlich vorgeschrieben. Der Untersuchungsbereich umfasst hauptsächlich die Nordsee. Für einige Parameter wurden allerdings auch der Nordost-Atlantik und die in die Auswertungen einbezogen.

Für den Nutzer der Nordsee sind im Bericht zum Projekt 3.01 „Klimabedingte Auswirkungen auf Küsten, Schifffahrt und Meeresnutzung“ die in Projekt 2.01 erarbeiteten schifffahrtsrelevanten Ergebnisse, verbunden mit Erläuterungen zum Ausmaß der Betroffenheit der wirtschaftlichen Nutzung und der Ökologie der Nordsee zusammengefasst dargestellt.

3 Gekoppelte regionale Klimaprojektionen für die Nordsee

Stand der Forschung

Im 5. IPCC Report (IPCC 5TH ASSESSMENT REPORT, 2013) wird den Klimamodellen Weiterentwicklung und Fortschritt seit dem letzten Assessment AR4 attestiert. Für die globalen Temperaturverteilungen besteht mittlerweile ein sehr hohes Maß an Übereinstimmung mit Beobachtungen, obwohl lokal immer noch Abweichungen in der Größenordnung etlicher Kelvin [K] existieren. Regional nimmt jedoch die Übereinstimmung mit Beobachtungen ab. Die Bandbreite innerhalb des Modellensembles (CMIP5) liegt immer noch bei 3K. Auch die Simulation der großskaligen Niederschlagsfelder hat sich seit dem AR4 Report verbessert, bei der Simulation der Wolkenbedeckung sieht man hingegen weiterhin große Herausforderungen. Die Abweichungen in den Wolkenbedeckungen können regional in den Strahlungsbudgets immer noch zu Fehlern von mehreren 10 W/m^2 führen.

Räumlich und zeitlich hochaufgelöste regionale Modellergebnisse, wie hier in KLIWAS verwendet, sind notwendig, um Klimainformationen auf kleineren Skalen abzuleiten. Dies kann entweder mit hochauflösenden AOGCMS (Atmosphere-Ocean Global Climate Models), globalen Modellen mit variabler Auflösung, wie auch durch dynamisches Downscaling von räumlich gröber aufgelösten Projektionen erreicht werden. Der 5. Sachstandsbericht des IPCC attestiert diesen Methoden mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Mehrwert für die Küstenbereiche und Gebiete mit stark variabler Bodentopographie. Allerdings war die Anzahl publizierter Ergebnisse mit koordinierten und systematischen Untersuchungen begrenzt und erschwerte detailliertere Aussagen für den Assessment Report. Gekoppelte regionale Modelle wie in der Arbeit von DÖSCHER ET AL. (2010) zeigen z.B. in polaren Gebieten verbesserte Simulation der ozean-atmosphärischen Wechselwirkung in Bezug auf Eisausdehnung und Eisdicke. Der zusätzliche Mehrwert von regionalen Modellen in Bezug auf die Globalmodelle wurde für die Windfelder in Küstengebieten in den Arbeiten von WINTERFELDT UND WEISSE (2009) und WINTERFELDT ET AL. (2011) gezeigt. Verbesserungen in den regionalen Klimamodellen gab es auch für die Simulation atlantischer Hurrikans (BENDER ET AL., 2010) und für das Sturmrisiko in Europa (DONAT ET AL., 2011).

Die Wahl der Modelldomäne und der Randbedingungen haben für die Performance der regionalen Modelle große Bedeutung. Eine große Ausdehnung des Regionalmodells bietet den Vorteil, dass sich die Modelle frei von den Randbedingungen entwickeln und kleinskaligere Strukturen entwickeln können (KOLTZOW ET AL., 2008),

haben aber auch das Risiko, dass sich die Regionalmodelllösung vom Globalmodell entkoppelt (ROCKEL ET AL., 2008). Zusätzlich erzeugen große Ausdehnungen des Regionalmodells große interne Variabilität, die die Trends der zwischenjährlichen und saisonalen Mittel stark verändern kann.

Klimabedingte Änderungen der Hydrographie wurden auch in Beobachtungen diagnostiziert und der aktuelle Sachstand ist ebenfalls im letzten Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 5TH ASSESSMENT REPORT, 2013) zu finden. Für die globale Temperaturerwärmung wird dort ein kontinuierlicher Anstieg für die letzten drei Dekaden genannt und eine mittlere Erwärmung von 0.89 K für das Mittel über Ozean und Land in der Periode 1901 - 2012. Die Erwärmung des Ozeans dominiert das Energiebudget der Erde und 93% der zusätzlichen Energie im Budget für den Zeitraum 1971-2010 sind in den oberen 700 m des Ozeans zu finden. Die stärkste Erwärmung im Weltozean ist für diesen Zeitraum an der Oberfläche zu finden (0.11K pro Dekade) und nimmt auf 0.015 K pro Dekade in 700 m ab (LEVITUS ET AL., 2009). Regionale Veränderungen für die Nordsee sind einem Zustandsbericht für die Nordsee dokumentiert (LÖWE ET AL., 2013). Die Oberflächentemperaturen in der Nordsee sind danach in den letzten 40 Jahren um nahezu 1K gestiegen. Für den Bereich der Nordsee und des Europäischen Schelfs liefert der ICES Report (DYE ET AL., 2012) aktuelle Zeitreihen an ausgewählten Stationen, die neben langfristigen Trends auch klare Anzeichen für multidekadische Variabilität liefern. In den Einstrompfaden atlantischen Wassers in die Nordsee (Rockall Graben, Fair Isle Kanal) zeigen die Temperaturen in den letzten Dekaden kontinuierlich positive Anomalien zum langjährigen Mittel auf, die aber seit 2009 rückgängig sind. Zusammen mit der ebenfalls beobachteten Abnahme der Salzgehalte wird dies als Ausweitung des subpolaren Wirbels in den Ostatlantik gewertet.

Für den Oberflächensalzgehalt besteht laut Sachstandsbericht (IPCC 5TH ASSESSMENT REPORT, 2013) große Übereinstimmung darin, dass der räumliche Kontrast in den Salzgehalten zugenommen hat, d.h. salzreiche Wassermassen in den mittleren Breiten sind salzreicher geworden und salzarme Wassermassen in den Tropen und hohen Breiten salzärmer (BOYER ET AL., 2007; WANG ET AL., 2010). Allerdings sind die entsprechenden Süßwasserflüsse immer noch mit so hohen Unsicherheiten behaftet, dass die Ableitung regionaler und globaler Trends als nicht belastbar eingestuft wird. Zeitreihen in den Einstrompfaden des atlantischen Wassers (DYE ET AL., 2012) zeigen den im IPCC Bericht angesprochene Salzgehaltsanstieg subtropischer Wassermassen z.B. anhand der Zeitreihen im Rockall Graben und entlang Schelfkante der Nordsee. Speziell für den Ausstrom von Ostseewasser in die Nordsee wird ein starkes multi-dekadisches Signal mit Zeitskalen von 30 Jahren sichtbar.

Methoden

Die Modellergebnisse werden vorrangig für die Nordsee ausgewertet, vereinzelt sind auch Analysen für die Ostsee ausgeführt worden. Bei den Analysen geht es um die Ableitung von Klimaänderungssignalen in Ozean und Atmosphäre, wie z.B. Ände-

rungen der Luft- und Wassertemperatur, des Luftdrucks, des Niederschlags sowie der Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen. Die Änderungssignale werden dabei zum einen als Differenzen in den für KLIWAS vereinbarten Zeitscheiben „nahe Zukunft (2021-2050)“ und „ferne Zukunft (2070-2099)“ im Vergleich zum Referenzzeitraum (1970 – 1999) als Horizontalverteilungen, zum anderen als Zeitreihen von räumlich gemittelten Größen dargestellt. In die Analysen wurden auch Änderungen des Jahresganges mit einbezogen. Für die Bewertung der Kopplung wurden weiterhin intensive Vergleiche zwischen gekoppelten und ungekoppelten Simulationen durchgeführt, unterstützt von weitergehenden Untersuchungen zum Prozessverständnis.

Durchgeführte Arbeiten

Da die räumliche Auflösung der vorhandenen globalen Klimasimulationen für Untersuchungen im Bereich der Nordsee nicht ausreichen und regionale Simulationen aus dem ENSEMBLES-Projekt (VAN DEN LINDEN UND MITCHELL, 2009) nur die atmosphärischen Parameter betreffen, wurden eigens für KLIWAS regional gekoppelte Ozean Atmosphärensimulationen für das SRES Szenario A1B gerechnet. Dazu wurden mit drei Modellierungsgruppen Kooperationsverträge geschlossen, die zum Ziel haben, gekoppelte regionale Klimaprojektionen für den Bereich der Nordsee zu liefern (Tab. 1):

- Kopplung des Ozeanmodells NEMO mit dem Atmosphärenmodell RCA über Nord- und Ostsee (Schwedisches Meteorologisches und Hydrologisches Institut SMHI, Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Markus Meier).
- Kopplung des globalen MPI-Ozeanmodells (MPI-OM) mit dem Atmosphärenmodell REMO RCA über Nord- und Ostsee und Nordost-Atlantik (Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, Arbeitsgruppe von Dr. Uwe Mikolajewicz).
- Kopplung des Nordseemodells HAMSOM mit dem Atmosphärenmodell REMO (Universität Hamburg, Arbeitsgruppe von Dr. Thomas Pohlmann in Zusammenarbeit mit dem Climate Service Center, Arbeitsgruppe Daniela Jacob).

Die Modellläufe wurden anhand der ebenfalls vereinbarten Hindcast -Simulationen validiert (siehe auch Projekt 1.03, BÜLOW ET AL., 2014) und die Klimaänderungssignale der Szenarienrechnungen wurden mit saisonaler Auflösung ermittelt. In der zweiten Hälfte 2013 lagen nach etlichen Optimierungsschritten erstmals die gekoppelten A1B Läufe aller drei Modelle vor und sind mit hoher Priorität analysiert worden. Ein ausführlicher Vergleich der drei Modellstudien ist in einem separaten Bericht (BÜLOW ET AL., 2014a) zu finden.

Die atmosphärischen Ergebnisse der gekoppelten regionalen Ozean-Atmosphäre-Modelle (Tabelle 1) wurden mit 14 Simulationen von verschiedenen regionalen Klimamodellen aus dem ENSEMBLES Projekt (HEWITT UND GRIGGS, 2004) verglichen. Dies erlaubt eine robustere Ableitung der Bandbreiten, da das Modellensemble

in diesem Projekt unterschiedliche globale Klimamodelle als Antrieb nutzte. Allen hier ausgewerteten Simulationen liegt das SRES Szenario A1B zu Grunde. Die verwendeten Daten aus dem Projekt ENSEMBLES können von der ENSEMBLES Homepage heruntergeladen werden¹.

Entwicklung gekoppelter regionaler Modelle und Analyse der Klimawandelszenarien für die Nordseeregion

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten gekoppelten Modelle

Ozeanmodell- Atmosphärenmodell	Kooperationspartner	Modellantrieb	Referenz
MPIOM-REMO	U. Mikolajewicz, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg	REMO (Atmosphäre): ECHAM5, run3 MPIOM ist ein globales Ozeanmodell mit hoher horizontaler Auflösung in der Nordsee	Mikojaewicz et al. (2005)
HAMSOM-REMO	T. Pohlmann, IfM, Hamburg	REMO (Atmosphäre): ECHAM5, run3 HAMSOM (Ozean): MPIOM	Su et al. (2014)
NEMO-RCA4	H.E.M. Meier, SMHI, Norrköping, Schweden	RCA4 (Atmosphäre): ECHAM5 run3 NEMO (Ozean): MPIOM	Dieterich et al. (2013)

¹ <http://ensembles-eu.org>

4 Atmosphärische regionale Klimaprojektionen

Stand der Forschung

In den meisten Arbeiten zu zukünftigen atmosphärischen Klimaänderungen stand bislang die Nordsee nicht im Fokus der Untersuchungen. Aus einigen Arbeiten, die entweder Ergebnisse für Nordeuropa oder globale Ergebnisse präsentieren, kann man jedoch Rückschlüsse für die Nordsee ableiten. Auch hier sind die Ergebnisse der grundlegenden Arbeiten im letzten Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 5TH ASSESSMENT REPORT, 2013) dargestellt.

In Globalmodell-Ergebnissen, die mit dem Szenario A1B gerechnet wurden (CHRISTENSEN ET AL. 2007), steigt das Jahresmittel der Lufttemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zwischen 2.5 K über der Nordsee und 3.5 K über Nordwest Europa an. Dabei werden die Erwärmungen im Osten der Nordsee stärker sein als im Westen und über der gesamten Nordsee geringer als über den umliegenden Landflächen. Im Winter ist die Erwärmung stärker als im Sommer, aber der West-Ost Gradient der Erwärmung bleibt erhalten. Die robuste Erwärmung und ihr räumliches Muster werden auch von den neueren Globalmodellergebnissen aus dem CMIP5 –Vergleich bestätigt, siehe KNUTTI AND SEDLÁČEK (2012).

Ein Vergleich der projizierten Änderungen des mittleren Niederschlags über der Nordsee von verschiedenen Globalmodellen ergibt zu Ende des 21. Jahrhunderts einen Anstieg im Winter und eine Abnahme im Sommer (siehe CHRISTENSEN ET AL. 2007). Dabei sind die Ergebnisse für den Winter in dem Sinne robust, dass die Mehrheit der Modelle einen Anstieg prognostiziert. Im Sommer hingegen gibt es sowohl Ergebnisse mit zu- als auch mit abnehmenden Niederschlägen. Die im ENSEMBLES-Projekt mit regionalen Klimamodellen bestimmten Niederschlagsänderungen bestätigen die unterschiedlichen Niederschlagstrends für Sommer und Winter (VAN DER LINDEN AND MITCHELL 2009). In den Regionalmodellen werden jedoch für den Sommer ein Anstieg des Niederschlags im nördlichen und ein Abfall im südlichen Teil der Nordsee bestimmt. KJELLSTRÖM ET AL (2011) untersuchten ebenfalls die Niederschlagsänderungen über Europa. In dieser Analyse wurde das atmosphärische Klimamodell RCA3 von Randbedingungen aus unterschiedlichen Globalmodellen angetrieben. Die Ergebnisse zeigen, dass die Grenze zwischen projiziertem zu- und abnehmendem Niederschlag stark zwischen den einzelnen Modellsimulationen schwankt und dass bei den meisten Simulationen die Änderungen über der Nordsee statistisch nicht signifikant sind.

5 Windklima

Über eine mögliche zukünftige Zunahme der Windgeschwindigkeiten im Bereich der Nordsee berichten mehrere Autoren (z.B. DONAT ET AL., 2011; DEBENARD AND ROED, 2008 und LECKEBUSCH ET AL., 2008). Die möglichen Änderungen der Windgeschwindigkeiten über der Nordsee erscheinen aber nicht robust, da sie sich mit verschiedenen regionalen Klimamodellen zum Teil stark unterscheiden (NIKULIN ET AL. 2010).

Die neueste Untersuchung von Globalmodellergebnissen aus dem CMPI5 Projekt zeigte, dass extreme Windgeschwindigkeiten über der Nordsee im Zeitraum 2051 – 2100 höchstens um 1 m/s zunehmen im Vergleich zum Referenzzeitraum 1951 – 2000 (DE WINTER ET AL, 2013). Da zudem die Änderungen, die mit einem Globalmodell für verschiedenen Szenarien bestimmt werden, geringer sind als die Unterschiede zwischen den Ergebnissen verschiedener Globalmodelle, schließen auch diese Autoren, dass sich die Windgeschwindigkeiten über der Nordsee nicht ändern werden.

Die Häufigkeiten von Windrichtungen schwanken in den Modellrechnungen für den Zeitraum 1961 – 2100 unter den B1 und A1B-Szenarien stark von Jahr zu Jahr und vergleichsweise schwächer über mehrere Dekaden (GASLIKOVA ET AL., 2012; PRYOR ET AL., 2012). In mehreren Modellergebnissen für unterschiedliche Szenarien wurden eine mögliche zukünftige Zunahme der Häufigkeit westlicher Windrichtungen und eine Abnahme der östlichen Windrichtungen gefunden (GASLIKOVA ET AL., 2012 und DE WINTER ET AL., 2013).

Methoden

Zur Untersuchung des Windklimas wurden Ergebnisse mehrerer Modellketten aus globalen und regionalen Klimamodellen für den Zeitraum 1961 – 2100 analysiert. Um regionale Unterschiede darzustellen, erfolgte die statistische Auswertung der Winddaten für sechs Gebiete der Nordsee.

Für die Auswertungen der Windgeschwindigkeit wurden Tagesmittel verwendet. Zuerst wurden für den Zeitraum 1961 – 2100 jahresweise kumulierte Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über der Meeresoberfläche von verschiedenen regionalen Klimamodellläufen in den einzelnen Gebieten berechnet und hinsichtlich ihrer Häufigkeitsverteilung ausgewertet. Anschließend wurden Zeitreihen ausgewählter Perzentile der jährlichen Häufigkeitsverteilungen für den Zeitraum von 1961 - 2099 gebildet und ihr zeitliches Verhalten untersucht. Mit Hilfe des Mann-Kendalls-Tests wurde geprüft, ob diese Zeitreihen einen signifikant von Null verschiedenen Trend aufweisen.

Bei der Untersuchung der Windrichtungen konnten nur Daten von den Modellketten mit mindestens 3-stündiger Auflösung verwendet werden. Jeweils für ein Jahr wurden für alle Gitterpunkte über See in einem Gebiet kumulierte Häufigkeitsverteilungen für acht Windrichtungsklassen bestimmt, wobei die Windrichtungsklassen jeweils einen Winkel von 45° umfassen und um die acht Hauptwindrichtungen $0^\circ, 45^\circ, \dots, 315^\circ$ zentriert sind. Aus diesen jährlichen Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Windrichtungsklassen wurden Zeitreihen für die Jahre von 1961- 2099 gebildet. Analog zu den Untersuchungen der Windgeschwindigkeiten wurde auch hier das zeitliche Verhalten der Häufigkeitszeitreihen analysiert.

Durchgeführte Arbeiten

Zur Analyse des Windklimas (Windgeschwindigkeit und Windrichtung) der Vergangenheit und seiner möglichen künftigen Änderungen wurden Ergebnisse von den in Tabelle 2 genannten Modellketten aus globalen und regionalen Klimamodellen für den Zeitraum 1961 – 2100 unter den Annahmen des A1B Szenarios ausgewertet.

Für die Windgeschwindigkeit wurden insgesamt acht Modellläufe aus dem ENSEMBLES-Projekt und den Kooperationen mit den oben beschriebenen Methoden untersucht und Zeitreihen für ausgewählte Perzentile analysiert.

Die Untersuchungen der zukünftigen Änderungen der Windrichtungen musste mit zeitlich höher aufgelösten Daten durchgeführt werden, da innerhalb eines Tages der Wind in seiner Richtung stark drehen kann. Somit kann ein Tagesmittel der Windrichtung stark von den stündlichen Werten im Laufe des Tages abweichen. Da es bei der Erzeugung von Sturmfluten aber stark auf die Windrichtung während des Tidehochwassers ankommt, kann mit Tagesmitteln der Windrichtungen keine Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich der Veränderungen von Sturmfluten vorgenommen werden. Zu diesem Zweck müssen die Daten in mindestens 3-stündiger Auflösung vorliegen. Mit der Verwendung von zeitlich höher aufgelösten Daten reduzierte sich der zur Verfügung stehende Datensatz und es wurden die Daten von den sechs verbleibenden Modellketten untersucht. Für diese Datensätze wurden jährliche Häufigkeiten in acht Windrichtungsklassen für den Zeitraum 1961 – 2100 berechnet und das Zeitverhalten jeder einzelnen Windrichtungsklasse analysiert. Ein Fachartikel über alle Untersuchungen zu Windgeschwindigkeiten und -richtungen ist in Vorbereitung.

Tabelle 2: Analyisierte atmosphärische Regionalmodelle.

Entwicklung gekoppelter regionaler Modelle und Analyse der Klimawandelszenarien für die Nordseeregion

Regionales Klima-Modell	Institution	Antreibendes GCM	Name	Referenzen
REMO - MPI-OM gekoppelt	Max-Planck Institut für Meteorologie (MPI)	ECHAM5 run 3	MPI-OM/ECHAM5_3/REMO	MIKOJALEWICZ ET AL. (2005)
RCA4 - NEMO gekoppelt	Schwedisches Meteorologisches und Hydrologisches Institut (SMHI)	ECHAM5 run 3	NEMO/ECHAM5_3/RCA4	DIETERICH ET AL. (2013)
CLM	MPI	ECHAM5 run1	ECHAM5_1/CLM	KEULER ET AL. (2009)
RACMO	Königlich Niederländisches Meteorologisches Institut (KNMI)	ECHAM5 run 3	ECHAM5_3/RACMO	MEIJGAARD ET AL (2008) VAN DEN LINDEN AND MITCHELL (2009)
HIRHAM5	Dänisches Meteorologisches Institut (DMI)	ECHAM5 run 3	ECHAM5_3/HIRHAM5	CHRISTENSEN ET AL. (1996) VAN DEN LINDEN AND MITCHELL (2009)
HIRHAM5	DMI	BCM	BCM/HIRHAM5	VAN DEN LINDEN AND MITCHELL (2009)
CLM	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)	HadCM3Q0	HadCM3Q0/CLM	JAEGER ET AL. (2008) VAN DEN LINDEN AND MITCHELL (2009)
REMO	MPI	IPSLCM4	IPSLCM4/REMO	JACOB AND PODZUN (1997)

6 Sturmfluten

Stand der Forschung

Einige Untersuchungen zu möglichen zukünftigen Änderungen der Anzahl von Sturmtiefs im Nordatlantik und über Europa zeigen, dass sich zwar die Intensitäten der Sturmtiefs erhöhen, aber die Häufigkeiten der Sturmtiefs nicht ansteigen (PINTO ET AL., 2007; ULBRICH ET AL., 2008), während in einer neueren Studie gezeigt wird, dass, im Gegensatz, Starkwindereignisse häufiger werden, die Stärke dieser Ereignisse dabei aber nicht über diejenigen im Referenzklima hinausgeht (GROLL ET AL., 2013). Globalmodellergenerierte Ergebnisse aus dem CMIP5 Projekt wurden von ZAPPA ET AL. (2013, 2013A) analysiert. Die Autoren fanden im Winter einen leichten Anstieg sowohl der Intensität als auch der Häufigkeit von Zyklonen über der Nordsee für den Zeitraum (2070 – 2099) im Vergleich zu (1976 – 2005). Dabei waren die Änderungssignale für RCP8.5 stärker als für RCP4.5, wobei aber bei beiden RCPs die Änderungssignale kleiner waren als die interne Variabilität.

Studien von STERL ET AL. (2009) über extreme Scheitelwasserhöhen von Sturmfluten an der holländischen Küste deuten nicht auf zukünftige Änderungen hin. Die Arbeiten von DEBERNARD UND ROED (2008) für die östliche Nordsee und von WOTH (2005), WOTH ET AL. (2006) und GASLIKOVA ET AL. (2012) für die Deutsche Bucht ergeben, dass sich die Sturmflutscheitel in Zukunft um bis zu 25 cm erhöhen können. Dabei wird in der Arbeit von GASLIKOVA ET AL. (2012) jedoch auch gezeigt, dass der gezeigte leichte Anstieg der Scheitelwasserhöhen von dekadischen Schwankungen überlagert wird und dass die Unsicherheiten der Änderungen zum Teil durch die natürliche Variabilität verursacht sind.

Methoden

In einer Kooperation mit der FU Berlin wurde die Änderung des Sturmflutpotentials an der deutschen Nordseeküste unter den veränderten klimatischen Bedingungen des A1B Szenarios untersucht. Da Stürme, die in der Nordsee Sturmfluten auslösen, auf dem Nordatlantik entstehen, müssen diese in den großräumigen Windfeldern aus einem Globalmodell detektiert werden. Die Windfelder der Globalmodelle müssen aber mit höherer zeitlicher Auflösung als Tagesmittel vorliegen, da die Sturmflut auslösenden Tiefdruckgebiete teilweise innerhalb weniger Stunden über die Nordsee ziehen. Daten in dieser hohen zeitlichen Auflösung waren nur bei den Windfeldern des Globalmodells ECHAM5 verfügbar. Anhand dieser Daten wurden nur die Veränderung der Häufigkeiten von den Stürmen in der Nordsee betrachtet, die aufgrund ihrer Windrichtung und -stärke Sturmfluten verursachen können. Die Wechselwirkung der Stürme mit dem Wasserstand konnte nicht berücksichtigt werden.

Zur Untersuchung der historischen Sturmfluten wurden aus den Windfeldern der ERA-40 und ERA-Interim Reanalysen mit einem sogenannten „Tracking-Algorithmus“ jene Stürme auf See detektiert, die vom Nordatlantik in die Nordsee ziehen (LECKEBUSCH ET AL. 2008A; NEU ET AL., 2012). Dabei wurde mit Hilfe der Beobachtungsdaten aus dem Sturmfluten-Atlas von GÖNNERT UND BUSS (2009) geprüft, ob alle in Cuxhaven beobachteten Sturmfluten mit dieser Methode identifiziert werden können. Aus den Vergleichen wurden Kriterien für die effektive Windgeschwindigkeit abgeleitet, ab der Stürme potentiell zu Sturmfluten führen können.

Anschließend wurden in drei Läufen des globalen Klimamodells ECHAM5 alle Stürme zwischen 1900 und 2100 detektiert und das zeitliche Verhalten analysiert. Wegen der kurzen Projektlaufzeiten mussten die Untersuchungen auf das Gebiet der Deutschen Bucht und auf Stürme, die auf Grund ihrer Windrichtung in Cuxhaven Sturmfluten verursachen, beschränkt werden. Die in diesem Projekt entwickelten Methoden lassen sich jedoch auf andere Küstenabschnitte übertragen.

Durchgeführte Arbeiten

Zur Untersuchung der Sturmfluten wurden aus den Windfeldern der ERA-40 und ERA-Interim Reanalysen Stürme auf See detektiert, die vom Nordatlantik in die Nordsee ziehen und aus dem Vergleich mit Beobachtungsdaten zu Sturmfluten Kriterien abgeleitet, welche Stürme potentiell zu Sturmfluten führen können.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurden in drei Läufen des Globalmodells ECHAM5 Stürme für den Zeitraum 1900 – 2100 detektiert und auf Grundlage der sogenannten effektiven Windgeschwindigkeit klassifiziert. Die effektive Windgeschwindigkeit ist der Betrag der auf die Windrichtung von 295° projizierten Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe. Diese ist nach den Erfahrungen aus der operationellen Wasserstandsvorhersage des BSH proportional zum Windstau in Cuxhaven.

Aus der Zahl der sturmflutrelevanten Stürme aus den Windfeldern jedes ECHAM5-Laufs für den Zeitraum 1900 – 2100 wurde je eine Zeitreihe gebildet, der lineare Trend der Zeitreihen bestimmt und die Signifikanz der Steigungen mit dem Student T-Test ermittelt. Zusätzlich wurde aus den drei Läufen ein Ensemble-Mittel bestimmt.

7 Meeresspiegel

Stand der Forschung

Der Stand der Forschung bezüglich der beobachteten Meeresspiegeländerungen in der Nordsee ist im Abschlussbericht zu Projekt 1.03 dargestellt (siehe BÜLOW ET AL., 2014). Für den Fortschritt in der Modellierung und im Prozessverständnis findet man die aktuellste Zusammenstellung im Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 5TH ASSESSMENT REPORT, 2013). Die wichtigsten Erkenntnisse seien hier kurz zusammengestellt: Nach den neuesten Erkenntnissen aus der Klimamodellierung ist es sehr wahrscheinlich, dass der Meeresspiegelanstieg im 21. Jahrhundert die beobachtete Rate für den Zeitraum 1971-2010 (2.0 mm/Jahr) für alle RCP Szenarien überschreitet. Zum Ende des 21. Jahrhunderts liegen die Projektionen der CMIP5 Modelle (YIN, 2012) in dem Bereich von 0.26 bis 0.55 m für das RCP2.6, bei 0.32-0.63 m für das RCP4.5, bei 0.33 bis 0.63 m für das RCP6.0 und bei 0.45 bis 0.82 m für das RCP8.5 (5-95% Wahrscheinlichkeit). Nur wenn der Kollaps der marinen Sektoren des Antarktischen Eisschildes eingeleitet würde, würde der globale Meeresspiegel im 21. Jahrhundert substantiell über die hier angegebenen Bandbreiten ansteigen.

Für den Meeresspiegelanstieg bedeutsam ist die Einschätzung, dass seit dem 4. IPCC Sachstandsbericht die Gletscher weltweit kontinuierlich weiter geschmolzen sind und sich nicht in Balance mit den jetzigen Klimabedingungen befinden, so dass ein weiteres Schrumpfen auch ohne weitere Temperaturerhöhungen stattfinden wird. Es ist sehr wahrscheinlich, dass der Grönländische Eisschild seinen Masseverlust seit 1992 beschleunigt hat. Für die Antarktis wird für die letzten zwei Dekaden ein Eisverlust bestätigt, der im Wesentlichen entlang der Antarktischen Halbinsel und im Amundsen Sektor auftrat.

Auf Zeitskalen von mehreren 100 Jahren bis zu 1000 Jahren werden Feedbacks zwischen dem regionalen Klima und dem Eisschild bedeutend und erfordern Simulationen mit gekoppelten Klima-Eisschild Modellen. Der 5. Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 5TH ASSESSMENT REPORT, 2013) attestiert den Eisschildmodellen substantielle Fortschritte, vor allen in Bezug auf den grönländischen Eisschild (SHEPARD ET AL., 2012; YOSHIMORI AND ABE-OCHI, 2012). Diese Modelle simulieren konsistent eine zunehmend negative Massenbilanz für den grönländischen Eisschild unter allen RCP Szenarien, die im Wesentlichen auf einer abnehmenden Surface Mass Balance (SMB) beruht (MIKOLAJEWICZ ET AL., 2007; VINCAINO ET AL., 2010; RIDLEY ET AL., 2010; GOELZER ET AL., 2013). Die verfügbaren Modellstudien deuten zudem an, dass es bei anhaltender Erwärmung einen Schwellenwert der Erwärmung gibt, bei dem ein Totalverlust des grönländischen Eisschildes einsetzt und der dann einen globalen Meeresspiegelanstieg in der Größenordnung von 7 m erzeugen würde. Dieser Schwel-

lenwert für den Totalverlust liegt bei Temperaturänderungen zwischen +2 und +4 K. Ob der Eisschildverlust irreversibel ist, hängt nach den Modellierungen von der zeitlichen Länge der Überschreitung und der Amplitude der Schwellenwertüberschreitung ab.

Regionale Meeresspiegelspiegeländerungen können substantiell vom globalen Mittel abweichen und zeigen komplizierte räumliche Strukturen, die auf natürlichen und anthropogenen Klimamoden beruhen und Faktoren wie Umverteilung von Wassermassen, Reaktionen des Ozeans auf Wind und Luftdruckänderungen und vieles mehr enthalten können. Basierend auf den CMIP5 Simulationen haben SLANGEN ET AL. (2012) und PARDAENS ET AL. (2011) Regionalisierungen des Meeresspiegelbudgets durchgeführt unter Berücksichtigung der Fehler in allen Komponenten des Budgets einschließlich der glazialen Ausgleichsbewegungen.

Im Rahmen des kürzlich in Hamburg veranstalteten Workshops zu ‚High-end Szenarios of Regional Sea level Rise‘ wurde Unsicherheiten in den Modellen zur Berechnung der postglazialen Ausgleichsbewegung der Landmassen (GIA Modelle, siehe z.B. PELTIER, 2004) diskutiert und es wurden speziell für den südlichen Teil der Nordsee in der Deutschen Bucht große Unsicherheiten in den Raten der Landbewegung deutlich. Diese Unsicherheiten müssen in weiteren Sensitivitätsuntersuchungen bearbeitet werden.

Methoden

Basierend auf den Daten der gekoppelten regionalen Klimamodelle wurden Auswertungen der Veränderung des Meeresspiegels durchgeführt. Hierfür wurden die Ergebnisse der drei gekoppelten regionalen Modellketten für Nord- und Ostsee verwendet. Die von den Modellen gelieferten sterischen/dynamischen Änderungen des Meeresspiegels wurden sowohl flächenhaft als auch an ausgewählten Pegelstandorten ausgewertet.

Für das vollständige Budget der Meeresspiegeländerungen müssen Komponenten wie Landhebung bzw. Landsenkung, thermische Expansion und Masseänderung im Ozean aus abschmelzenden Inlandsgletschern und den Eisschilden in Grönland und der Antarktis separat ermittelt und addiert werden. Für die Effekte der Landhebung bzw. Landsenkung stehen sogenannte GIA Modelle zur Verfügung (Global Isostatic Adjustment), die allerdings im Bereich der Nordsee große Unsicherheiten zeigen. Die Regionalisierung der Anteile aus den schmelzenden Gletschern und den großen Eisschilden (Grönland und Antarktis) kann mit der auch im 5. IPCC Bericht verwendeten sogenannten ‚Fingerprint‘ Methode erfolgen. Die von SLANGEN ET AL. (2012) entwickelte Methode liefert räumliche Muster der zusätzlichen Masseanteile, die dann mit den jeweiligen prognostizierten Abschmelzmengen in lokale Meeresspiegeländerungen umgerechnet werden können. Da die entsprechenden ‚Fingerprint‘ Muster erst demnächst zur Verfügung gestellt werden, muss die weitere Auswertung später erfolgen.

Durchgeführte Arbeiten

In der zweiten Hälfte 2013 lagen für alle drei gekoppelten Modelle Simulationen für das A1B Szenario vor und konnten im Vergleich analysiert werden. Anhand von Horizontalkarten des Meeresspiegels wurden die räumlichen Strukturen der Änderungssignale in den Zeitscheiben 1970 - 1999, 2021 - 2050 und 2070 - 2099 mit saisonaler Auflösung analysiert. Zusätzlich wurden aus den Modelldaten Zeitreihen in der Nähe ausgewählter Pegelstationen gebildet. Diese wurden auf die darin enthaltenen jährlichen und zwischenjährlichen Schwankungen untersucht. Diese Untersuchungen dienen der Überprüfung der Modelle hinsichtlich der natürlichen, atmosphärisch induzierten Schwankungen. Aus Beobachtungen ist deutlich, dass der Meeresspiegel in der Deutschen Bucht wie z.B. am Pegel Cuxhaven von zwischenjährlichen Zeitskalen dominiert wird, die aus atmosphärisch induzierten Schwankungen (NAO Variabilität) resultieren.

Mit Hilfe eines empirischen Regressionsmodells wurde daher der atmosphärische Einfluss auf den Meeresspiegelanstieg in den Klimasimulationen der Globalmodellläufe untersucht (DANGENDORF ET AL., 2013).

Für ein komplettes Meeresspiegelbudget sind noch Regionalisierungen der Beiträge aus dem Abschmelzen der Inlandsgletscher sowie der großen Eisschilde (Grönland, Antarktis) notwendig. Die dazu notwendigen räumlichen Strukturfelder („Fingerprints“) sind im Rahmen des 5. IPCC Berichts von SLANGEN ET AL. (2012) entwickelt worden, stehen der Allgemeinheit erst demnächst zur Verfügung. Für die flächenhafte Korrektur der Landhebungs- und Landsenkungseffekte sind zudem Abschätzungen der postglazialen Entwicklung (GIA) im Nordseeraum notwendig. Dazu wurden von der Webseite des PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level) die frei verfügbaren Ergebnisse des GIA-Modells von Peltier (ICE-5G) heruntergeladen. Diese sind in die Zeitreihenanalyse an den virtuellen Pegelstationen eingeflossen.

8 Seegang

Stand der Forschung

Es gibt inzwischen einige Studien, die den Einfluss des Klimawandels auf das Seegangsklima in der Nordsee untersuchen. Dabei wurden in der Vergangenheit häufig nur Zeitperioden miteinander verglichen, während bei den neueren Studien aufgrund der schnelleren Rechentechnik schon durchgehende Simulationen über die gesamte untersuchte Zeitdauer möglich sind.

Die WASA-GRUPPE (1998) nutzte den statistischen Zusammenhang zwischen den monatlichen Anomalien des Luftdrucks und beobachteten Perzentilen der Seegangshöhe an zwei Stationen, um daraus auf das Seegangsklima in der gesamten Nordsee zu schließen. Dieses Regressionsmodell wurde anschließend auf Luftdruckdaten aus einem Klimalauf mit doppelter atmosphärischer CO₂ Konzentration angewendet. Dabei ergab sich eine Erhöhung der Wellenhöhe um 10 bis 20 cm.

DEBERNARD ET AL. (2002) analysierten zwei 20-jährige Zeitperioden (als Referenz 1980 - 2000 und 2030 - 2050 als zukünftiges Klima) für das IPCC-Szenario IS1992a. Dabei ergaben sich nur kleine und nicht signifikante Änderungen der Wellenhöhe.

DEBERNARD UND ROED (2008) untersuchten vier Klimasimulationen, bestehend aus einer Kombination von drei globalen Klimamodellen und den drei IPCC-Szenarien A1, B2 und A1B. Sie verglichen dabei das Referenzklima 1961 - 1990 mit 2071 - 2100. Sie erhielten räumlich uneinheitliche Ergebnisse, allerdings zeigten alle Simulationen für hohe Wellen (das 99. Perzentil) eine Zunahme von 6 bis 8 % entlang der östlichen Nordseeküste und im Skagerrak.

GRABEMANN UND WEISSE (2008) untersuchten ebenfalls ein Ensemble von vier Klimaprojektionen für die Perioden 1961 - 1990 und 2071 - 2100. In diesen Untersuchungen wurde eine Kombination von zwei Globalmodellen mit den beiden IPCC-Szenarien A2 und B2 gewählt. Die Autoren erhielten für hohe Wellen (99. Perzentil) eine Zunahme der Wellenhöhe um 5 bis 8 % in weiten Teilen der südlichen und östlichen Nordsee. Dies entspricht einem Anstieg von 25 bis 35 cm Wellenhöhe, gemittelt über alle Projektionen. Die größten Änderungen der Wellenhöhe (bis zu 80 cm) traten im Skagerrak auf. Die Änderungen des 99. Perzentils in der nördlichen und westlichen Nordsee waren kleiner oder negativ. Wie auch bei DEBERNARD UND ROED (2008) waren die Unsicherheiten aufgrund der Modellwahl größer als diejenigen, die aufgrund des gewählten Szenarios auftraten.

DE WINTER ET AL. (2012) analysierten ein Ensemble aus 17 verschiedenen Startbedingungen von einem Globalmodell unter dem Szenario A1B, ebenfalls für 1961 - 1990 und 2071 - 2100. Für die niederländische Nordseeküste blieben dabei die mittlere

re Wellenhöhe, Wellenperiode und die Wiederkehrperioden unverändert, während die jährliche maximale Wellenhöhe kleiner wurde. Gleichzeitig änderte sich die Wellenrichtung für die jährliche maximale Welle zu mehr westlichen Richtungen.

GROLL ET AL. (2013) untersuchten ein Ensemble aus vier Simulationen mit einem Globalmodell, zwei verschiedenen Startbedingungen und zwei IPCC-Szenarien (A1B und B1). Auch sie erhielten in der östlichen Nordsee eine Zunahme (um bis zu 10%) und in der westlichen Nordsee eine Abnahme der mittleren und hohen Wellen. Dabei kann die Zunahme des 99. Perzentils der signifikanten Wellenhöhe in der östlichen Nordsee auf häufigere Starkwindereignisse, nicht aber auf stärkere Stürme zurückgeführt werden. Gleichzeitig häufen sich in Zukunft bei Starkwindereignissen westliche Richtungen, was ebenfalls zu einer Zunahme des 99. Perzentils in der östlichen Nordsee führt. GROLL ET AL. (2013) gehen auch auf die starke interne dekadische Variabilität ein, die dazu führt, dass die größten Änderungen nicht immer erst zum Ende des 21. Jahrhunderts auftreten.

Methoden

In einer KLIWAS-Kooperation mit der HZG wurden mit dem Wellenmodell WAM4.3 zwei neue Projektionen für den Seegang unter dem IPCC-Szenario A1B berechnet. Dazu wurden regionale Windfelder aus zwei Regionalmodellen (REMO und DMI-HIRHAM) mit Randbedingung des Globalmodells ECHAM5/MPI-OM/Lauf 3 genutzt. Das Modell WAM4.3 berechnete Höhe, Richtung und Periode der Wellen für den Zeitraum 1961 - 2100. Zusätzlich lieferte es für ausgewählte Stationen Seegangsspektren, mit denen beispielsweise Ursachen für die Änderungen der Wellenhöhe untersucht werden können. Es wurde die 30-Jahresperiode 1961 - 1990 als Referenzperiode verwendet, während die Perioden 2011 - 2040, 2041 - 2070 und 2071 - 2100 für die nahe, mittlere und ferne Zukunft stehen.

Zusätzlich wurde die Auswirkung eines erhöhten Meeresspiegels auf die Wellenhöhe, -richtung und -periode untersucht. Dazu wurde WAM4.3 mit Starkwinden aus den Richtungen N, NW, W, SW, S und O angetrieben, die mindestens 72 Stunden andauern. Diese Dauer ist nötig, um einen stationären Seegang zu erreichen, bei dem mögliche Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs am größten sind. Die Parameter Wellenhöhe, -richtung und -periode wurden für das gesamte Gebiet der Nordsee bestimmt, einmal für den heutigen Meeresspiegel (Referenz) und das zweite Mal für einen um 1 m erhöhten Wasserstand.

Um Spannbreiten möglicher Änderungen zu erfassen, eignet sich der Ansatz der dynamischen Szenarien nur bedingt, da diese Methode aufgrund des hohen Bedarfs an Computerressourcen sehr teuer ist. Daher hat das HZG für KLIWAS ein statistisches Modell entwickelt, mit dem man nur aus Projektionen des atmosphärischen Luftdrucks die zukünftige Entwicklung der Wellenhöhe bestimmen kann. Luftdruck ist in den Modellen die robustere Größe im Vergleich zu Windgeschwindigkeiten und vermeidet modellspezifische Eigenheiten. Das Regressionsverfahren lässt sich dann auf

eine Vielzahl der zukünftig zur Verfügung stehenden Projektionsdaten anwenden (z.B. ECLISE oder CORDEX).

Das Regressionsmodell wurde analog zu dem in WASA (1998) vorgestellten Ansatz zwischen den Zeitreihen der Luftdruckanomalien (jährliche oder saisonale Mittel) und den Zeitreihen der signifikanten Wellenhöhe (SWH) als Seegangparameter (jährliche oder saisonale Mittel oder Perzentile) erstellt. In einem ersten Schritt wurden zunächst Anomalien der jeweiligen Zeitreihen berechnet (d.h. die langjährigen Mittel wurden subtrahiert) und eine Datenreduktion mit Hilfe einer EOF Analyse durchgeführt, um physikalische unwichtige Korrelationen zu vermeiden (siehe z.B. VON STORCH UND ZWIERS, 1998). Die so reduzierten Daten bildeten anschließend die Grundlage einer Redundanzanalyse, die eine Technik darstellt, Muster zu identifizieren, die stark durch ein Regressionsmodell verbunden sind. Die so erhaltenen Redundanzbeziehungen lieferten anschließend die Grundlage, um aufgrund atmosphärischer Szenarienrechnungen Aussagen über mögliche zukünftige Änderungen des Seegangsklimas in der Nordsee abzuleiten.

Durchgeführte Arbeiten

Mit dem Wellenmodell WAM4.3 wurden durch die HZG zwei neue Projektionen für den Seegang unter dem IPCC-Szenario A1B berechnet und bezüglich der mittleren und hohen signifikanten Seegangshöhe (SWH) ausgewertet. Dabei war vor allem ein Vergleich der zukünftigen 30-jährigen Zeitperioden mit der Referenzperiode 1961-1990 wichtig, um Änderungen darstellen zu können.

Außerdem wurden anwenderbezogene Untersuchungen durchgeführt, wie z.B. Wetterfenster- und Extremwertanalysen. Die Ergebnisse werden in einem eigenen Abschlussbericht dargestellt (GROLL ET AL., 2014).

Das oben beschriebene empirische Modell für die Berechnung der Seegangshöhe aus atmosphärischen Luftdruckdaten wurde erstellt und angewendet auf ein Ensemble aus insgesamt 30 Modellsimulationen (6 Globalmodelle mit jeweils mehreren Realisierungen, siehe Tabelle 3).

Die Auswirkung des prognostizierten Meeresspiegelanstiegs auf den Seegang in der Nordsee wurde detailliert untersucht anhand von jeweils 72 stündigen Simulationen des Wellenmodells WAM4.3 mit Starkwinden aus den Richtungen N, NW, W, SW, S und O.

Tabelle 3: Modellrechnungen des CMIP3 Archivs, für die statistisches Downscaling durchgeführt wurde.

Modell	20C3M (Kontrollperiode)	SRES A1B	Realisationen
NCAR PCM (USA)	Run 1, 2, 3, 4	Run 1, 2, 3, 4	4
NCAR CCSM3 (USA)	Run 1, 2, 3, 6, 7, 9, 5	Run 1, 2, 3, 6, 7, 9, 5	7
MPI ECHAM5 (Deutschland)	Run 1, 2, 3, 4	Run 1, 2, 3, 4	4
CGCM3.1 (Kanada)	Run 1, 2, 3, 4, 5	Run 1, 2, 3, 4, 5	5
MRI CGCM2.3.2 (Japan)	Run 1, 2, 3, 4, 5	Run 1, 2, 3, 4, 5	5
GISS ER (USA)	Run 1, 2, 3, 4, 5	Run 1, 2, 3, 4, 5	5

9 Vernetzung des Projekts, Kooperationspartner

Entwicklung gekoppelter regionaler Modelle und Analyse der Klimawandelszenarien für die Nordseeregion

Das Projekt 2.01 arbeitete eng mit den anderen KLIWAS-Projekten im Forschungsverbund zusammen. So wurden innerhalb des Projektzeitraums Arbeitstreffen mit den Mitarbeitern der BAW im Projekt 2.04 und 3.02, der BfG im Projekt 2.03 sowie dem DWD in Offenbach im Projekt 1.01 und 1.02 durchgeführt, um einen kontinuierlichen Daten- und Informationsaustausch zu ermöglichen. Im Zusammenhang mit den Arbeiten zu Änderungen in den mikrobiologisch-hygienischen Wasserqualität (Projekt 3.04) wurden ein Klimaindex der monatlichen Überschreitung von Wassertemperaturen größer als 18 K aus den Modellen berechnet und bereitgestellt.

Des Weiteren fanden am SMHI ein gemeinsamer Workshop aller Kooperationspartner zum Thema „Gekoppelte Ozean-Atmosphärenmodelle“ (Mai 2013) sowie am BSH mehrere Modellertreffen statt, an denen nicht nur die Kooperationspartner (Uni Hamburg, IFM Hamburg und SMHI aus Schweden) und anderer Universitäten, sondern auch die Kollegen des DWD in Offenbach, der BAW (Projekte 2.04 und 3.02) und BfG (Projekte 2.02, 2.03, 3.03, 3.04, 3.06, 3.07, 3.08 und 3.09) teilnahmen. Im Rahmen dieser Treffen wurden Ergebnisse und Erfahrungen ausgetauscht, und es ergaben sich intensive Diskussionen.

Eine Liste der Kooperationspartner findet sich in Tabelle 4. In regelmäßigen Treffen mit den Kooperationspartnern zu den Sturmfluten (FU Berlin), den atmosphärisch induzierten Meeresspiegeländerungen (Uni Siegen) und Seegangsszenarien sowie den Klimaprojektionen (MPI, IFM, SMHI und CSC) wurde über den aktuellen Stand der Arbeiten berichtet und diskutiert.

Tabelle 4: Projekt 2.01 – Kooperationen und Aufträge

Kooperationspartner / Auftragnehmer	Kurztitel	Ansprechpartner
Meteorologisches Institut, FU Berlin	Potentielle Auswirkungen des Klimawandels auf das Sturmflutrisiko an der deutschen Nordseeküste	U. Ulbrich, D. Befort
SMHI Schweden	Gekoppeltes Ozean-Atmosphären-Modell – Klimaprojektionen	M. Meier, C. Dieterich
MPI Hamburg	Gekoppeltes Ozean-Atmosphären-Modell – Klimaprojektionen	U. Mikolajewicz
IFM Hamburg	Gekoppeltes Ozean-Atmosphären-Modell – Klimaprojektionen	T. Pohlmann
HZG Geesthacht	Berechnung von Seegangsszenarien für die Nordsee	R. Weisse
CSC Hamburg	Kopplung der Ozean und Atmosphären Modelle	D. Jacob
Uni Siegen	Potentielle Auswirkungen atmosphärisch induzierter Meeresspiegelschwankungen	J. Jensen

10 Ergebnisse

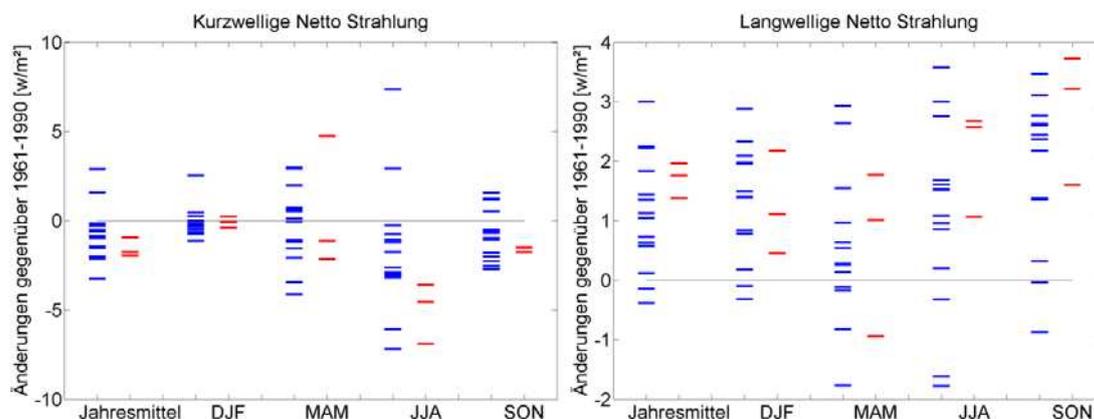
10.1 Erreichte methodische wissenschaftliche Fortschritte

10.1.1 Gekoppelte regionale Klimaprojektionen für die Nordsee

Ein wichtiges Ergebnis der drei Kooperationen für gekoppelte regionale Projektionen ist die Tatsache, dass die regionale Kopplung überhaupt technisch machbar ist und die in KLIWAS durchgeführten Versuche auch in Langzeitsimulationen mit Kopplung über die Wärmeflüsse stabil laufen. Bei keinem Lauf musste eine Bias-Korrektur durchgeführt werden. Die koordinierten Modellläufe liefern erste Projektionen mit regionalen gekoppelten Modellen für die Nordsee. In den Abbildungen 1a und 1b sind die Ergebnisse der KLIWAS Simulationen für die Atmosphäre zusammen mit den ungekoppelten ENSEMBLES Modellläufen als Änderungssignale für die nahe und ferne Zukunft dargestellt.

Der Vergleich der Simulationen der ozeanischen Regionalmodelle (HAMSOM, NEMO) mit dem globalen Modell mit variabler horizontaler Auflösung (MPIOM) erlaubt eine Analyse der Bedeutung der Randbedingung bzw. des Einflusses von zeitlichen Veränderungen des in die Nordsee einströmenden Wasser aus dem Atlantik. Eine ausführliche Diskussion aller Ergebnisse findet man in BÜLOW ET AL. (2014A).

Ein konsistenter Vergleich der bereitgestellten Projektionen ist durch die vereinheitlichte Darstellung und Ableitung gemeinsamer Diagnosegrößen gewährleistet worden. Die inhärente dekadische Variabilität macht es notwendig, die Zeitscheibenvergleiche kritisch zu werten und zwingend Zeitreihen integraler Größen mit in die Analysen einzubeziehen.



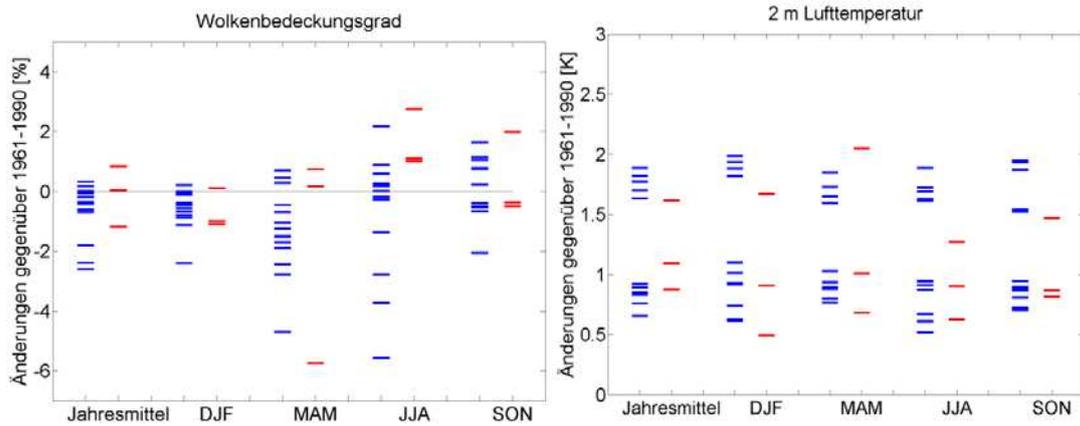


Abbildung 1a: Bandbreiten der Änderungssignale für die *nahe Zukunft* der ENSEMBLES Atmosphärenmodellläufe (blau) sowie der drei gekoppelten Modelle (rot) für die 2 m Lufttemperatur in [K], Wolkenbedeckung in [%], sowie die kurz- und langwellige Nettostrahlung in [W/m²] für das Nordseegebiet. Dargestellt sind Jahresmittel sowie saisonale Mittel.

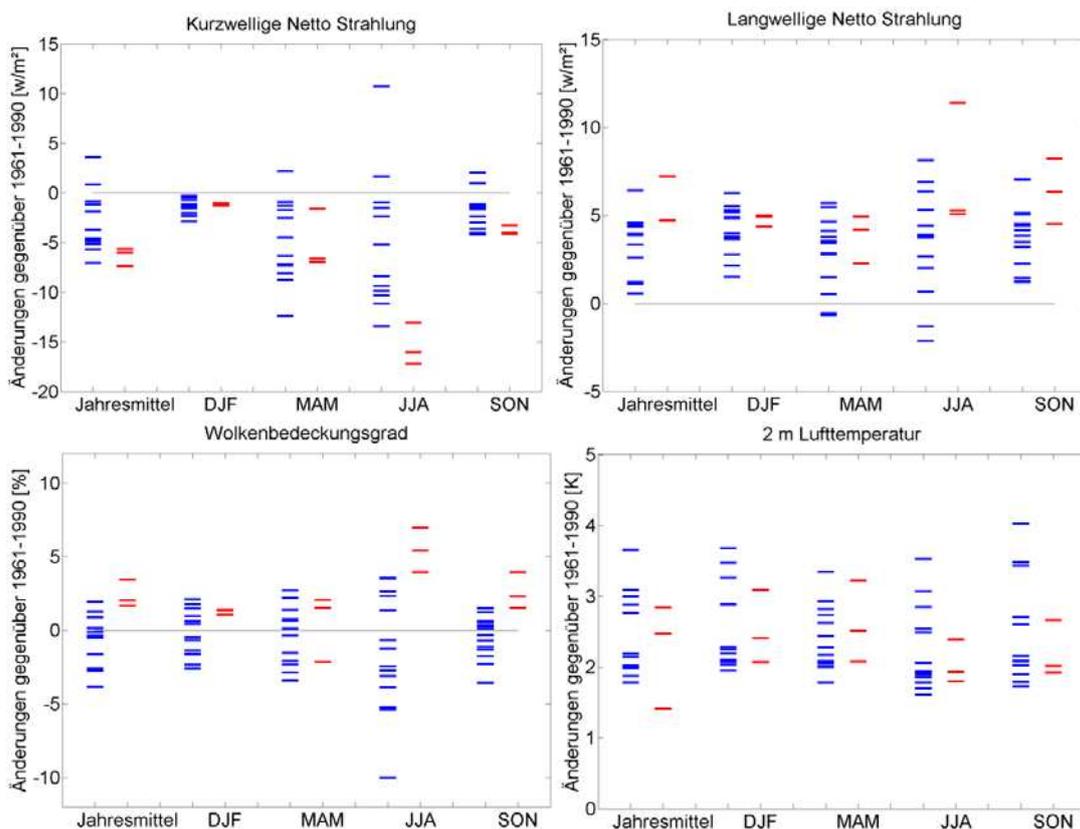


Abbildung 1b: Bandbreiten der Änderungssignale für die *ferne Zukunft* der ENSEMBLES Atmosphärenmodellläufe (blau) sowie der drei gekoppelten Modelle (rot) für die 2 m Lufttemperatur in [K], Wolkenbedeckung in [%], sowie die kurz- und langwellige Nettostrahlung in [W/m²] für das Nordseegebiet. Dargestellt sind Jahresmittel sowie saisonale Mittel.

10.1.2 Salzgehalt und Wassertemperatur

In Abbildung 2 sind die Ergebnisse der KLIWAS Simulationen für den Ozean für die Parameter Oberflächensalzgehalt und Oberflächentemperatur als Änderungssignale für die nahe und ferne Zukunft dargestellt, wie sie sich aus der gekoppelten Modellierung ergeben.

Die Salzgehaltsänderungen in der nahen Zukunft sind uneinheitlich und liegen im Jahresmittel zwischen -0,7 bis +0,04 psu. In der fernen Zukunft sinkt der Salzgehalt um maximal bis zu 0,26 psu. Grund für Salzgehaltsänderungen sind steigende Süßwassereinträge durch verstärkte Niederschläge über See und Land sowie Salzgehaltsänderungen im einströmenden Atlantikwasser. Allerdings wird der zeitliche Verlauf des Salzgehalts auch bei diesem Parameter im Wesentlichen von der dekadischen Variabilität und nicht durch kontinuierliche Abnahme beeinflusst.

Das Jahresmittel der Oberflächentemperatur der Nordsee kann in der nahen Zukunft zwischen 0,6 bis 1,4 K ansteigen. In der fernen Zukunft verstärkt sich der Anstieg auf nahezu um das Doppelte, auf 1,8 bis 2,5 K.

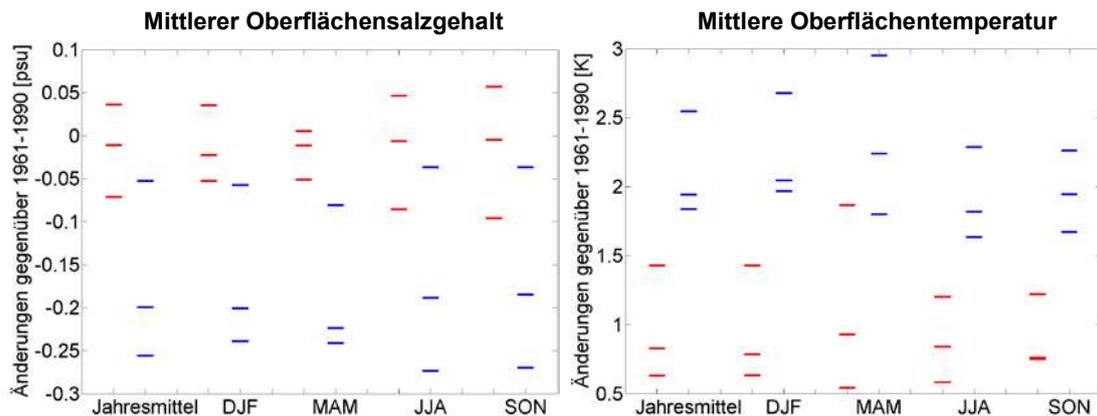
Die Temperaturanstiege werden in der kalten Jahreshälfte stärker sein als in der warmen. Sowohl in der nahen wie auch der fernen Zukunft steigen die Temperaturen in Winter und Frühling stärker an als in Sommer und Herbst.

10.1.3 Ozeanische Dynamik

Mit dem gekoppelten Klimamodell REMO-MPIOM wurde versucht, Hinweise auf die zu erwartenden Veränderungen auf dem Nordost-Atlantik zu erhalten, da diese einen großen Einfluss auf die Veränderungen in der Nordsee haben.

Im Nordost-Atlantik nimmt die Mächtigkeit der durchmischten Deckschicht deutlich ab. Durch die verstärkte Erwärmung erfährt die Schichtung eine größere Stabilität, welche die tiefe Durchmischung der Deckschicht zeitlich einschränkt.

Der Einstrom von Atlantikwasser in die Nordsee durch den Englischen Kanal kann deutlich abnehmen und die Zirkulation in der südlichen Nordsee kann schwächer werden. Dieses hätte Auswirkungen auf den trophischen Zustand der Nordsee, da hier weniger Nährstoffe aus dem Atlantik eingetragen würden. Eine abgeschwächte Zirkulation kann Auswirkungen auf den Transport von Fischlarven haben.



Entwicklung gekoppelter regionaler Modelle und Analyse der Klimawandelszenarien für die Nordseeregion

Abbildung 2: Bandbreiten der drei *gekoppelten Klimamodellergebnisse* für Änderungen des mittleren Salzgehalts an der Oberfläche in [psu] (links) und der mittleren Wassertemperatur an der Oberfläche in [K] (rechts) für das Nordseegebiet. Dargestellt sind Jahresmittel sowie saisonale Mittel für die **nahe Zukunft (rot)** und **ferne Zukunft (blau)**.

10.1.4 Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen

Die Analyse der kontinuierlichen Zeitreihen zeigt, dass in den einzelnen Simulationen die Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeiten starken zwischenjährlichen und dekadischen Schwankungen unterliegen und die Änderungen in den Perzentilen sehr unterschiedlich sein können. Die dekadischen Schwankungen werden besonders deutlich, wenn man gleitende 30-jährige Mittelwerte der Perzentilzeitreihen bestimmt (Abb. 3). Dabei entspricht jeder einzelne Mittelwert ungefähr dem Wert, den man aus einer 30-jährigen Zeitscheibe bestimmt. Auch die Häufigkeiten der Windrichtungen unterliegen zwischenjährlichen und dekadischen Schwankungen (Abb. 4). Die beiden letztgenannten Abbildungen verdeutlichen die Gefahr, dass ungünstig gewählte Zeitscheiben zu falschen Schlussfolgerungen für Anpassungsoptionen führen können. Deshalb wurden in KLIWAS nur langfristige Änderungen der Perzentil - Zeitreihen der Windgeschwindigkeit als auch der Häufigkeiten von Windrichtungen für den gesamten Zeitraum von 1961 – 2099 mit dem Mann-Kendall Test bestimmt. Detailliertere Ergebnisse zu den Windänderungen werden in einer separaten Publikation präsentiert (GANSKE UND ROSENHAGEN, IN VORB.).

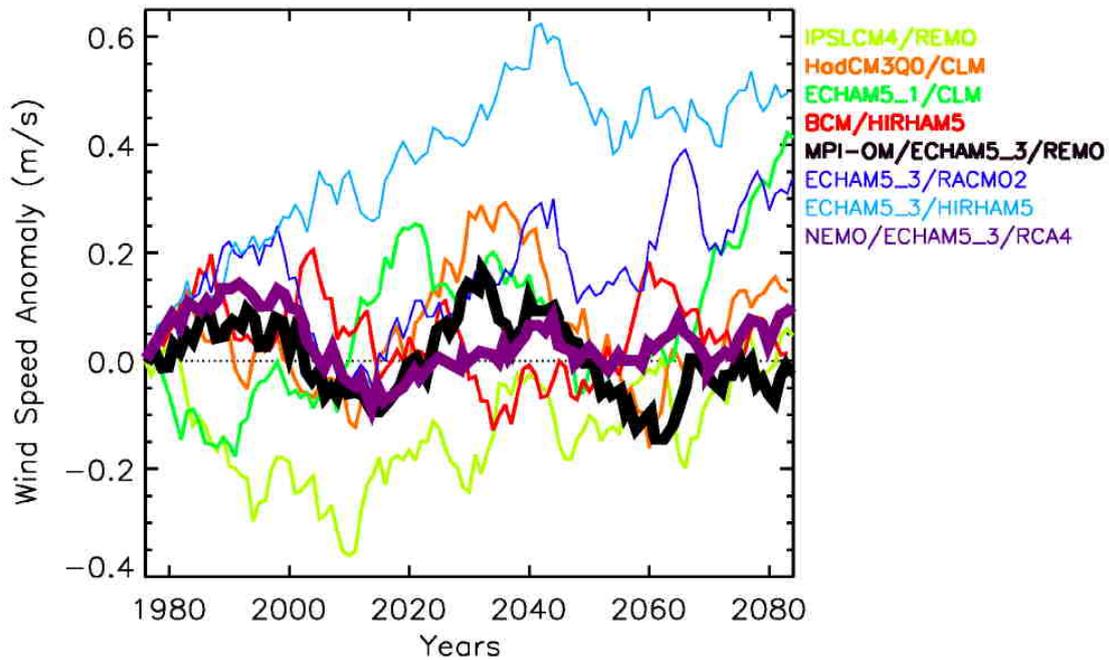


Abbildung 3: Anomalien der 30-jährigen gleitenden Mittelwerte des 99. Perzentiles der jährlichen Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit aus acht RCM für die Deutsche Bucht. Die Anomalien wurden berechnet als Differenz der Werte zum Mittelwert für den Zeitraum 1961-1990. Die Zeitreihen der beiden gekoppelten Modellierungen sind fett gezeichnet.

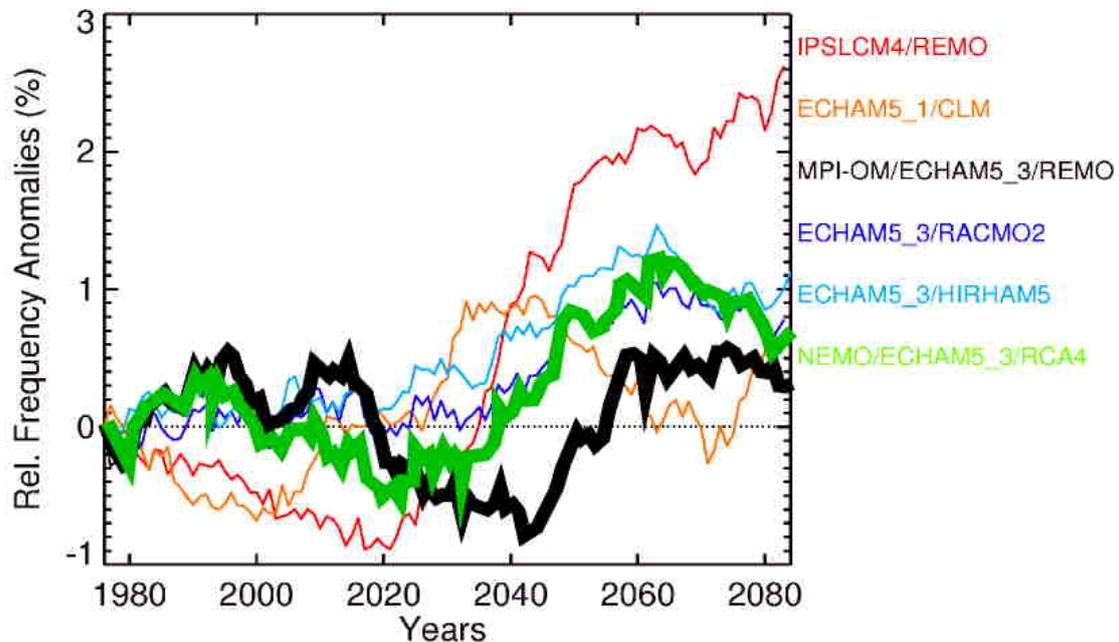


Abbildung 4: Anomalien der 30-jährigen gleitenden Mittelwerte der jährlichen Häufigkeiten der Windrichtungsklasse Nordwest, berechnet mit sechs RCM für die Deutsche Bucht. Die Anomalien werden dargestellt als Differenz der Werte zum Mittelwert für den Zeitraum 1961-1990. Die gekoppelten Zeitreihen sind fett dargestellt.

10.1.5 Sturmfluten in der Deutschen Bucht

Mit einem verbesserten Algorithmus zum Detektieren der Stürme gelang es, eine höhere Anzahl von historischen Sturmfluten in den Reanalyse-Daten zu identifizieren. So wurden für den Zeitraum 1957 – 2002 in den ERA-40 Daten 80 von 82 Stürmen, die Sturmfluten verursachten, wiedergefunden.

Die Ergebnisse von drei Läufen über den Zeitraum 1900 – 2000 (20C; ROECKNER ET AL., 2003; MARSLAND ET AL., 2003) und mit ECHAM5 Modellläufen für das Szenario A1B über den Zeitraum 2000 – 2100 wurden sturmflutrelevante Ereignisse identifiziert. Es zeigt sich, dass die Häufigkeiten von Jahr zu Jahr stark schwanken (Abbildung 5). In den drei untersuchten Zeitreihen der jährlichen Anzahl von sturmflutrelevanten Ereignissen sind die zeitlichen Schwankungen deutlich größer als die linearen Trends. Nur ein Modelllauf von dreien zeigte signifikante, aber geringe Erhöhungen der sturmflutrelevanten Ereignisse zwischen 1900 und 2100. Die verwendeten Methoden lassen sich auf andere Küstenabschnitte übertragen. Die Ergebnisse der Sturmflutuntersuchungen werden in einer separaten Publikation ausführlich dargestellt (BEFORT ET AL., in Vorb.).

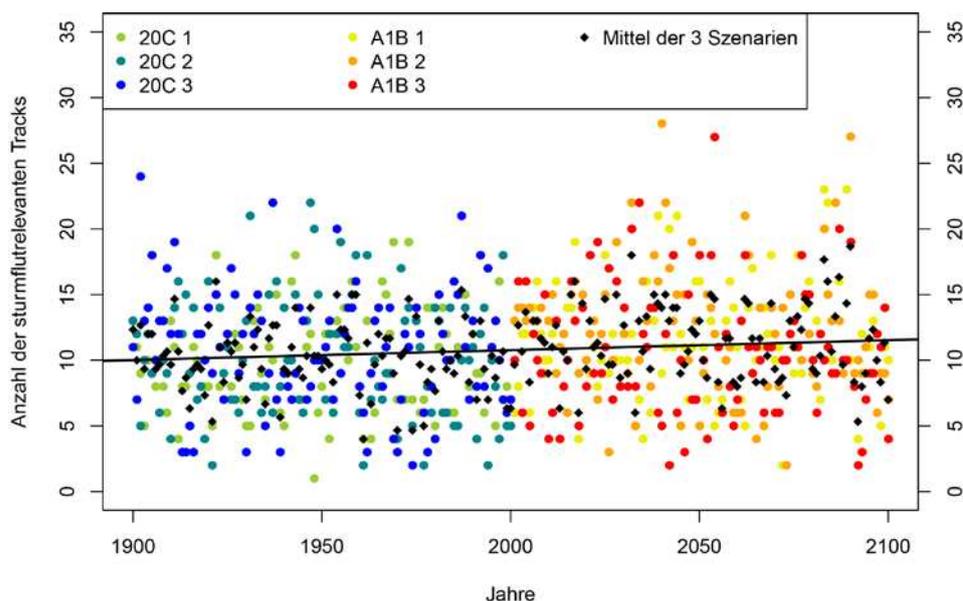


Abbildung 5: Anzahl der sturmflutrelevanten Ereignisse pro Jahr von 1900 bis 2100 für die drei Realisierungen von 20C (grün bis blau) und von A1B (gelb bis rot). Die schwarzen Vierecke geben das Ensemble-Mittel von 20C und A1B an. Die schwarze Linie markiert den statistisch signifikanten linearen Trend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

10.1.6 Meeresspiegel

Die sterischen und dynamischen Anteile am Meeresspiegelanstieg betragen in der nahen Zukunft nur wenige Zentimeter, in der fernen Zukunft 24 bis 28 cm (Abb.6). Sie sind in allen drei Modellen sehr einheitlich simuliert, da die Randbedingungen der beiden regionalen Modelle aus dem Globalmodell stammt und interne Änderungen in

der Nordsee gering sind. Die abgeleiteten Meeresspiegeländerungen haben im Bereich der Nordsee die gleiche Größenordnung wie die möglichen Beiträge aus den Massenänderungen im Ozean (Gletscher, Eisschilde) und Beiträge aus vertikalen Landbewegungen.

Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass es einen leichten Anstieg der atmosphärisch induzierten Meeresspiegelkomponente zum Ende des 21. Jahrhunderts gibt, der schwach ausfällt und maximal 5 bis 6 cm für das Emissionsszenario A2 beträgt (DANGENDORF ET AL., 2013). Die Variabilität in den atmosphärischen Modellen ist allerdings sehr hoch und robuste Aussagen sind darum schwierig.

Für die Regionalisierung der Schmelzwasseranteile (Gletscher und Eisschilde) stehen demnächst durch die Arbeiten von SLANGEN ET AL. (2012) Verfahren zur Verfügung und damit kann ein geschlossenes regionales Budget erstellt werden.

Quantitative Angaben zu zukünftigen Meeresspiegelveränderungen stehen weiterhin unter dem Vorbehalt neuer Erkenntnisse, da die Eisverluste von Grönland und der Antarktis noch nicht verlässlich abgeschätzt werden können.

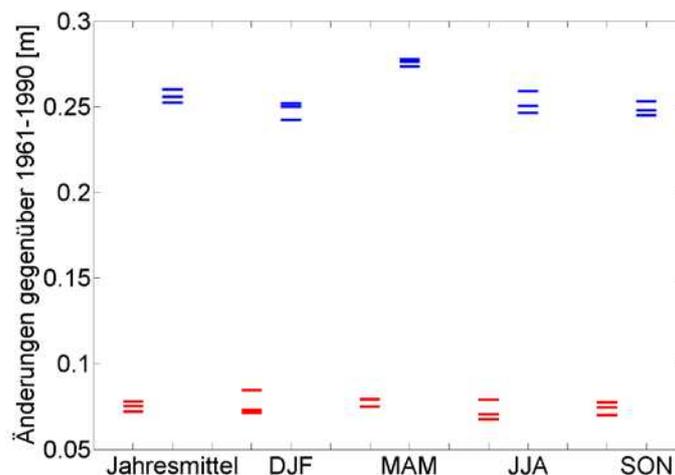


Abbildung 6: Bandbreiten der drei gekoppelten Klimamodellresultate für Änderungen des mittleren Meeresspiegels an der Oberfläche in [m]. Dargestellt sind Jahresmittel sowie saisonale Mittel für die **nahe Zukunft (rot)** und **ferne Zukunft (blau)**.

10.1.7 Seegang

Die bestehenden Seegangsszenarien für die Nordsee wurden um zwei A1B-Szenarien erweitert. Dabei wurden zwei Regionalmodelle, REMO und DMI-HIRHAM mit dem gleichen Globalmodell (ECHAM5/MPI-OM) angetrieben, so dass direkt die Auswirkung des dynamischen Downscaling auf die Ergebnisse untersucht werden konnte. Einen Überblick über die Bandbreite der Ergebnisse gibt Tab. 5. Deutlich wird eine Erhöhung des 99. Perzentils der signifikanten Wellenhöhe in der östlichen Nordsee

und eine Abschwächung in der westlichen Nordsee. Dabei sind in beiden Gebieten die größten Änderungen im Frühling (März-Mai) sichtbar.

Auch wurden im Rahmen dieser dynamischen Seegangsszenarien mathematische Routinen entwickelt, mit denen aus den Modellergebnissen anwenderbezogene Fragestellungen untersucht werden können. Dies beinhaltet z. B. die Entwicklung zukünftiger Wetterfenster oder eine Extremwertanalyse. Damit können auch in der Zukunft mit Ergebnissen anderer Projektionen schnelle Analysen der Auswirkungen eventueller Änderungen auf Offshore-Aktivitäten oder die Sicherheit von Küstenbauwerken durchgeführt werden.

Mit der Prozessstudie zum Einfluss der Wassertiefe auf den Seegang wurde erstmals die Auswirkung des Meeresspiegelanstiegs auf den küstennahen Seegang untersucht.

Für eine schnelle und günstige Abschätzung der Bandbreite möglicher Ergebnisse (ein wichtiges Anliegen von KLIWAS) ist ein statistisches Modell entwickelt worden, das aus den Luftdruckfeldern von Global- wie Regionalmodellen auf die Seegangshöhe schließen kann. Damit steht KLIWAS nun ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem in Zukunft Daten aus aktuellen Modellergebnissen (wie aus CORDEX oder ECLISE) genutzt werden können, um schnelle und kostengünstige Abschätzungen von zukünftigen Entwicklungen des Seegangs vorzunehmen.

Tabelle 5 : Bandbreite des 99. Perzentils der signifikanten Wellenhöhe SWH für angegebene 30-Jahresperioden, im Vergleich zu 1971-2000 [in %]. Die Ergebnisse werden getrennt für die westliche und östliche Nordsee dargestellt.

Parameter	Zeitraum	Nahe Zukunft (2011-2040)	Ferne Zukunft (2071-2100)
99. Perzentil der SWH westliche Nordsee	Jahresmittel	0 bis +5	-10 bis +1
	DJF	+3 bis +8	-8 bis +5
	MAM	-7 bis +6	-16 bis +6
	JJA	-2 bis +4	-14 bis +6
	SON	-4 bis +10	-8 bis -2
99. Perzentil der SWH östliche Nordsee	Jahresmittel	0 bis +8	+4 bis +10
	DJF	-4 bis -2	0 bis +5
	MAM	+4 bis +12	+8 bis +16
	JJA	+2 bis +6	+2 bis +4
	SON	+1 bis +12	+6 bis +14

10.2 Kernaussagen zu den Ergebnissen

10.2.1 Gekoppelte regionale Klimaprojektionen für die Nordsee Bandbreite der Klimaprojektionen

Die Bandbreite der atmosphärischen regionalen Modellergebnisse wird maßgeblich von den verwendeten globalen Muttermodellen der Regionalmodelle (RCM) bestimmt. Die drei gekoppelten Modelle sind in den Bandbreitenuntersuchungen mit berücksichtigt (siehe Tabellen 6a und 6b).

Die Ergebnisse für die atmosphärischen Größen der gekoppelten Modelle liegen nur teilweise im Bereich der Bandbreite der ungekoppelten RCM Ergebnisse aus dem ENSEMBLES Projekt, siehe Abb. 1. Für die Wolkenbedeckung und die langwellige Nettostrahlung ergibt sich z.B. eine Verbreiterung der Bandbreiten mit deutlich erhöhten Werten aus den gekoppelten Modellen. Die kurzwellige Nettostrahlung zeigt eine erweiterte Bandbreite hin zu geringeren Werten.

Es scheint, dass Wolken- und Strahlungseffekte einen größeren Einfluss durch die Kopplung bekommen haben und es sollten weitere Analysen dazu folgen, die die Prozesse dahinter untersuchen.

Tabelle 6a: Bandbreite der Änderungen für verschiedene atmosphärische Größen im Zeitraum nahe Zukunft (2021 – 2050) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961 - 1990. Die atmosphärischen Größen wurden gemittelt über dem Gebiet der Nordsee. Die Datengrundlage bilden die RCM Ergebnisse des ENSEMBLES Projekts und die gekoppelten regionalen Modellläufe.

Entwicklung gekoppelter regionaler Modelle und Analyse der Klimawandelszenarien für die Nordseeregion

Parameter	Zeitraum	Bandbreiten Nahe Zukunft	
		ENSEMBLES	Gekoppelte Modelle
2 m Lufttemperatur [K]	Jahresmittel	0,7 bis 1,9	0,9 bis 1,6
	DJF	0,6 bis 2,0	0,5 bis 1,7
	MAM	0,8 bis 1,8	0,7 bis 2,0
	JJA	0,5 bis 1,9	0,6 bis 1,3
	SON	0,7 bis 1,9	0,8 bis 1,5
	Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe [m/s]	Jahresmittel	-0,06 bis 0,15
	DJF	-0,16 bis 0,36	-0,26 bis 0,09
	MAM	-0,16 bis 0,21	-0,38 bis -0,03
	JJA	-0,09 bis 0,17	-0,16 bis 0,09
	SON	-0,18 bis 0,32	-0,07 bis 0,05
Wolkenbedeckungsgrad [%]	Jahresmittel	-2,6 bis 0,3	-1,2 bis 0,8
	DJF	-2,4 bis 0,2	-1,1 bis 0,1
	MAM	-4,7 bis 0,7	-5,7 bis 0,7
	JJA	-5,6 bis 2,2	1,0 bis 2,8
	SON	-2,1 bis 1,6	-0,5 bis 2,0
	Niederschlag [%]	Jahresmittel	0,8 bis 8,3
DJF		0,4 bis 14,9	-3,7 bis 1,4
MAM		-6,7 bis 10,9	-15,5 bis -1,4
JJA		-3,9 bis 7,4	0,4 bis 5,5
SON		1,0 bis 15,5	-4,5 bis 5,6
Kurzwellige Nettostrahlung [W/m ²]		Jahresmittel	-3,3 bis 2,9
	DJF	-1,1 bis 2,5	-0,4 bis 0,2
	MAM	-4,1 bis 3,0	-2,1 bis 4,7
	JJA	-7,2 bis 7,4	-6,9 bis -3,6
	SON	-2,7 bis 1,6	-1,7 bis -1,5
	Langwellige Nettostrahlung [W/m ²]	Jahresmittel	-0,4 bis 3,0
DJF		-0,3 bis 2,9	0,5 bis 2,2
MAM		-1,7 bis 2,9	-0,9 bis 1,8
JJA		-1,8 bis 3,6	1,1 bis 2,7
SON		-0,9 bis 3,5	1,6 bis 3,7

Tabelle 6b: Bandbreite der Änderungen für verschiedene atmosphärische Größen im Zeitraum ferne Zukunft (2070 – 2099) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961 - 1990. Die atmosphärischen Größen wurden gemittelt über dem Gebiet der Nordsee.

Parameter	Zeitraum	Bandbreiten Ferne Zukunft	
		ENSEMBLES	Gekoppelte Modelle
2 m Lufttemperatur [K]	Jahresmittel	1,8 bis 3,7	1,4 bis 2,8
	DJF	1,9 bis 3,7	2,1 bis 3,1
	MAM	1,8 bis 3,3	2,1 bis 3,2
	JJA	1,6 bis 3,5	1,8 bis 2,4
	SON	1,7 bis 4,0	1,9 bis 2,7
Windgeschwindigkeit in 10 m [m/s]	Jahresmittel	-0,26 bis 0,25	-0,18 bis -0,06
	DJF	-0,52 bis 0,55	-0,10 bis 0,12
	MAM	-0,15 bis 0,34	-0,45 bis -0,03
	JJA	-0,23 bis 0,25	-0,10 bis -0,02
	SON	-0,24 bis 0,26	-0,14 bis -0,05
Wolkenbedeckungsgrad [%]	Jahresmittel	-3,8 bis 1,9	1,7 bis 3,4
	DJF	-2,6 bis 2,1	1,0 bis 1,4
	MAM	-3,4 bis 2,7	-2,1 bis 2,0
	JJA	-10,0 bis 3,6	3,9 bis 7,0
	SON	-3,5 bis 1,5	1,5 bis 3,9
Niederschlag [%]	Jahresmittel	-1,3 bis 15,5	5,0 bis 10,2
	DJF	9,2 bis 22,2	7,0 bis 17,1
	MAM	-4,2 bis 24,7	-4,0 bis 9,7
	JJA	-14,8 bis 10,3	2,4 bis 5,6
	SON	-5,4 bis 24,6	6,6 bis 9,2
Kurzwellige Nettostrahlung [W/m ²]	Jahresmittel	-7,0 bis 3,6	-7,4 bis -5,7
	DJF	-2,9 bis -0,3	-1,3 bis -1,0
	MAM	-12,4 bis 2,2	-6,9 bis -1,6
	JJA	-13,4 bis 10,7	-17,2 bis -13,1
	SON	-4,2 bis 2,0	-4,1 bis -3,3
Langwellige Nettostrahlung [W/m ²]	Jahresmittel	0,6 bis 6,4	4,7 bis 7,2
	DJF	1,5 bis 6,3	4,3 bis 5,0
	MAM	-0,7 bis 5,7	2,3 bis 4,9
	JJA	-2,1 bis 8,1	5,1 bis 11,4
	SON	1,2 bis 7,0	4,5 bis 8,2

- Die Bandbreite für die Änderung der 2 m Lufttemperatur beträgt im Jahresmittel für die nahe Zukunft 0.7 bis 1.9 K und für die ferne Zukunft 1.4 bis 3.7 K. Die Bandbreite der Änderungen hat sich somit in der fernen Zukunft verdoppelt. Aus allen Modellergebnissen wird eine Zunahme der mittleren Temperatur berechnet. Die saisonalen Mittel weisen keine deutlichen Unterschiede zu den Jahresmittelwerten auf. Nur für das Frühjahr März bis Mai (MAM) konnten geringe Zunahmen der Bandbreite von 1.8 bis 3.3 K in der fernen Zukunft im Vergleich zur Änderung der Bandbreite des Jahresmittels berechnet werden.

- Die Bandbreite der mittleren Windgeschwindigkeit ändert sich im Mittel von -0.08 bis 0.15 m/s für die nahe Zukunft auf -0.26 bis 0.26 m/s für die ferne Zukunft. Aus den Modellergebnissen werden Zunahmen und Abnahmen der mittleren Windgeschwindigkeit berechnet. In den Wintermonaten Dezember bis Februar (DJF) ist die Bandbreite der Änderungen in der nahen sowie fernen Zukunft doppelt so groß wie das Jahresmittel oder die restlichen Jahreszeiten. Aus den Untersuchungen der Zeitreihen von jährlichen Häufigkeitsverteilungen wird jedoch deutlich (siehe GANSKE UND ROSENHAGEN, IN VORB.), dass die berechneten Bandbreiten durch die dekadischen Schwankungen der Windgeschwindigkeit bedingt sind, die in den verschiedenen Modellläufen nicht phasengleich verlaufen.
- Die Bandbreite der Änderungen des Niederschlags liegt im Jahresmittel für die nahe Zukunft zwischen -4.9 und 2.0 % und für die ferne Zukunft zwischen 5.0 und 10.2%. Die Bandbreiten der saisonalen Änderungen unterscheiden sich deutlich.
- Die Bandbreite der Änderung des mittleren Wolkenbedeckungsgrads liegt im Jahresmittel für die nahe Zukunft zwischen -2.6 % und 1.4 % und für die ferne Zukunft erhöht sich die Bandbreite auf -3.8 % bis 4.9 %. Im Sommer (Juni bis August) wird eine größere Bandbreite für die nahe sowie ferne Zukunft berechnet.
- Die Bandbreite der Änderung der mittleren kurzwelligen Nettostrahlung liegt im Jahresmittel zwischen -3.3 und 2.9 W/m² für die nahe Zukunft und für die ferne Zukunft zwischen -9.1 und 3.6 W/m². Saisonal gibt es deutliche Unterschiede. Im Frühjahr (MAM) und Sommer (JJA) sind die Bandbreiten der Änderungen in der nahen und fernen Zukunft deutlich größer als in den übrigen Jahreszeiten.
- Die Bandbreite der mittleren langwelligen Nettostrahlung liegt im Jahresmittel für die nahe Zukunft zwischen -0.2 und 3.2 W/m², sowie für die ferne Zukunft zwischen 1.0 und 9.1 W/m².

10.2.2 Salzgehalt, Wassertemperatur und Ozeanische Dynamik

Die Bandbreite der ozeanischen regionalen Modellergebnisse beruht nur auf den drei gekoppelten Modellen (siehe Tabelle 7).

- Die Oberflächentemperatur der Nordsee kann in der nahen Zukunft zwischen 0.6 bis 1.4 K ansteigen und verstärkt sich in der fernen Zukunft deutlich auf 1.8 bis 2.5 K.
- Die Salzgehaltsänderungen in der nahen Zukunft sind uneinheitlich und liegen im Jahresmittel zwischen -0.07 bis +0.04 psu. In der fernen Zukunft nimmt die Salzgehaltsabnahme auf -0.26 bis -0.05 zu. Grund für Salzgehaltsänderungen sind steigende Süßwassereinträge, verstärkte Niederschläge über See und Änderungen im einströmenden Atlantikwasser.

- Den langzeitlichen Trend des Salzgehaltes sind starke dekadische Schwankungen überlagert. Dies ist bei der Verwendung von Änderungssignalen aus Zeitscheiben zu beachten. Dies gilt vor allem für die nahe Zukunft.

Ergebnisse des MPIOM Modells zeigen für den Atlantik:

- Im Nordost-Atlantik nimmt die Mächtigkeit der durchmischten Deckschicht deutlich ab, weil die Schichtung durch deren größere Erwärmung stabiler wird.
- Der Einstrom von Atlantikwasser in die Nordsee durch den Englischen Kanal kann deutlich abnehmen.
- Die Zirkulation in der südlichen Nordsee kann schwächer werden.

Tabelle 7: Bandbreite der Änderungen für verschiedene ozeanische Größen im Zeitraum *nahe Zukunft* (2021 – 2050) und *ferne Zukunft* (2070 – 2099) im Vergleich zu dem Zeitraum 1961 – 1990. Die ozeanischen Größen wurden gemittelt über dem Gebiet der Nordsee (siehe Abb. 7). Die Datengrundlage bilden die regionalen gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modelle.

Entwicklung gekoppelter regionaler Modelle und Analyse der Klimawandelszenarien für die Nordseeregion

Parameter	Jahreszeiten	Bandbreiten	
		Änderung Nahe Zukunft	Änderung Ferne Zukunft
Wassertemperatur an der Oberfläche [K]	Jahresmittel	0.6 bis 1.4	1.8 bis 2.5
	DJF	0.6 bis 1.4	1.9 bis 2.7
	MAM	0.5 bis 1.9	1.8 bis 3.0
	JJA	0.6 bis 1.2	1.6 bis 2.3
	SON	0.8 bis 1.2	1.7 bis 2.3
Salzgehalt an der Oberfläche [psu]	Jahresmittel	-0.07 bis 0.04	-0.26 bis -0.05
	DJF	-0.05 bis 0.04	-0.24 bis -0.04
	MAM	-0.05 bis 0.01	-0.24 bis -0.07
	JJA	-0.08 bis 0.05	-0.27 bis -0.04
	SON	-0.09 bis 0.06	-0.27 bis -0.04
Meeresspiegel [m]	Jahresmittel	0.07 bis 0.08	0.25 bis 0.26
	DJF	0.07 bis 0.09	0.24 bis 0.25
	MAM	0.07 bis 0.08	0.27 bis 0.28
	JJA	0.06 bis 0.08	0.24 bis 0.26
	SON	0.07 bis 0.08	0.24 bis 0.26

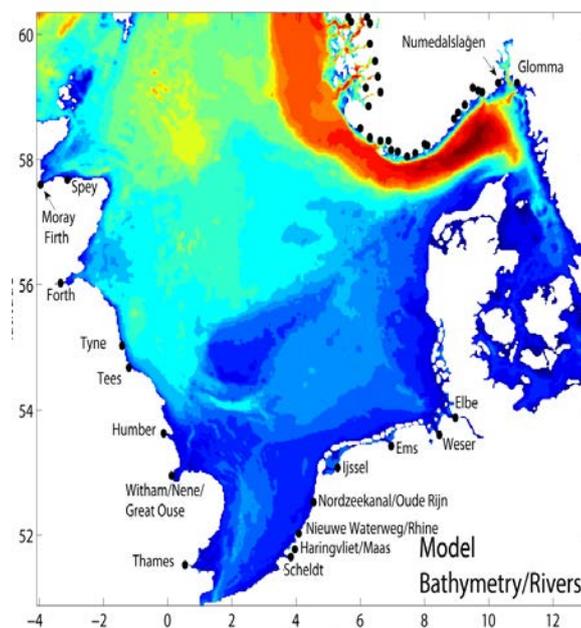


Abbildung 7: Die Bathymetrie des regionalen Ozeanmodells HAMSOM. Das Mittelungsgebiet für die Nordsee ist beschränkt auf die Seepunkte des jeweiligen Modells zwischen 51°- 59,5° N und 4°W-8,5° E.

10.2.3 Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen über der Nordsee

Für die Windgeschwindigkeiten schwanken die Werte der jährlichen Perzentile der Häufigkeitsverteilung stark von Jahr zu Jahr:

- Die 30-jährigen gleitenden Mittel der Jahreswerte der Perzentile zeigen dekadische Schwankungen.
- Betrachtet über den gesamten Zeitraum von 1961 - 2100 haben die Zeitreihen der meisten Modellkombinationen für alle untersuchten Perzentile keinen von Null verschiedenen signifikanten Trend.

Die Werte der Windrichtungshäufigkeiten schwanken ebenfalls stark von Jahr zu Jahr:

- Die 30-jährigen gleitenden Mittel der Häufigkeiten zeigen dekadische Schwankungen.
- Betrachtet man die Windrichtungen bei allen Windgeschwindigkeiten, so nimmt in der Mehrzahl der Modellergebnisse die Häufigkeit der Windrichtung West in allen Gebieten zu und die Häufigkeiten von Ost und Südost nehmen in den nördlichen Gebieten ab (Abbildung 8, links).
- Für die Häufigkeiten von Windrichtungen mit höheren Windgeschwindigkeiten findet man in keinem Gebiete für eine Mehrzahl von Modellergebnissen einen von Null verschiedenen signifikanten Trend (Abb. 8, rechts).

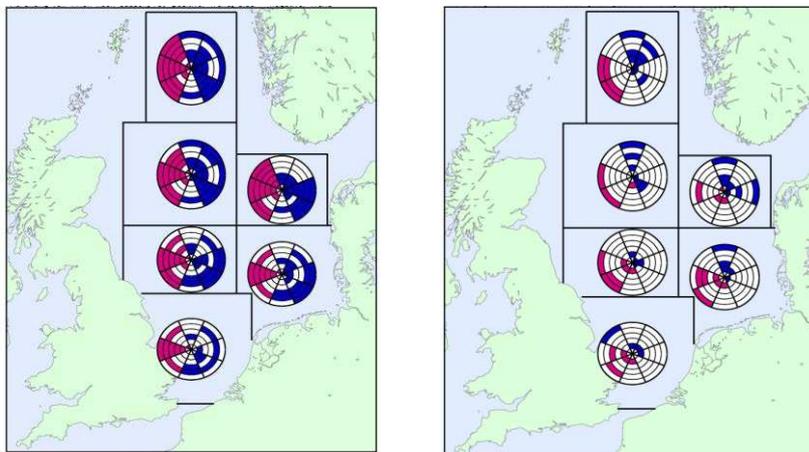


Abbildung 8: Windrichtungsverteilungen für alle Windgeschwindigkeiten (links) und Windgeschwindigkeiten größer als das 95. Perzentil (rechts). Die Vorzeichen und Signifikanz der Trends jährlicher Windrichtungshäufigkeiten in den Teilgebieten der Nordsee für den Zeitraum 1961 - 2100 wurden mit sechs verschiedenen Modellkombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen berechnet. Jedes Kreissegment zeigt die Ergebnisse der entsprechenden Windrichtungsklasse. Jeder Kreis enthält die Ergebnisse eines Modellaufs. Positiv signifikante Trends sind in pink, negativ signifikante Trends in blau und nicht signifikante Trends in weiß eingezeichnet. Die Ergebnisse sind von folgenden Modellketten (von innen nach außen): IPS-LCM/REMO, ECHAM5_1/REMO, MPI-OM/ECHAM5_3/REMO, ECHAM5_3/RACMO, ECHAM5_3/HIRHAM5 und NEMO/ECHAM5_3/RCA4.

10.2.4 Sturmfluten in der Deutschen Bucht

Sturmfluten können durch räumlich stark begrenzte Sturmgebiete mit relativ kurzer Durchzugszeit von weniger als einem Tag über die Nordsee erzeugt werden. Die Zahl der beobachteten Sturmfluten schwankt stark von Jahr zu Jahr.

In den Klimamodellergebnissen sind die zeitlichen Schwankungen der jährlichen Anzahl von sturmflutrelevanten Ereignissen deutlich größer als deren linearer Trend. Eine signifikante Änderung der Sturmfluthäufigkeit ist nicht erkennbar.

10.2.5 Meeresspiegel

Die sterischen und dynamischen Anteile am Meeresspiegelanstieg sind in allen drei Modellen sehr einheitlich simuliert, da sie stark vom Meeresspiegelanstieg im angrenzenden Atlantik bestimmt sind und interne Änderungen in der Nordsee gering sind.

- Der sterische/dynamische Anteil am Meeresspiegelanstieg beträgt in der nahen Zukunft nur wenige Zentimeter, in der fernen Zukunft 24 bis 28 cm.
- Es besteht das Potential für einen leichten Anstieg der atmosphärisch induzierten Anteile des Meeresspiegelanstiegs, die aber selbst bei den hohen Emissionsszenarien maximal 5 bis 6 cm beträgt.
- Quantitative Angaben zu zukünftigen Meeresspiegelveränderungen stehen weiterhin unter dem Vorbehalt neuer Erkenntnisse, da die Eisverluste von Grönland und der Antarktis noch nicht verlässlich abgeschätzt werden können.

10.2.6 Seegang

Für eine Analyse des heutigen mittleren und extremen Seegangs sowie der zu erwartenden zukünftigen Änderungen wurde der Zeitraum von 1961 - 2100 in vier 30-Jahres-Perioden aufgeteilt. Als Referenzperiode gilt der Zeitraum von 1961 - 1990, die Perioden 2011 - 2040, 2041 - 2070 sowie 2071 - 2100 geben die Zustände der nahen, mittleren und fernen Zukunft in den Klimaläufen wieder. Die prozentualen Änderungen des 99. Perzentils der signifikanten Wellenhöhe SWH für die drei 30-Jahresperioden in der Zukunft im Vergleich zur Referenzperiode sind in Abbildung 9 dargestellt.

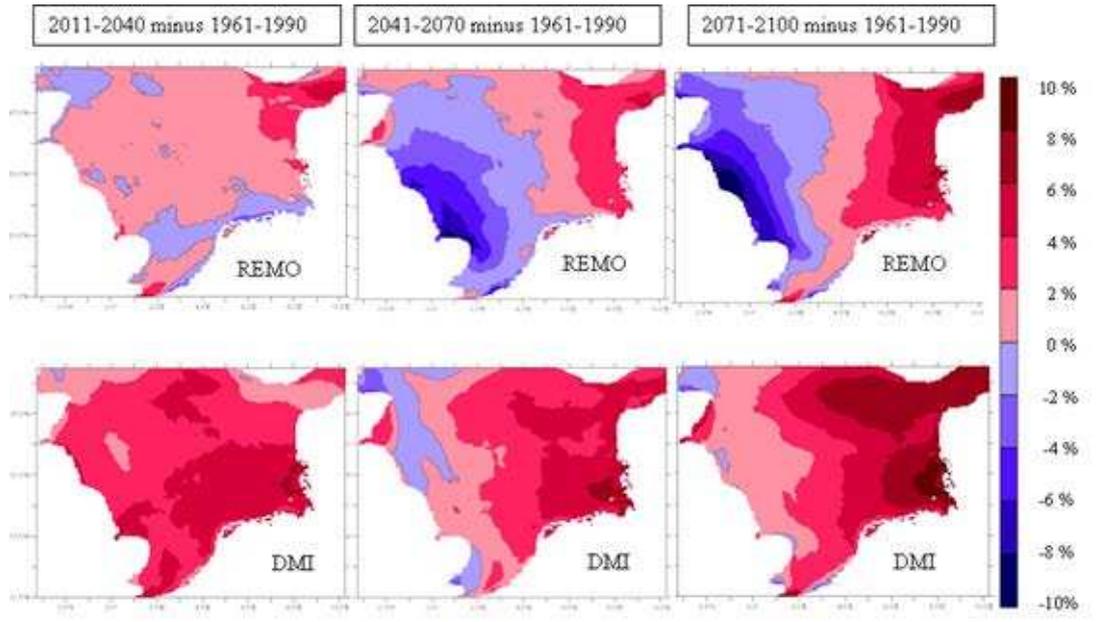


Abbildung 9: Änderung des 99. Perzents der signifikanten Wellenhöhe (SWH) im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 im Modell REMO (oben) und DMI-HIRHAM (unten) in [%], für die Perioden 2011-2040 (links), 2041-2070 (Mitte) und 2071-2100 (rechts).

- Das für KLIWAS entwickelte statistische Seegangmodell wurde auf insgesamt 30 Realisierungen von 6 Globalmodellen im IPCC-Szenario A1B angewendet. Bei 20 dieser 30 Realisierungen wird eine Erhöhung der mittleren Wellenhöhe zum Ende des Jahrhunderts um bis zu 5% deutlich, wobei nur die Realisierungen von zwei der sechs Globalmodelle auch eine statistisch signifikante Erhöhung liefern. Dabei zeigt sich im statistischen Modell (ähnlich wie bei den dynamischen Szenarienrechnungen) die stärkste Erhöhung in der östlichen Nordsee und keine bzw. sogar negative Änderungen in der westlichen Nordsee.
- Die Modelle zeigen eine Zunahme des 99. Perzents im Osten und eine Abnahme (REMO) bzw. leichte Zunahme (DMI) in der westlichen Nordsee. Es ist eine Verstärkung dieser Dipolstruktur zum Ende des Jahrhunderts erkennbar, mit etwa den gleichen prozentualen Änderungen wie für die mittlere SWH (für REMO ca. 8% Zunahme in der Deutschen Bucht und bis zu 10 % Abnahme vor der englischen Ostküste).
- Die zu erwartende maximale Wellenhöhe, die sogenannte Jahrhundertwelle, ist für die Planung der Höhe des Bauwerks und Stabilität der Fundamente wichtig. Eine Untersuchung mithilfe der Extremwertstatistik ergibt für die Deutsche Bucht eine Erhöhung der sogenannten Jahrhundertwelle um 5 %, während für die englische Ostküste eine Abnahme um etwa 8 % prognostiziert wird und in der nördlichen Nordsee keine signifikanten Änderungen erwartet werden. Allerdings gibt es auch hier starke dekadische Schwankungen.

- Für den Aufbau und Betrieb der Offshore-Bauwerke, z.B. Windkraftanlagen ist die zu erwartende Häufigkeit und Dauer von Schönwetterperioden (für Installations- bzw. Reparaturarbeiten) sowie die zu erwartende maximale Wellenhöhe, (die sogenannte Jahrhundertwelle) entscheidend. Bei Häufigkeit und Andauer der Schönwetterperioden lassen sich abseits der starken natürlichen Schwankungen keine signifikanten Änderungen in der Nordsee erkennen.

Die Prozessstudie zum Einfluss eines um 1m erhöhten Meeresspiegels auf die Wellenhöhe liefert folgendes Bild:

- Erhöhung der Wellenhöhe im Küstenbereich der östlichen Nordsee um 20-40 cm, in eng begrenzten Regionen um bis zu 1 m. Keine oder sehr geringe Änderungen in der zentralen Nordsee
- Anstieg der Wellenperiode in den Küstengebieten der östlichen Nordsee um 0.3-0.6 s.
- Es sind keine relevanten Wellenrichtungsänderungen sichtbar.

10.3 Einschätzung zum Grad der Betroffenheit des Systems Wasserstraße und des operativen Geschäfts der WSV

Für das System Nordsee sind für die projizierte nahe und ferne Zukunft geringe Veränderungen zu erwarten. Eine abgeschwächte Zirkulation im südlichen Teil würde für Änderungen im Sedimenthaushalt und der Ökosystemdynamik führen, was für Küstenschutz, Fischerei etc. von Bedeutung wäre.

Aus den Untersuchungen zu Wind und Sturmfluten ergeben sich keine signifikanten Änderungen für die nahe und ferne Zukunft. Aufgrund der hohen dekadischen Schwankungen der einzelnen Parameter lässt sich keine erhöhte Betroffenheit des Systems erkennen. Extreme Einzelereignisse konnten allerdings bisher noch nicht untersucht werden.

Meeresspiegeländerungen lassen nur einen geringen Anstieg von wenigen Zentimetern für die nahe Zukunft erwarten. Änderungen aufgrund des Eisverlusts von Grönland und der Antarktis sind dabei jedoch nicht berücksichtigt, können aber ggf. zu deutlich größeren Änderungen führen. Für die nahe Zukunft ist keine erhöhte Betroffenheit des Systems über die bereits bekannten Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs hinaus zu erkennen.

Die für die nahe und ferne Zukunft projizierten Änderungen der Seegangsverhältnisse in der östlichen Nordsee, und hier vor allem in der Deutschen Bucht, zeigen eine signifikante Erhöhung der höheren Wellen (99. Perzentil der SWH) und sehr hohen Wellen (Wiederkehrperiode von 10 – 100 Jahren) um 5 - 10 %. Dies kann von Relevanz für den Deichbau an der Deutschen Nordseeküste und für die Schifffahrt in der Deut-

schen Bucht sein. Noch wichtiger ist die vorhergesagte Erhöhung der sehr hohen Wellen (bis zur sogenannten Jahrhundertwelle) allerdings für die Offshore-Industrie, die für ihre Bauwerke in der Deutschen Bucht mit erhöhten Extremwellen rechnen muss. Die vorhergesagte Erhöhung der signifikanten Wellenhöhe in der östlichen Nordsee rührt aus den Windergebnissen der zugrunde liegenden Projektionen. Sie steht nicht im Widerspruch zu oben erwähnten Ergebnissen aus dem gemittelten Ensemble der Windgeschwindigkeit, die keine signifikanten Änderungen aufweisen.

10.4 Kernaussagen über mögliche Anpassungsoptionen und Handlungsempfehlungen

Die Hinweise an Politik und Wirtschaft lassen sich in folgenden Punkten auflisten:

1. Die in KLIWAS erzielten Ergebnisse über Veränderungen des physikalischen Zustands von Atmosphäre und Meer in der Nordsee beschränken sich weitgehend auf Aussagen zu mittleren Verhältnissen in der nahen und fernen Zukunft. Diese dreißigjährigen Zeitscheiben waren zu Beginn als Aussagezeiträume festgelegt worden. Allerdings werden die Zeitreihen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts von dekadischen Schwankungen der Parameter dominiert, die die Ausmaße von Extremsituationen bestimmen. Dem ist bei der Entwicklung von Anpassungsoptionen Rechnung zu tragen und erfordert weitere Untersuchungen. Dies gilt auch bei der Berücksichtigung extremerer Treibhausgas-Szenarien (z.B. RCP 8.5) als dem in KLIWAS verwendeten Szenario A1B.
2. Auf Basis des derzeitigen Ergebnisstandes deuten sich auf der Nordsee keine Notwendigkeiten für Anpassungsmaßnahmen an, da die Trends von Veränderungen gering sind. Eine Ausnahme bilden die Parameter, die einen Einfluss auf die Ökologie der Nordsee haben, z.B. Wassertemperatur und Zirkulation.
3. Die größten Unsicherheiten bestehen -global- in der Vorhersagbarkeit von Meeresspiegeländerungen, da noch erhebliche Wissenslücken über den Einfluss von Eisverlusten in Grönland und der Antarktis bestehen.
4. Obwohl die in KLIWAS erstmals gelungene regionale Koppelung von Atmosphäre- und Ozeanmodellen verbesserte Ergebnisse gebracht haben, sollte das Ensemble von regional gekoppelten Klimamodellen für den Nordseeraum verstärkt werden, um die Robustheit der Aussagen abzusichern.

11 Diskussion und Ausblick

Die im Projekt entstandenen gekoppelten regionalen Ozean-Atmosphäre- Klimamodelle zeigen, dass die Kopplung funktioniert und realistische Ergebnisse produziert werden. Die erfolgreiche Kopplung der Modellkomponenten und die abgeleiteten regionalisierten Klimaprojektionen konnten allerdings auf Grund der kurzen Projektzeit nur mit einer ausgewählten Anzahl von Modellkombinationen durchgeführt werden. Für eine robustere Ableitung von Bandbreiten ist eine Erweiterung des Modellensembles notwendig, sei es mit unterschiedlichem Antrieb, z.B. mit den neuen RCP Szenarien und weiteren Globalmodellen als Antrieb.

In den gekoppelten Modellierungen ist die zeitliche Entwicklung der atmosphärischen Parameter in den meisten Fällen deutlich fokussierter als in den ungekoppelten. D. h., die Bandbreite ist gekoppelt zum Teil deutlich schmaler als bei den ungekoppelten Ergebnissen; ungekoppelt streut sie sehr stark, mit gelegentlich fragwürdigen Werten. Diese Ergebnisse bestätigen dass der wechselhafte Zustand des Meerwassers einen deutlichen rückkoppelnden Einfluss auf die Atmosphäre über der Nordsee hat. Die Verbesserung des Atmosphärenmodell RCA 3 auf die Version RCA4 hat allerdings gezeigt, dass bei ungekoppelter Modellierung deutliche Verbesserungen durch eine hohe Qualität des Atmosphärenmodells erzielt werden können; auch zum Vorteil bei einer Koppelung.

Die Koppelungen haben auch aufgedeckt, dass verschiedene Modellkomponenten einer methodischen Verbesserung bedürfen. Dieses sind zum einen die Wolkenbedeckung und die Niederschläge über See, zum anderen jene über Land. Die fluviatilen Flusseinträge haben in den Küstengewässern auf den Salzgehalt einen großen Einfluss und, nachfolgend, auf alle hydrochemischen und ökologischen Parameter.

Bei der Analyse von Windfeldern auf der Nordsee hat sich gezeigt, dass die jährliche Variabilität größer ist als jegliche gefundene langzeitliche Trends. Deshalb ist es bei der Untersuchung der möglichen zeitlichen Entwicklung von Windfeldern wichtig, diese immer anhand von Zeitreihen zu untersuchen. Der Analyse von Zeitscheiben ist nicht ausreichend, da sie der großen Variabilität nicht gerecht wird. Wegen des hohen Einflusses der internen Variabilität der Modelle auf die Windergebnisse sollten auch nur die Ergebnisse von möglichst großen Ensembles betrachtet werden. Die Analysen der Globalmodellergenergebnisse aus dem Projekt CMIP5 zeigen allerdings, dass auch unter der Annahme von anderen Szenarien bedeutende Änderungen der Windgeschwindigkeiten auf der Nordsee nicht zu erwarten sind (DE WINTER ET AL., 2013). Die Untersuchungen zur Änderungen der Windrichtungen könnte weiter vertieft werden. Hierbei hängen die Änderungen davon ab, wie weit sich die Zugbahnen der

Nordhemisphärischen Tiefdruckgebiete im Laufe des Klimawandels nach Norden verlagern. Dieser Punkt sollte näher untersucht werden.

Die Analysen auf Sturmfluten beziehen sich in KLIWAS nur auf Cuxhaven. Durch die unterschiedlichen geographischen Orientierungen der ostfriesischen und nordfriesischen Küsten sowie der Ästuare können die Ergebnisse von Cuxhaven nicht verallgemeinert werden. Dies ist wichtig für das Sturmflutpotential.

Die Ergebnisse der Seeganguntersuchungen stimmen sehr gut überein mit denen aus anderen Untersuchungen. Vor allem die neueren Studien, in denen auch transiente Rechnungen durchgeführt wurden, zeigen ähnliche Projektionen für den Seegang in der Nordsee. Forschungsbedarf besteht weiterhin in der Durchführung von Modellläufen mit aktuelleren RCP-Szenarien als Antrieb, die dem derzeitigen Entwicklungsstand der Weltwirtschaft eher entsprechen als die hier durchgeführten A1B-Szenarien.

Im Meeresspiegelanstieg ist der in der Nordsee generierte Beitrag aufgrund des im Verhältnis zum Weltozean vernachlässigbaren Volumens unwesentlich. Es wird deshalb weiter auf die Forschungsergebnisse der Grundlagenwissenschaft zu achten sein, speziell auf jene, die den möglichen Beitrag der kontinentalen Eisschilde behandeln.

12 D a n k s a g u n g

Die in diesem Projekt verwendeten ENSEMBLES Daten wurden durch die Förderung aus EU FP6 Projekt ENSEMBLES (Contract number 505539) ermöglicht, für dessen Unterstützung wir uns bedanken.

Wir haben von folgenden Kolleginnen und Kollegen jeweils zeitlich hoch aufgelöste Winddaten bekommen: E. van Meijgaard (KNMI), D. Jacob (MPI), E. Coppola und Kollegen am ICTP, N. Mackellar und O. Bossing Christensen (DMI). Wir danken Ihnen sehr für die Überlassung der Daten, da ohne ihre freundliche Unterstützung eine Untersuchung der Windrichtungen nicht durchführbar gewesen wäre.

Ferner danken wir den Kollegen N. Groll, I. Grabemann und Ralf Weisse am HZG für fruchtbare Diskussionen über die zeitliche Entwicklung der Windrichtungen und die gute Zusammenarbeit in der Kooperation Seegangsprojektionen.

Weiter danken wir allen Mitarbeitern von BSH und DWD, vor allem am Seewetteramt Hamburg, die uns während des ganzen Projekts immer wieder unterstützt haben.

Zuletzt danken wir dem BMVI für die Finanzierung dieses Projekts, ohne die die gesamten Arbeiten nicht möglich gewesen wären.

BEFORT, D., FISCHER, M., LECKEBUSCH, C.G., ULBRICH, U., GANSKE, A., ROSENHAGEN, G., AND H. HEINRICH (2014): A new method for the Identification of Storm surge events over the German Bight. In Vorbereitung.

BENDER, M.A., T.R. KNUTSON, R.E. TULEVA, J.J. SIRUTIS, G.A. VECCHI, S.T. GAMER AND A. HELD (2010): Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense atlantic hurricanes, *Science*, **327**, 454-458.

BOYER, T., S. LEVITUS, J. ANTONOV, R. LOCARNINI, A. MISHONOV AND S.A. JOSEY (2007): CHANGES IN FRESHWATER CONTENT IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN 1955-2006, *GEOPHYS. RES. LETT.*, **34**, L16603.

BÜLOW, K., GANSKE, A., HÜTTL-KABUS, S., KLEIN, B., KLEIN, H., MÖLLER, J., SCHADE, N.H., TINZ, B., HEINRICH, H., AND G. ROSENHAGEN, (2014): Ozeanische und atmosphärische Referenzdaten und Hindcast-Analysen für den Nordseeraum - Schlussbericht KLIWAS-Projekt 1.03. KLIWAS Schriftenreihe, **KLIWAS-30/2014**, DOI: 10.5675/Kliwas_30.2014_2.01.

BÜLOW, K., DIETERICH, C., ELIZALDE, A., GRÖGER, N., HEINRICH, H., HÜTTL-KABUS, S., KLEIN, B., MAYER, B., MEIER, H.E.M., MIKOLAJEWICZ, U., NARAYAN, N., POHLMANN, T., ROSENHAGEN, G., SCHIMANKE, S., SEIN, D., AND J. SU (2014A): Comparison of three regional coupled ocean atmosphere models for the North Sea under today's and future climate conditions, KLIWAS Schriftenreihe, **KLIWAS-27/2014**

CHRISTENSEN, J.H., CHRISTENSEN, O.B., LOPEZ, P., VAN MEIJGAARD, E. AND BOTZET, M. (1996): The HIRHAM4 Regional atmospheric climate model, DMI Scientific Report 96-4.

Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton (2007): Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 847-940.

DANGENDORF, S., T. WAHL, E. NILSON, B. KLEIN, J. JENSEN (2013): A new atmospheric proxy for sea level variability in the southeastern North Sea: observations and future ensemble projections, *Clim. Dynamics*, **63**, DOI 10.1007/s00382-013-1932-4.

DEBERNARD J.B., SÆTRA, O., AND L.P. ROED (2002): Future wind, wave and storm surge climate in the Northern Seas. *Clim. Res.*, **23**, 39-49.

DEBERNARD, J.B. AND L.P. ROED (2008): Future wind, wave and storm surge climate in the Northern Seas: a revisit. *Tellus A*, **60**, 427-438.

- DIETERICH, C., S. SCHIMANKE, S. WANG, G. VÄLI, Y. LIU, R. HORDOIR, L. AXELL, A., HÖGLUND, AND H.E.M. MEIER (2013): Evaluation of the SMHI coupled atmosphere-ice-ocean model RCA4_NEMO. SMHI-Report, **RO 47**, ISSN 0283-1112.
- DÖSCHER, R., K. WYSER, H. E. M. MEIER, M. W. QIAN, AND R. REDLER (2010): Quantifying Arctic contributions to climate predictability in a regional coupled ocean-iceatmosphere model. *Clim. Dyn.*, **34**, 1157–1176.
- DONAT, M., LECKEBUSCH, G.C., WILD, S., AND U. ULBRICH (2011): Future changes in European winter storm losses and extreme wind speeds inferred from GCM and RCM multi-model simulations. *Natural Hazards Earth System Sciences*, **11**, 1351-1370.
- DYE, S. R., NOLAN, G. D., AND BESZCZYNSKA-MÖLLER, A. (EDS.) (2012): ICES Report on Ocean Climate 2011, ICES Cooperative Research Report, **No. 314**. 77 pp.
- GASLIKOVA, L., GRABEMANN, I., AND N. GROLL (2012): Changes in North Sea storm surge conditions for four transient future climate realizations. *Natural Hazards*, **66**, 1501-1518, DOI: 10.1007/s11069-012-0279-1.
- GANSKE, A., AND G. ROSENHAGEN (2014): Wind Speed and Direction over the North Sea from Climate Model Results. *Meteorologische Zeitschrift*, in Vorbereitung.
- GOELZER, H., P. HUYBRECHTS, S. C. B. RAPER, M. F. LOUTRE, H. GOOSSE, AND T. FICHEFET, (2012): Millennial total sea-level commitments projected with the Earth system model of intermediate complexity LOVECLIM, *Environ. Res. Lett.*, **7**, 045401.
- GÖNNERT, G. AND T. BUSS (2009): Sturmfluten zur Bemessung von Hochwasserschutzanlagen. *Berichte des Landesbetriebes Strassen, Brücken und Gewässer. Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer Nr. 2/2009*; ISSN 1867-7959.
- GRABEMANN, I. AND R. WEISSE (2008): Climate change impact on extreme wave conditions in the North Sea: an ensemble study. *Ocean Dynamics*, **58**, 199-212, DOI: 10.1007/s10236-008-0141-x.
- GROLL, N., GRABEMANN, I., AND L. GASLIKOVA (2013): North Sea wave conditions: an analysis of four transient future climate realizations. *Ocean Dynamics*, online-first, DOI: 10/1007/s10236-013-0666-5
- GROLL, N., WEISSE, R., BEHRENS, A. AND J. MÖLLER (2014): Seegangsszenarien für die Nordsee, KLIWAS Schriftenreihe, in Vorbereitung.
- HEWITT, C.D. AND D.J. GRIGGS (2004): Ensembles-based Predictions of Climate Changes and their Impacts, *EOS*, **85**, 566pp.
- IPCC 5TH ASSESSMENT REPORT (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC 5th Assessment Report - Changes to the Underlying Scientific/Technical Assessment. (IPCC-XXVI/Doc.4).
- JAEGER, E.B. I. ANDERS, D. LÜTHI, B.;ROCKEL, C. SCHÄR, S. I SENEVIRATNE (2008): Analysis of ERA-40-driven CLM simulations for Europe, *Meteorol. Z.*, **17**, 349-367.
- Jacob, D. and Podzun, R. (1997): Sensitivity studies with the regional model REMO, *Meteor. Atmos. Phys.*, **63**, 119-129.

KEULER, K., M. LLAUTENSCHLAGER, C. WUNRAM, E. KEUP-THIEL, M. SCHUBERT, A. WILL, B. ROCKEL, U. BOEHM (2009): Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no.1, Data stream 2: European region MPI/M/MaD. World Data Centre for Climate.

DOI:10.1594/WDCC/CLM_A1B_1_D2.

KJELLSTRÖM E, G. NIKULIN, U. HANSSON, G. STRANDBERG AND A. ULLERSTIG (2011): 21st century changes in the European climate: uncertainties derived from an ensemble of regional climate model simulations. *Tellus*, **63A**, 24-40.

KNUTTI, R. AND J. SEDLÁČEK (2012): Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, **3**, 369-373.

KOLTZOW, M., T. IVERSEN, AND J. HAUGEN (2008): Extended Big-Brother experiments: The role of lateral boundary data quality and size of integration domain in regional climate modeling, *Tellus A*, **60**, 398–410.

LECKEBUSCH, G.C., DONAT, M., ULBRICH, U. AND J.G. PINTO (2008): Mid-latitude Cyclones and Storms in an Ensemble of European AOGCMs under ACC. *CLIVAR Exchanges*, **No. 46**, **Vol. 13 (No.3)**, 3-5.

LECKEBUSCH, G.C., RENGGLI, D., AND U. ULBRICH (2008A): Development and application of an objective storm severity measure for the northeast Atlantic region. *Meteorologische Zeitung*, **17**, 575–587.

LEVITUS, S., J. I. ANTONOV, T. P. BOYER, R. A. LOCARNINI, H. E. GARCIA AND A. V. MISHONOV (2009): Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L07608, 5pp.

LÖWE, P., H. KLEIN, S. WEIGELT-KREUZ (EDS) (2013): System Nordsee 2006 & 2007: Zustand und Entwicklungen. *Berichte des BSH*, **Nr. 49**, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock, 303pp.

MEIJGAARD, E. VAN, L.H. VAN ULFT, W.J. VAN DE BERG, F.C. BOSVELD, B.J.J.M. VAN DEN HURK, G. LENDERINK, A.P. SIEBESMA (2008): The KNMI regional atmospheric climate model RACMO, version 2.1. KNMI Technical Report, **302**. 43pp.
<http://www.knmi.nl/bibliotheek/knmipubTR/TR302.pdf>

MIKOJALEWICZ, U.; D. V SEIN, D. JACOB, T. KÖNIGK, R. PODZUN, T. SEMMLER (2005): Simulating Arctic sea ice variability with a coupled regional atmosphere-ocean-sea-ice model. *Meteorol. Z.* **14 (6)**, 793–800.

MIKOLAJEWICZ, U., M. VIZCAÍNO, J. JUNGCLAUS, AND G. SCHURGERS (2007): Effect of ice sheet interactions in anthropogenic climate change simulations, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L18706, 5pp.

NEU, U., AKPEROV, M. G., BELLENBAUM, N., BENESTAD, R., BLENDER, R., CABALLERO, R., COCOZZA, A., DACRE, H.F., FENG, Y., FRAEDRICH, K.J.G., GULEV, S., HANLEY, J., HEWSON, T., INATSU, M., KEAY, K., KEW, S.F., KINDEM, I., LECKEBUSCH, G.C., LIBERATO, M.L.R., LIONELLO, P., MOKHOV, I.I., PINTO, J.G., RAIBLE, C.C., REALE, M., RUDEVA, I., SCHUSTER, M., SIMMONDS, I., SINCLAIR, M., SPRENGER, M., TILININA, N.D., TRIGO, I.F., ULBRICH, S., ULBRICH, U., WANG, X.L. AND H. WERNLI (2012): IMILAST: A Community Effort to Inter-

compare Extratropical Cyclone Detection and Tracking Algorithms. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **94**, 529-547.

MARSLAND, S. J., HAAK, H., JUNGCLAUS, J. H., LATIF, M. AND ROSKE, F. (2003): The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates, *Ocean modelling*, **5**, 91–127.

NIKULIN, G., KJELLSTRÖM, E., HANSSON, U., STRANDBERG, G., AND A. ULLERSTIG (2010): Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations. *Tellus*, **63**, 1-15.

PARDAENS, A., J. M. GREGORY, AND J. LOWE (2011): A model study of factors influencing projected changes in regional sea level over the twenty-first century, *Clim. Dyn.*, **36**, 2015–2033.

PELTIER, W. R. (2004): Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: The ICE-5G (VM2) model and GRACE, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **32**, 111–149.

PINTO, J., ULBRICH, U., LECKEBUSCH, G.C., SPANGEHL, T., REYERS, M., AND S. ZACHARIAS (2007): Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPIOM1 GCM. *Climate Dynamics*, **29**, 195-210.

PRYOR, S.C., BARTHELMIE, R.J., CLAUSEN, N.E., DREWS, M., MACKELLAR, N., AND E. KJELLSTRÖM (2012): Analyses of possible changes in intense and extreme wind speeds over northern Europe under climate change scenarios. *Clim. Dyn.*, **38**, 189-208.

RIDLEY, J., J. M. GREGORY, P. HUYBRECHTS, AND J. LOWE (2010): Thresholds for irreversible decline of the Greenland ice sheet, *Clim. Dyn.*, **35**, 1065–1073.

ROCKEL, B., C. L. CASTRO, R. A. PIELKE, H. VON STORCH, AND G. LEONCINI (2008): Dynamical downscaling: Assessment of model system dependent retained and added variability for two different regional climate models, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **113**, D21107, 9pp.

ROECKNER, E., BAEUML, G., BONAVENTURA, L., BROKOPF, R., ESCH, M., GIORGETTA, M., HAGEMANN, S., KIRCHNER, I., KORNBLUEH, L., MANZINI, E., RHODIN, A., SCHLESE, U., SCHULZWEIDA, U., AND TOMPKINS, A. (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description, MPI Report, Nr. **249**, 140pp.

SHEPHERD, A., E.R. IVINS, A. GERUO, V.R. BARLETTA, M.J. BENTLEY, S. BETTADPUR, K.H. BRIGGS, D.H. BROMWICH, R. FORSBERG, N. GALIN, M. HORWATH, S. JACOBS, I. JOUGHIN, M.A. KING, J.T.M. LENAERTS, J. LI, S.R.M. LIGTENBERG, A. LUCKMAN, S.B. LUTHCKE, M. McMILLAN, R. MEISTER, G. MILNE, J. MOUGINOT, A. MUIR, J.P. NICOLAS, J. PADEN, A.J. PAYNE, H. PRITCHARD, E. RIGNOT, H. ROTT, L. SANDBERG SØRENSEN, T.A. SCAMBOS, B. SCHEUCHL, E.J.O. SCHRAMA, B. SMITH, A.V. SUNDAL, J.H. VAN ANGELEN, W.J. VAN DE BERG, M.R. VAN DEN BROEKE, D.G. VAUGHAN, I. VELICOGNA, J. WAHR, P.L. WHITEHOUSE, D.J. WINGHAM, D. YI, D. YOUNG, AND H. JAY ZWALLY (2012): A reconciled estimate of ice-sheet mass balance, *Science*, **338**, 1183–1189.

SLANGEN, A., KATSMAN, C. A., WAL, R., VERMEERSEN, L., AND RIVA, R. (2012): Towards regional projections of twenty-first century sea-level change based on IPCC SRES scenarios, *Clim. Dyn.*, **38(5-6)**, 1191-1209. Doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s00382-011-1057-6>.

- STERL, A., VAN DEN BRINK, H., DE VRIES, H., HAARSMAN, R., AND E. VAN MEIJGAARD (2009): An ensemble study of extreme storm surge related water levels in the North Sea in a changing climate. *Ocean Science*, **5**, 369-378
- VON STORCH, H., AND F. W. ZWIERS, (2001): *Statistical analysis in climate research*. Cambridge University Press.
- SU, J., H. YANG, T. POHLMANN, A. GANSKE, B. KLEIN, H. KLEIN AND N. NARAYAN (2014): A regional coupled atmosphere-ocean model system REMO/HAMSOM for the North Sea. KLIWAS Schriftenreihe, im Druck.
- ULBRICH, U., PINTO, J.G., KUPFER, H., LECKEBUSCH, G.C., SPANGEHL, T., AND M. REYERS (2008): Changing Northern Hemisphere Storm Tracks in an Ensemble of IPCC Climate Change Simulations. *American Meteorological Society*, **21**, 1669-1679.
- VAN DER LINDEN P., AND J.F.B. MITCHELL (EDS) (2009): *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp.
- VIZCAÍNO, M., U. MIKOLAJEWICZ, J. JUNGCLAUS, AND G. SCHURGERS (2010): Climate modification by future ice sheet changes and consequences for ice sheet mass balance, *Clim. Dyn.*, **34**, 301–324.
- WANG, C. Z., S. F. DONG, AND E. MUNOZ (2010): Seawater density variations in the North Atlantic and the Atlantic meridional overturning circulation. *Clim. Dyn.*, **34**, 953–968.
- WASA-GROUP (1998): Changing waves and storms in the Northeast Atlantic? *Bull. Am. Met. Soc.*, **79**, 741-760.
- DE WINTER, R.C., STERL, A., AND B.G. RUESSINK (2013): Wind Extremes in the North Sea Basin under Climate Change: An Ensemble Study of 12 CMIP5 GCMs. *Journal of Geophysical Research*, **118**, 1–12.
- WINTERFELDT, J., AND R. WEISSE (2009): Assessment of value added for surface marine wind speed obtained from two regional climate models, *Mon. Weather Rev.*, **137**, 2955–2965.
- WINTERFELDT, J., B. GEYER, AND R. WEISSE (2011): Using QuikSCAT in the added value assessment of dynamically downscaled wind speed, *Int. J. Climatol.*, **31**, 1028-1039.
- WOTH, K. (2005): North Sea storm surge statistics based on projections in a warmer climate: How important are the driving GCM and the chosen emission scenario? *Geophysical Research Letters*, **32**, L22708, 4pp.
- WOTH, K., WEISSE, R., AND H. VON STORCH (2006): Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models. *Ocean Dynamics*, **56**, 3-15
- YIN, J. (2012): Century to multi-century sea level rise projections from CMIP5 models, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L17709, 7pp.
- YOSHIMORI, M., AND A. ABE-OUCHI (2012): Sources of spread in multi-model projections of the Greenland ice-sheet surface mass balance, *J. Clim.*, **25**, 1157–1175.

ZAPPA, G.L., SHAFFREY, C., HODGES, K.I., SANSOM, P.G., AND D.B. STEPHENSON (2013): A multi-model assessment of future projections of North Atlantic and European extratropical cyclones in the CMIP5 climate models. *Journal of Climate*, **26**, 5846-5862.

ZAPPA, G., SHAFFREY, L.C., AND K. I. HODGES (2013A): The ability of CMIP5 models to simulate North Atlantic extratropical cyclones. *Journal of Climate*, **26**, 5379–5396.

Entwicklung
gekoppelter
regionaler
Modelle und
Analyse der
Klimawandel-
szenarien für die
Nordseeregion

14 Abkürzungen

AR4	Fourth Assessment Report
AOGCM	Atmosphere-Ocean Global Climate Model
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
CSC	Climate Service Center
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
DMI	Dänisches Meteorologisches Institut
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECLISE	EU_Projekt: Enabling CLimate Information Services for Europe
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ECHAM5	Globales Atmosphären-Klimamodell des MPI
ENSEMBLES	Eu Forschungsprojekt
ERA	Extended Reanalysis Envisaged
ERA-40	40-Jahres Re-Analyse des ECMWF
ERA-Interim	Re-Analyse des ECMWF
FUB	Freie Universität Berlin
GIA	Global Isostatic Adjustment
HAMSOM	Hamburg Shelf Ocean Model
HIRHAM	Regionales Klimamodell
HOAPS	Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite Data
HS	signifikante Wellenhöhe, entspricht etwa dem Mittel über das höchste Drittel aller Wellen siehe (H 1/3)
H 1/3	das Mittel über das höchste Drittel aller Wellen (siehe HS)
HZG	Helmholtz Zentrum Geesthacht
ICES	The International Council for the Exploration of the Sea
ICE5-G	Model zur Simulation der postglazialen Landbewegung
IFM	Institut für Meereskunde
IOW	Leibniz Institut für Ostseeforschung Warnemünde
ICTP	International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italien
IPCC	International Panel on Climate Change
IPSLCM	Institute Pierre Simon Laplace Climate Model

IS1992a	eines der ersten IPCC Szenarien von 1992
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
MPI	Max-Planck-Institut
MPIOM	Max-Planck Institute Ocean Model
MSL	Mean Sea Level – Mittlerer Meeresspiegel
NAO	Nordatlantische Oszillation
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NEMO	Nucleus for European Modelling of the Ocean, Ozeanmodell
NOSCCA	North Sea Region Climate Change Assessment
PSMSL	Permanent Service for Mean Sea Level
RCA3/4	Regional Climate Model Atmosphere
RCAO	Rosby Centre Atmosphere-Ocean model
RCP	Representative Concentration Pathway
REMO	Regional Model
SMB	Surface Mass Balance
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
SST	Sea Surface Temperature – Ozeanoberflächentemperatur
SWH	ebenfalls gebräuchliche Abk. für signifikante Wellenhöhe (HS)
WAM4.3	Hier verwendete Version des Wellenmodells WAM

Entwicklung gekoppelter regionaler Modelle und Analyse der Klimawandelszenarien für die Nordseeregion



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: Katharina Bülow¹, Anette Ganske¹,
Sabine Hüttli-Kabus¹, Birgit Klein¹,
Holger Klein¹, Peter Löwe¹, Jens Möller¹,
Nils Schade¹, Birger Tinz²,
Hartmut Heinrich¹, Gudrun Rosenhagen²
¹BSH; ²DWD

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

Druck: Bundesanstalt für Gewässerkunde

DOI: DOI: 10.5675/Kliwas_31/2014_2.01