

# 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**

## **Klimabedingte Auswirkungen auf die Küsten, Schifffahrt und Meeresnutzung**

KLIWAS Schriftenreihe

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105388>

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 (2015): Klimabedingte Auswirkungen auf die Küsten, Schifffahrt und Meeresnutzung. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde (KLIWAS Schriftenreihe, 35/2014). [https://doi.org/10.5675/Kliwas\\_35/2014\\_3.01](https://doi.org/10.5675/Kliwas_35/2014_3.01).

### **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-35/2014**

**Schlussbericht  
KLIWAS-Projekt 3.01**

**Klimabedingte Auswirkungen auf Küsten,  
Schifffahrt und Meeresnutzung**

Koblenz, im Dezember 2015



# KLIWAS Schriftenreihe KLIWAS-35/2014

Schlussbericht  
KLIWAS-Projekt 3.01

Klimabedingte Auswirkungen auf Küsten,  
Schifffahrt und Meeresnutzung

## Autoren:

Katharina Bülow<sup>1</sup>,  
Anette Ganske<sup>1</sup>,  
Sabine Hüttl-Kabus<sup>1</sup>,  
Birgit Klein<sup>1</sup>, Holger Klein<sup>1</sup>,  
Peter Löwe<sup>1</sup>, Jens Möller<sup>1</sup>,  
Nils Schade<sup>1</sup>, Birger Tinz<sup>2</sup>,  
Hartmut Heinrich<sup>1</sup>,  
Gudrun Rosenhagen<sup>2</sup>

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 (2015): Klimabedingte Auswirkungen auf Schifffahrt, Küsten und Meeresnutzung in der Nordseeregion. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.01. KLIWAS-35/2014. BSH / BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_35/2014\_3.01  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_35\\_2014\\_3.01.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_35_2014_3.01.pdf)



Seite

Kapitel

## Inhaltsverzeichnis

<b>04</b>		<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>
<b>04</b>		<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>
<b>05</b>	<b>1</b>	<b>KURZFASSUNG</b>
<b>09</b>	<b>2</b>	<b>ZIELE</b>
<b>10</b>	<b>3</b>	<b>ATMOSPHERISCHE UND OZEANOGRAPHISCHE ZUSTANDS-GRÖßEN: BETROFFENHEITEN</b>
<b>10</b>	<b>3.1</b>	<b>STAND DER FORSCHUNG</b>
<b>10</b>	<b>3.2</b>	<b>METHODEN</b>
<b>10</b>	<b>3.3</b>	<b>PHYSIKALISCHE GRÖßEN UND BETROFFENHEITEN</b>
<b>13</b>	<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE UND KERNAUSSAGEN</b>
<b>13</b>	<b>4.1</b>	<b>BANDBREITEN: UNGEKOPPELTE VS. GEKOPPELTE REGIONALE KLIMA-PROJEKTIONEN FÜR DIE NORDSEE</b>
<b>13</b>	<b>4.2</b>	<b>ATMOSPHERISCHE PARAMETER</b>
<b>20</b>	<b>4.3</b>	<b>OZEANISCHE PARAMETER</b>
<b>24</b>	<b>4.4</b>	<b>EINSCHÄTZUNG ZUM GRAD DER BETROFFENHEIT DES SYSTEMS WASSERSTRAßE, DES OPERATIVEN GESCHÄFTS DER WSV IM GESCHÄFTSBEREICH DES BMVI SOWIE FÜR ANDERE MEERESNUTZUNGEN</b>
<b>26</b>	<b>5</b>	<b>AUSBLICK</b>
<b>27</b>	<b>6</b>	<b>DANKSAGUNG</b>
<b>29</b>	<b>7</b>	<b>LITERATUR</b>
		<b>ANHANG I: ZIELERREICHUNG</b>

Seite

Tabelle

## Tabellenverzeichnis

14	1A	BANDBREITE DER ÄNDERUNGEN FÜR VERSCHIEDENE ATMOSPHERISCHE GRÖßEN IM ZEITRAUM <i>NAHE ZUKUNFT</i> (2021 – 2050) IM VERGLEICH ZUM REFERENZZEITRAUM 1961 – 1990
16	1B	BANDBREITE DER ÄNDERUNGEN FÜR VERSCHIEDENE ATMOSPHERISCHE GRÖßEN IM ZEITRAUM <i>FERNE ZUKUNFT</i> (2070 – 2099) IM VERGLEICH ZUM REFERENZZEITRAUM 1961 – 1990
20	2	BANDBREITE DER ÄNDERUNGEN FÜR VERSCHIEDENE OZEANISCHE PARAMETER IN DEN ZEITRÄUMEN <i>NAHE ZUKUNFT</i> (2021 – 2050) UND <i>FERNE ZUKUNFT</i> (2070 – 2099) IM VERGLEICH ZU DEM ZEITRAUM 1961 -1990

Seite

Abbildung

## Abbildungsverzeichnis

12	1	SCHEMATISCHES DIAGRAMM ZUR BEZIEHUNG ZWISCHEN DER BETROFFENHEIT MENSCHLICHER AKTIVITÄTEN UND DER ZEITABHÄNGIGKEIT VON KLIMATISCHEN VERÄNDERUNGEN
15	2A	BANDBREITEN DER ÄNDERUNGSSIGNALE AUS TABELLE 1B IN DER <i>NAHEN ZUKUNFT</i> : ENSEMBLES (BLAU), GEKOPPELTEN MODELLE (ROT)
17	2B	BANDBREITEN DER ÄNDERUNGSSIGNALE AUS TABELLE 1B IN DER <i>FERNEN ZUKUNFT</i> . ENSEMBLES (BLAU), GEKOPPELTE MODELLE (ROT)
19	3	VORZEICHEN UND SIGNIFIKANZ DER TRENDS JÄHRLICHER WINDRICHTUNGSHÄUFIGKEITEN IN DEN TEILGEBIETEN DER NORDSEE FÜR DEN ZEITRAUM 1961 -2100, BERECHNET MIT SECHS VERSCHIEDENEN MODELLKETTEN AUS GLOBALEN UND REGIONALEN KLIMAMODELLEN
21	4	BANDBREITEN DER DREI GEKOPPELTEN KLIMAMODELLERGEBNISSE FÜR ÄNDERUNGEN DES MITTLEREN SALZGEHALTS AN DER OBERFLÄCHE (LINKS) UND DER MITTLEREN WASSERTEMPERATUR
23	5	ÄNDERUNG DES 99. PERZENTILS DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE (SWH) IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1961-1990 IM MODELL REMO UND DMI-HIRHAM FÜR DIE PERIODEN 2011-2040, 2041-2070 UND 2071-2100
24	6	BANDBREITEN DER DREI GEKOPPELTEN KLIMAMODELLERGEBNISSE FÜR ÄNDERUNGEN DES MITTLEREN MEERESSPIEGELS

# 1 Kurzfassung

Das KLIWAS Projekt 3.01 wurde in einer Kooperation des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und des Deutschen Wetterdienstes (DWD), Seewetteramt Hamburg durchgeführt. Es hat das Ziel, mögliche Betroffenheiten der Schifffahrt und aller anderen marinen Aktivitäten auf der Nordsee aufzuzeigen und die relevanten physikalischen Parameter der Atmosphäre und des Meeres in übersichtlicher Form darzustellen. Dabei stützt es sich auf die Ergebnisse, die in den Projekten 1.03 und 2.01 mithilfe von Modellierungen und Modellanalysen erarbeitet worden sind.

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.

Der Schiffsverkehr auf der Nordsee umfasst alle vorkommenden Arten und Größen von Fahrzeugen. Während die Anzahl der Sportboote in der Nordsee eher klein ist, wird deren Klasse der kleineren Fahrzeuge eher von der Küstenfischerei beherrscht. Der obere Rand der Größenklassen reicht bis zu Containerschiffen von 400 m Länge und 16 m Tiefgang. Der Umfang der Größenklassen ergibt einen sehr unterschiedlichen Grad an Betroffenheit und erfordert deshalb Informationen über die gesamte Spannweite der physikalischen Zustandsgrößen.

Die neuen wirtschaftlichen Aktivitäten auf den Meeren, in der Deutschen Bucht insbesondere der Ausbau der Offshore - Windenergie, haben mittlerweile das Spektrum des klimatologischen Informationsbedarfs erweitert. Für die ökonomische Planung eines Windparks sind die langfristigen möglichen Windausbeuten von Interesse. Die Standsicherheit der Bauwerke hängt sowohl vom Niveau der mittleren Veränderungen als auch von den Extremen ab. Für den Baubetrieb von Windparks, das Verlegen von Kabeln, die Materialversorgung und den Wartungsverkehr sind die sogenannten Wetterfenster, d.h. Phasen von atmosphärischen und ozeanographischen Zuständen, die einen sicheren Arbeitsbetrieb zulassen, von Bedeutung.

Die hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf das Klimaszenario A1B. Die atmosphärischen Parameter wurden aus den ungekoppelten regionalen Klimaprojektionen des Projektes ENSEMBLES und den im KLIWAS - Projekt 2.01 entwickelten regional gekoppelten Klimaprojektionen extrahiert. Für die ozeanischen Parameter wurden nur die regional gekoppelten Projektionen ausgewertet. Dargestellt werden die Ergebnisse für die „nahe Zukunft“ (2021 - 2050) und die „ferne Zukunft“ (2070 -



2099). Es wird darauf hingewiesen, dass die natürliche dekadische Variabilität der Klimagrößen einen großen Einfluss auf das Klimageschehen in der Nordsee hat. Trends der meisten atmosphärischen und ozeanographischen Parameter bis zum Jahr 2100 sind nur sehr schwach und nicht signifikant.

- **Ergebnisse**

Die modellierte Strahlungsbilanz bis zum Jahr 2100 weist deutlich auf eine Erwärmung der Atmosphäre hin. Demzufolge steigt die bodennahe Jahresdurchschnittstemperatur. In der nahen Zukunft steigt sie im Mittel um  $1,0 \pm 0,5 \text{ K}^1$  gegenüber dem Referenzzeitraum 1961-1990 an, in der fernen Zukunft mit einer Bandbreite um  $\pm 1 \text{ K}$  um durchschnittlich 2,5 K. Der etwas niedrigere Wert der gekoppelten Projektionen liegt am Einfluss der realistischeren Wassertemperaturen.

Die Wolkenbedeckung liegt bei gekoppelter Modellierung in der nahen Zukunft nahezu auf dem heutigen Niveau, in der fernen Zukunft kann sie in den Sommermonaten bis zu 7 % höher sein als im Referenzzeitraum, im Mittel 2-3%. Dementsprechend liegen die Änderungen der Niederschläge auf See in der nahen Zukunft im Durchschnitt bei + 2% und in der fernen Zukunft bei +10 bis +15%, allerdings mit einer großen Bandbreite. In ENSEMBLES sind die Änderungen indifferent, mit Bandbreiten über und unter null.

Bei den Geschwindigkeiten des bodennahen Windes (10m) zeigt sich in der nahen und fernen Zukunft ein sehr indifferentes Bild. Bei sehr geringen Änderungen der Windgeschwindigkeit reichen die Bandbreiten für alle Jahreszeiten in den positiven und negativen Bereich. Die Untersuchungen zu den Windrichtungen ergeben ebenfalls ein sehr indifferentes Bild, allerdings mit einer leichten Tendenz zu mehr westlichen anstatt nordwestlichen Richtungen. Signifikante Änderungen beim Sturmflutpotential ließen sich nicht feststellen. Für alle Parameter des Windes gilt, dass die dekadische Variabilität eine prägende Rolle spielt.

Die möglicherweise geringfügigen Änderungen in der Windrichtung haben allerdings größere Auswirkungen auf den Seegang. In der westlichen Nordsee wird die signifikante Wellenhöhe (SWH) um ca. 10% abnehmen, in der östlichen Nordsee um ca. 8% zunehmen. In der Folge verändern sich auch die maximalen Wellenhöhen, -8% in der westlichen und +5% in östlichen Nordsee. Bei den für den Bau und den Betrieb von Windparks wichtigen Schönwetterfenstern deuten sich keine Änderungen an. Wie beim Wind spielt auch beim Seegang die dekadische Variabilität eine große Rolle.

Die Oberflächentemperatur des Meerwassers entwickelt sich entsprechend der Lufttemperatur. Für die nahe Zukunft wird ein Anstieg um ca. 1,4 K relativ zum Referenzzeitraum projiziert, für die ferne Zukunft um ca. 2,5 K.

---

<sup>1</sup> Temperaturdifferenzen werden stets in Kelvin [K] angegeben. 1K entspricht 1°C.

Aufgrund der vermehrten Niederschläge auf See, einem erhöhten Süßwassereintrag und dem Einfluss eines weniger salzigen Nordatlantiks wird der Salzgehalt in der Nordsee erst kaum, dann geringfügig mehr abnehmen ( $-0,25 \text{ psu}^2$ ).

Insbesondere die Veränderungen des physikalischen und biogeochemischen Zustandes des Nordost-Atlantiks können zu spürbaren Modifikationen der ozeanischen Dynamik und trophischen Situation in der Nordsee führen. Dessen stabilere Deckschicht in Verbindung mit einem verringerten Einstrom von Atlantikwasser in die Nordsee kann zu Auswirkungen auf die sedimentologischen und biologischen Transportprozesse führen. Die erhöhten Wassertemperaturen werden die bereits beobachtete Einwanderung wärmeliebender Arten und Abwanderung kälteliebender Arten verstärken.

Der eigene Beitrag der Nordsee zum Meeresspiegelanstieg beschränkt sich auf die - sehr geringe- Volumenzunahme durch die Temperaturerhöhung des Meerwassers. Der Hauptbeitrag zum Anstieg in der Nordsee wird in den Ozeanen generiert und in die Nordsee transferiert. Die Erwärmung der Ozeane und Veränderungen in den Windsystemen und Meeresströmungen des Nordatlantiks führen in der nahen Zukunft zu einer Erhöhung um einige wenige Zentimeter, in der fernen Zukunft um knapp 30 Zentimeter. Es wird darauf hingewiesen, dass es große Unsicherheiten in der Prognose gibt, weil die Beiträge durch Eisverluste insbesondere von Grönland und der Antarktis noch nicht verlässlich ermittelt werden können. Der jüngste Bericht des IPCC gibt einen Wert von maximal knapp einem Meter an, der allerdings auch noch Unsicherheiten beinhaltet.

- **Zusammenfassung**

Zusammenfassend ist zu erklären, dass unter der Voraussetzung des Eintretens des Treibhausgasszenarios A1B die physikalischen Veränderungen von Meer und Atmosphäre im Klimawandel, wie zum Beispiel Wind und Seegang, nicht zu neuen Problemen für die Schifffahrt auf der Nordsee führen werden. Bedeutend werden die Auswirkungen auf die Ökologie der Nordsee sein, u.a. wegen einer Verbesserung der Überlebensbedingungen von Arten, die durch Ballastwasser eingeschleppt werden. Die Auswirkungen auf die Küsten und die küstennahe Schifffahrt und deren Infrastruktur zu untersuchen war nicht Bestandteil des Projektes 3.01. Die Ergebnisse wurden jedoch in den diesbezüglichen KLIWAS - Projekten verwendet.

KLIWAS hat sich im Wesentlichen mit den möglichen trendartigen mittleren Veränderungen über und in der Nordsee bis zum Ende des Jahrhunderts beschäftigt. Im Laufe der Untersuchungen hat sich jedoch herausgestellt, dass die Schwankungen in den klimatischen Parametern stark von einer dekadischen Variabilität dominiert werden, die von einer Kategorisierung in eine „nahe Zukunft“ und eine „ferne Zukunft“ ungenau beschrieben wird. Da die in KLIWAS regional gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Klimamodelle erst gegen Ende des Förderungszeitraums vertrauenswür-

---

<sup>2</sup> practical salinity unit

dig funktionsfähig waren, ließen sich tiefer gehende Auswertungen z.B. zur dekadi-  
schen Variabilität und zu Extremwerten nicht mehr durchführen.

## 2 Ziele

Alle Arten von Seeschifffahrt - Handelsschifffahrt, Marine, Fischerei, Sportschifffahrt, u. a. - sind von den physikalischen Zuständen der Atmosphäre und des Meeres beeinflusst. Bei der Planung von KLIWAS standen deshalb die Auswirkungen des durch den zukünftigen Klimawandel veränderten Zustands von Atmosphäre und Ozean im Fokus des Vorhabens. Es war zu vermuten, dass eine Erwärmung der Meere in einem Nebenmeer wie die Nordsee, das im Lee des Nordatlantiks liegt, sowohl die Ausläufer der dortigen Veränderungen, wie auch jene, die sich lokal entwickeln, in besonderem Maße zu spüren bekommt.

Der Schiffsverkehr auf der Nordsee umfasst alle vorkommenden Arten und Größen von Fahrzeugen. Während die Anzahl der Sportboote in der Nordsee eher klein ist, wird deren Klasse der kleineren Fahrzeuge eher von der Küstenfischerei beherrscht. Der obere Rand der Größenklassen reicht bis zu Containerschiffen von 400 m Länge und 16 m Tiefgang. Der Umfang der Größenklassen ergibt einen sehr unterschiedlichen Grad an Betroffenheit und erfordert deshalb Informationen über die gesamte Spannweite der physikalischen Zustandsgrößen.

Die neuen wirtschaftlichen Aktivitäten auf den Meeren, in der Deutschen Bucht insbesondere der Ausbau der Offshore Windenergie, haben mittlerweile das Spektrum des klimatologischen Informationsbedarfs erweitert. Für die ökonomische Planung eines Windparks sind die langfristigen möglichen Windausbeuten von Interesse. Die Standsicherheit der Bauwerke hängt sowohl vom Niveau der mittleren Veränderungen als auch von den Extremen ab. Für den Baubetrieb von Windparks, das Verlegen von Kabeln, die Materialversorgung und den Wartungsverkehr sind die sogenannten Wetterfenster, d.h. Phasen von atmosphärischen und ozeanographischen Zuständen, die einen sicheren Arbeitsbetrieb zulassen, von Bedeutung.

In diesem Bericht zum Teilprojekt 3.01 werden die vom Klimawandel betroffenen Wirtschaftssektoren vorgestellt. Anschließend werden für den Nutzer der Nordsee die in den Teilprojekten 1.03 und 2.01 erarbeiteten wissenschaftlichen Ergebnisse über zu erwartende klimabedingte Veränderungen der physikalischen Zustandsgrößen bis zum Jahr 2100 präsentiert. Sie sind zwar für die Schifffahrt weniger relevant, jedoch für alle anderen Arten von Offshore - Aktivitäten. Sie haben ebenso Folgen für die ökologische Zukunft der Nordsee und wirken auf die angrenzenden Küstengebiete und Ästuare. Die in diesem Teilprojekt dargestellten Ergebnisse haben deshalb ebenfalls eine Relevanz für den Küstenschutz, die küstennahe Schifffahrt und deren Infrastruktureinrichtungen, die Fischerei und den Tourismus.

## 3 Atmosphärische und ozeanographische Zustandsgrößen: Betroffenheiten

### 3.1 Stand der Forschung

Publizierte Auswertungen von Klimaprojektionen hinsichtlich der Betroffenheit schifffahrtsrelevanter Größen für die Nordsee liegen in sehr begrenztem Umfang vor (z.B. Sterr, 1997). Hingegen gibt es eine umfangreiche Anzahl von wissenschaftlichen und journalistischen Publikationen zum Klimawandel landseitig der Küstenlinie, ebenso zu möglichen Veränderungen im Ökosystem Nordsee.

Es ist davon auszugehen, dass im Rahmen des Ausbaus der Offshore Windenergie von der Wirtschaft Abschätzungen der Klimaentwicklung im Nordseeraum vorgenommen worden sind. Jedoch sind diese nicht publiziert.

### 3.2 Methoden

Die Methoden zur Erarbeitung der meteorologischen und ozeanographischen Zustandsgrößen sind in den Teilprojekten 1.03 und 2.01 dargestellt.

### 3.3 Physikalische Größen und Betroffenheiten

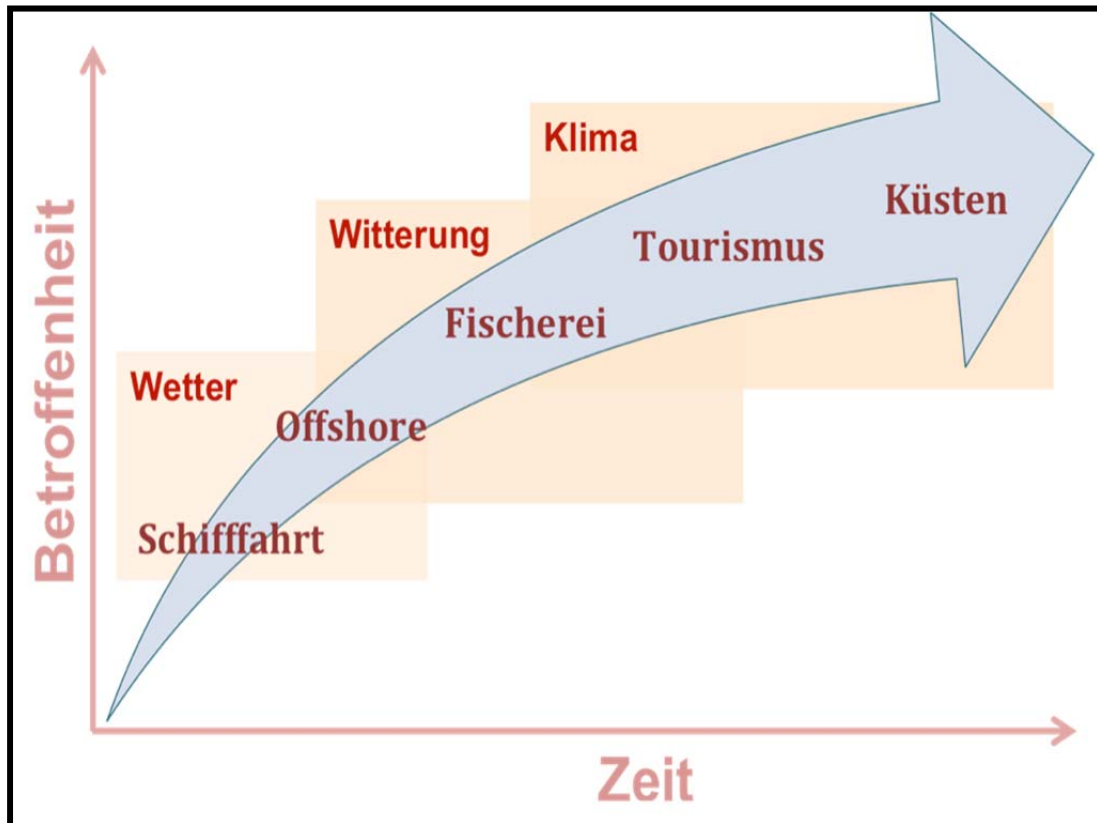
Schifffahrt, Offshore Wirtschaft, Fischerei, Tourismus, Ökologie und die Küsten sind in erster Linie von den Größen Seegang, Stürme, vertikaler Aufbau sowie Dynamik des Wasserkörpers, der Salzgehalt und der Meeresspiegelanstieg betroffen. Diese bestimmen das Geschehen auf der Nordsee. Die treibenden meteorologischen Größen sind dabei die Temperatur und der Wind. Das Ansteigen des Meeresspiegels wird gegenwärtig noch hauptsächlich über die zunehmenden Temperaturen der Weltozeane gesteuert, im Laufe des Jahrhunderts werden jedoch die Eisverluste auf Grönland und der Antarktis eine immer bedeutendere Rolle spielen. Abbildung 1 stellt in einem Diagramm die zeitlichen Skalen der klimatologischen Informationsbedürfnisse, den Grad der Betroffenheit und Vorlaufzeiten für Anpassungen schematisch dar.

- **Die Schiffbarkeit der Nordsee** ist im Wesentlichen kaum von Klimaveränderungen betroffen, da Schifffahrt in allen Klimazonen der Erde und unter fast allen Wetterbedingungen stattfindet. Es ist davon auszugehen, dass es grundsätzlich keine anderen Klimate und Wetterbedingungen als die existierenden geben werden wird. Eventuell ist mit veränderten regionalen Ausdehnungen von Klima- und Wetterzonen zu rechnen. Die Arbeiten zum Teilprojekt 2.01 haben gezeigt, dass die Nordsee in der temperierten Westwindzone verbleiben

wird, mit leichten Modifikationen, die für die Schifffahrt eher keine Rolle spielen werden. Schifffahrt in der Nordsee ist im Wesentlichen, je nach Größe des Fahrzeugs und seinen Aufgaben, vom Wetter abhängig und dieses wird aller Wahrscheinlichkeit nach so bleiben. Auflagen für die Schifffahrt in der Nordsee können jedoch aus globalen und regionalen Auflagen zum Klima- und Umweltschutz resultieren oder durch neue Schiffrouten notwendig werden.

- **Offshore Windenergie** benötigt für Planung und Betrieb meteorologische und ozeanographische Informationen auf kurzen und langen Zeitskalen. Für den Baubetrieb von Windparks, das Verlegen von Kabeln, die Materialversorgung und den Wartungsverkehr sind aktuelle Situationsbeschreibungen sowie Kurzfristvorhersagen zu Wetterfenstern, d.h. Phasen von atmosphärischen und ozeanographischen Zuständen, die einen sicheren Arbeitsbetrieb zulassen, von Bedeutung. Da Wind regional und zeitlich sehr unterschiedlich auftritt, werden für die Produktion von Strom mittelfristige Vorhersagen benötigt. Für die ökonomische Planung eines Windparks sind die langfristigen möglichen Windausbeuten von Interesse. Die Standsicherheit der Bauwerke hängt sowohl vom Niveau der langfristigen mittleren Veränderungen als auch von den kurzzeitigen Extremen ab.
- **Fischerei** ist sowohl nautisch als auch ökologisch vom Klimawandel betroffen. Die Ausfahrt in die Fanggebiete benötigt kurz- bis mittelfristige Wettervorhersagen, die darüber entscheiden, ob ein Fang im Zielgebiet möglich ist. Die langsamen Veränderungen in der Wassertemperatur und der Dynamik haben Einfluss auf den trophischen Zustand der Nordsee, auf das Spektrum kommerzieller Arten, auf die Aufenthaltsorte der Bestände, auf den Transport von Larven, u.v.m..
- **Tourismus** findet weniger auf der offenen Nordsee als an der Küste statt. Tourismus benötigt klimatologische Informationen auf allen Zeitskalen. Da Kurzurlaube an der Küste immer häufiger werden, sind Wettervorhersagen von großer Bedeutung. Längere und daher längerfristig vorbereitete Urlaube richten sich häufig nach einem erwarteten, allerdings vermuteten Wetter in einer bestimmten Jahreszeit. Das Tourismusmanagement benötigt für die Planung und den Ausbau von Übernachtungskapazitäten, Restaurationsbetrieben und Entertainment längerfristige Klimainformationen, insbesondere zur Entwicklung von Luft- und Wassertemperatur, den Hauptattraktoren für Tourismus.
- **Siedeln und Wirtschaften** an den Küsten wird in der Regel durch Veränderungen auf längeren Zeitskalen beeinflusst. Die wesentlichen Faktoren sind zum einen die Entwicklung des Sturmflutpotentials und die Geschwindigkeit und Ausmaß des Meeresspiegelanstiegs. Beides sind an der flachen Nordseeküste die entscheidenden Größen, da sie den Küstenschutz, die Besiedlung

und Nutzung des Küstenraums, u.a. für Schifffahrt, und die Funktionsfähigkeit der verkehrlichen Infrastruktur bestimmen.



**Abbildung 1: Schematisches Diagramm zur Beziehung zwischen der Betroffenheit menschlicher Aktivitäten und der Zeitabhängigkeit von klimatischen Veränderungen**

**Betroffenheit:** Während die Schifffahrt in der Nordsee durch den Klimawandel wahrscheinlich geringfügig betroffen sein wird, sind die Betroffenheiten an den Küsten wahrscheinlich am größten. Schifffahrt ist eher auf aktuelle und kurzfristige Wetterinformationen angewiesen. An den Küsten hingegen sind eine Vielzahl und komplexe Siedlungs-, Infra- und Wirtschaftsstrukturen betroffen.

**Zeit:** Die Veränderungen physikalischer Parameter durch den Klimawandel vollziehen sich eher langsam. D. h., der zeitliche Trend der mittleren Veränderungen meteorologischer und ozeanographischer Parameter verläuft relativ flach, so dass die Planung und Durchführung von Anpassungsmaßnahmen in den verschiedenen Betroffenheitsbereichen Schritt halten können.

## 4 Ergebnisse und Kernaussagen

In diesem Kapitel werden die Kernaussagen zu den Ergebnissen der atmosphärischen und ozeanographischen Parameter dargestellt, die in den Teilprojekten 1.03 und 2.03 erarbeitet worden sind.

### **4.1 Bandbreiten: Ungekoppelte vs. Gekoppelte regionale Klimaprojektionen für die Nordsee**

Die Bandbreite der atmosphärischen regionalen Modellergebnisse wird maßgeblich von den verwendeten globalen Muttermodellen der Regionalmodelle (RCM) bestimmt.

Die Validierungsläufe der gekoppelten Modelle reproduzieren die heutigen physikalischen Verhältnisse in der Nordsee deutlich besser als die ungekoppelten. Dies bestätigt, dass die gekoppelten Modelle physikalisch sinnvolle Ergebnisse produzieren

### **4.2 Atmosphärische Parameter**

Die Ergebnisse für die atmosphärischen Größen der gekoppelten Modelle überdecken teilweise die Bandbreiten, die sich aus den ungekoppelten Ergebnissen des ENSEMBLES Projekts ergeben.

In den Tabellen 1a und 1b sind die Änderungen der atmosphärischen Parameter in der nahen (2021 – 2050) und fernen Zukunft (2070 – 2099) im Verhältnis zum Zeitraum 1961 - 2000 aufgelistet. Die Abb. 2a und 2b stellen jeweils die Abweichungen graphisch dar.



**Tabelle 1a: 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.**

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 <sup>2</sup> ]		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 <sup>2</sup> ]	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

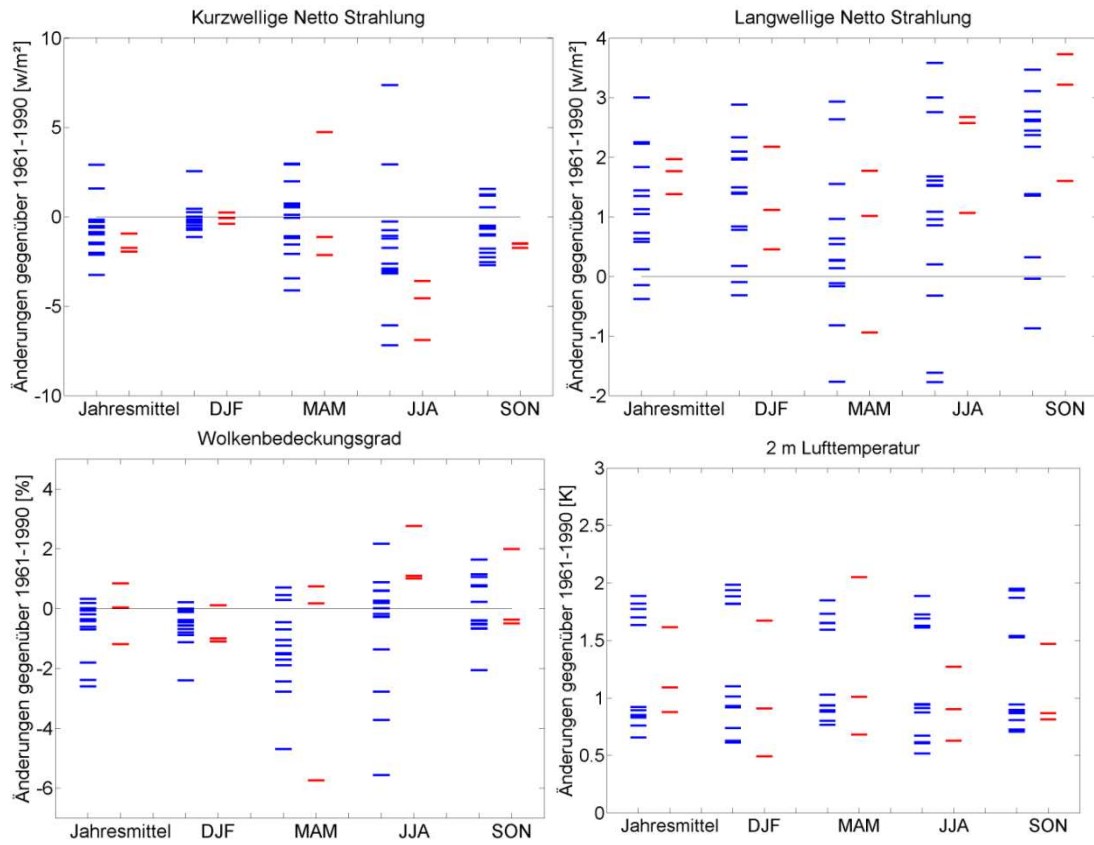
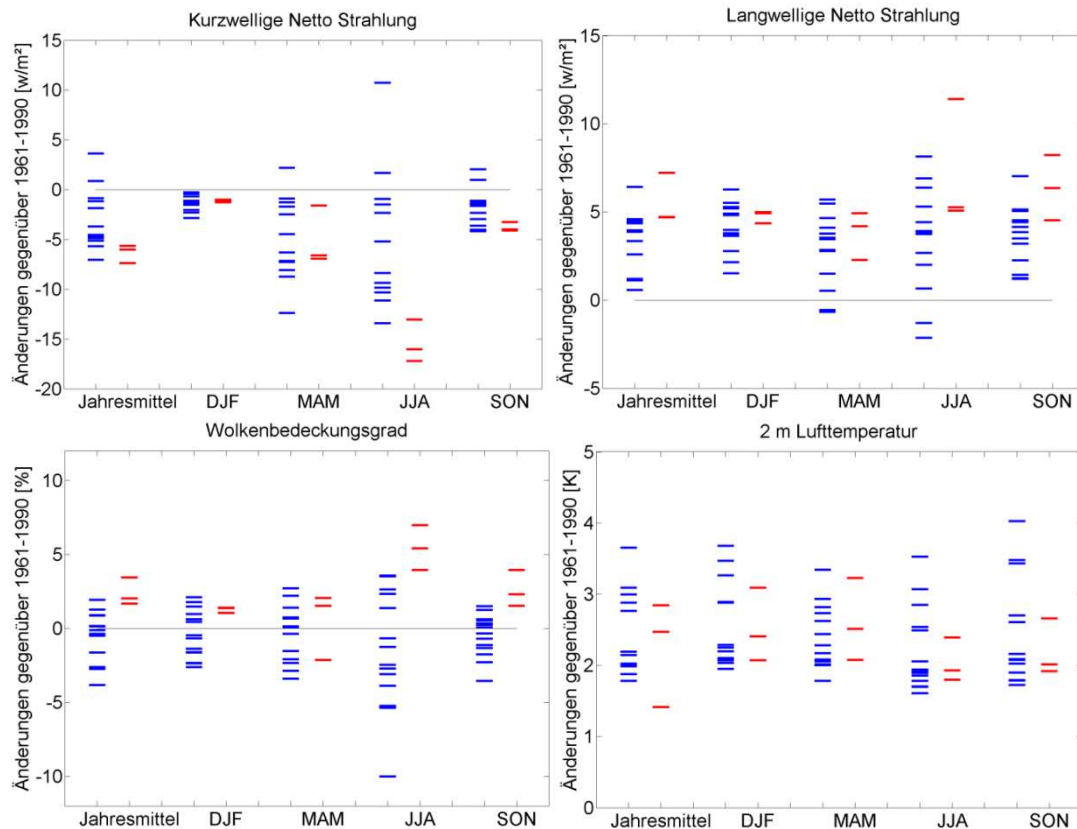


Abbildung 2a: Bandbreiten der Änderungssignale aus Tabelle 1b in der *nahen Zukunft*: **EN-SEMBLES (blau)**, **gekoppelten Modelle (rot)**.

**Tabelle 1b: 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
	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
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 <sup>2</sup> ]		Jahresmittel	-7,0 bis 3,6
	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 <sup>2</sup> ]	Jahresmittel	0,6 bis 6,4
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



**Abbildung 2b: Bandbreiten der Änderungssignale aus Tabelle 1b in der *fernen Zukunft*. ENSEMBLES (blau), gekoppelte Modelle (rot)**

- **Kurzwellige Nettostrahlung**

Aus der Differenz zwischen absorbiertes kurzwelliger Globalstrahlung und effektiver Ausstrahlung ergibt sich die Nettostrahlung. Die kurzwellige Nettostrahlung ist ein Maß für den Rückhalt von Strahlung in der Atmosphäre. Negative Werte können z.B. durch eine Zunahme von niedrigen Wolken verursacht werden.

Die Bandbreite der Änderung der mittleren kurzwelligen Nettostrahlung ist in den gekoppelten Modellen deutlich fokussierter als in den ungekoppelten. Die Änderungen sind in den gekoppelten Ergebnissen auch deutlich negativer als in den ungekoppelten.

Saisonal gibt es deutliche Unterschiede. Im Frühjahr (MAM) und Sommer (JJA) sind die Bandbreiten der Änderungen in der nahen Zukunft und fernen Zukunft deutlich größer als in den übrigen Jahreszeiten. In der fernen Zukunft (Abb. 2b, ob.li.) sind die Zunahmen bis mehr als doppelt so hoch wie in der nahen Zukunft (Abb. 2a, ob.li.)

- **Langwellige Nettostrahlung**

Die langwellige Nettostrahlung ist ein Maß für den Verbleib von z.B. vom Ozean und der Landoberfläche abgestrahlter Wärme in der Atmosphäre.

Im Gegensatz zu den ungekoppelten Ergebnissen liegen in den gekoppelten die Werte zum einen deutlich über null und nehmen eine deutlich geringere Bandbreite ein. In der fernen Zukunft (Abb. 2b, ob.re.) sind die Zunahmen doppelt so hoch wie in der nahen Zukunft (Abb. 2a, ob.re.).

- **Wolkenbedeckungsgrad**

Die Ergebnisse der gekoppelten Modellierungen liegen sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft über den Werten der Gegenwart. Während in der nahen Zukunft (Abb. 2a, un.li.) eine Steigerung im Mittel um 2% ermittelt wurde, steigen die Werte in der fernen Zukunft (Abb. 2b, un.li.) um bis zu 10% in den Sommermonaten an.

In den ungekoppelten Modellierungen stellen die Werte eine deutlich größere Bandbreite dar, mit Abweichungen in positive und negative Richtung.

- **Lufttemperatur in 2m Höhe**

Die bodennahe Lufttemperatur ist ein bestimmender Faktor für nahezu viele physikalische und alle biologischen Vorgänge auf der Erde und im Ozean.

Grundsätzlich sind die Bandbreiten der gekoppelten Modellierungen enger als die der ungekoppelten. Im Jahresmittel sind, bedingt durch die Wechselwirkungen mit dem Meerwasser, die gekoppelt ermittelten Werte niedriger als die ungekoppelten, sowohl in der nahen (Abb. 2a, un.re.), als auch in der fernen Zukunft (Abb. 2b, un.re.). Aus allen Modellergebnissen wird eine Zunahme der mittleren Temperatur berechnet (Tab. 1a, Tab. 2a). Die saisonalen Mittel weisen keine deutlichen Unterschiede zu den Jahresmittelwerten auf. Nur für das Frühjahr März bis Mai (MAM) ergaben sich geringe Zunahmen der Bandbreite in der fernen Zukunft im Vergleich zur Änderung der Bandbreite des Jahresmittels. Im Jahresmittel (gekoppelt) steigt die Temperatur in der nahen Zukunft um  $1,3 (\pm 0,3)^\circ\text{C}$ , in der fernen Zukunft um  $2,1 (\pm 0,7)^\circ\text{C}$ .

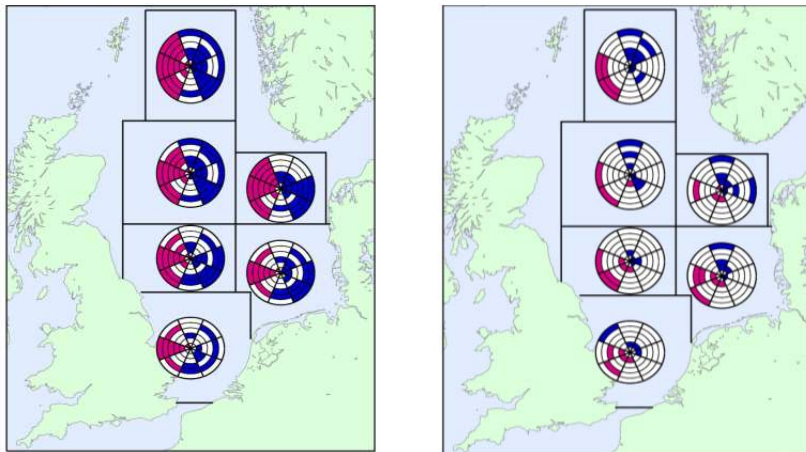
- **Windrichtungen und Mittlere Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe**

Der Wind in 10 m Höhe über der Meeresoberfläche ist eine bestimmende Größe für den Seegang und für den Antrieb von Meeresströmungen.

Gekoppelte und ungekoppelte Modellierungen zeigen ähnliche Ergebnisse. Insgesamt sind die Änderungen zum Referenzzeitraum sehr gering. Sie streuen geringfügig um den Wert null. Allein in den Wintermonaten der fernen Zukunft zeigen die gekoppelten Modelle eine leichte Zunahme des mittleren 10 m-Windes. Die Bandbreiten erklären sich aus der natürlichen dekadischen Variabilität. Ein Trend wird nicht beobachtet.

Die Werte der Windrichtungshäufigkeiten schwanken stark von Jahr zu Jahr. Die 30-jährigen gleitenden Mittel der Häufigkeiten werden von den dekadischen Schwankungen bestimmt, nicht von einem Langzeittrend. Die Ergebnisse der gekoppelten und ungekoppelten Modellierungen unterscheiden sich nicht.

Die Häufigkeit der Windrichtung WEST nimmt in allen Gebieten bei allen Windgeschwindigkeiten in der Mehrzahl der Modellergebnisse zu (Abb. 3, li.). Die Häufigkeiten von Ost und Südost nehmen in den nördlichen Gebieten ab. Für die Häufigkeiten von Windrichtungen, die bei höheren Windgeschwindigkeiten vorkommen, findet man in keinem Gebiete für die Mehrzahl der Modellergebnisse einen von Null verschiedenen signifikanten Trend (Abb. 3, re.).



**Abbildung 3: Windrichtungsverteilungen für alle Windgeschwindigkeiten (links) und Windgeschwindigkeiten größer als das 95. Perzentil (rechts). Vorzeichen und Signifikanz der Trends jährlicher Windrichtungshäufigkeiten in den Teilgebieten der Nordsee für den Zeitraum 1961 - 2100. 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): IPSLCM/REMO, ECHAM5\_1/REMO, MPI-OM/ECHAM5\_3/REMO, ECHAM5\_3/RACMO, ECHAM5\_3/HIRHAM5 und NEMO/ECHAM5\_3/RCA4. Die linke Abbildung zeigt die Windrichtungsverteilungen für alle Windgeschwindigkeiten, die rechte für Windgeschwindigkeiten größer als das 95. Perzentil.**

- **Sturmfluten in der Deutschen Bucht**

Sturmfluten können durch räumlich stark begrenzte Sturmgebiete mit relativ kurzer Durchzugszeit über die Nordsee von weniger als einem Tag 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 der lineare Trend dieser Anzahl. Eine signifikante Änderung der Sturmfluthäufigkeit ist nicht erkennbar.

- **Niederschläge auf See**

Bei der Änderung der Niederschläge sind, wie bei den meisten anderen Parametern, die Bandbreiten aus den gekoppelten Modellierungen zum Teil deutlich geringer als

bei den ungekoppelten. In der nahen Zukunft sind in beiden Modellierungen die saisonalen Bandbreiten sehr unterschiedlich.

Im Jahresmittel zeigen die ungekoppelten Ergebnisse der nahen Zukunft eine leichte Zunahme der Niederschläge an, die gekoppelten eine nicht eindeutige Situation, mit einer leicht abnehmenden Tendenz (-1,4 ( $\pm 3,5$ )%). In der fernen Zukunft ergeben die ungekoppelten Ergebnisse in den Jahreszeiten zum Teil sehr große Bandbreiten, die weit in den negativen und positiven Bereich hinein reichen. Die gekoppelten Ergebnisse zeigen nahezu durchgehend eine leicht höhere Niederschlagsneigung im Bezug auf den Referenzzeitraum (+7,6 ( $\pm 2,6$ )%).

### 4.3 Ozeanische Parameter

Die Ergebnisse des EU-Projektes ENSEMBLES umfassen nur die atmosphärischen Parameter. Die ozeanischen Parameter, bis auf den Seegang, sind Produkte aus den in KLIWAS entwickelten gekoppelten Modellierungen. Seegang wurde aus Winddaten des ENSEMBLES - Projektes berechnet. Die Bandbreiten für die nahe und die ferne Zukunft sind in Tabelle 2 aufgelistet und in Abb. 4 grafisch dargestellt.

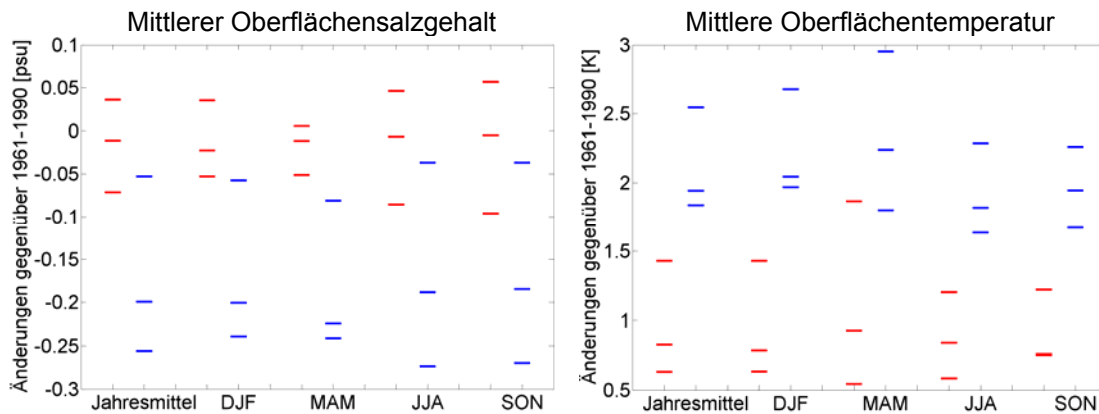
**Tabelle 2: Bandbreite der Änderungen für verschiedene ozeanische Parameter in den Zeiträumen nahe Zukunft (2021 – 2050) und ferne Zukunft (2070 – 2099) im Vergleich zu dem Zeitraum 1961 - 1990. Die ozeanischen Größen wurden gemittelt über dem Gebiet der Nordsee.**

Parameter	Zeitraum	Bandbreite	
		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

- **Wasseroberflächentemperaturen**

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.



**Abbildung 4: Bandbreiten der drei gekoppelten Klimamodellergebnisse für Änderungen des mittleren Salzgehalts an der Oberfläche (links) und der mittleren Wassertemperatur. Dargestellt sind Jahresmittel sowie saisonale Mittel für die nahe Zukunft (rot) und ferne Zukunft (blau).**

- **Salzgehalt**

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 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 beeinflusst.

- **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.



- **Seegang**

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Seegang entstammen ungekoppelten Modellierungen. Für eine Analyse des heutigen mittleren und extremen Seegangs sowie den zu erwartenden zukünftigen Änderungen wurde der Zeitraum von 1961 - 2100 in vier 30-Jahres-Perioden aufgeteilt: als Referenzperiode der Zeitraum 1961 - 1990, die Perioden 2011 - 2040, 2041 - 2070 sowie 2071 - 2100 geben die entsprechenden künftigen Zustände in den Klimaläufen wieder.

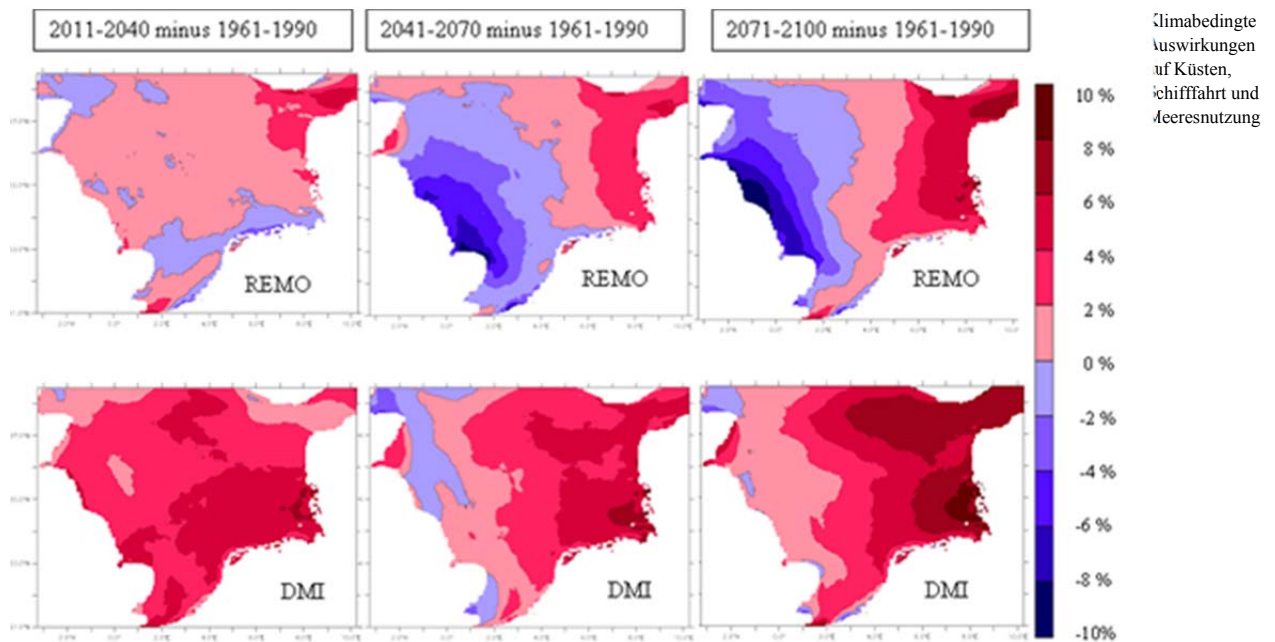
Betrachtet wurden von der signifikanten Wellenhöhe (SWH) deren Mittel und deren 99. Perzentil (höchsten Werte; Abb. 5).

Für die mittlere SWH und deren 99. Perzentil zeigt sich für die westliche Nordsee bis zum Ende des Jahrhunderts im Jahresmittel eine abnehmende Tendenz (maximal bis -10%), für die östliche Nordsee, und damit für die deutsche Bucht, im Jahresmittel eine zunehmende Tendenz (maximal bis +10%). In den verschiedenen Jahreszeiten können die Extremwerte einige Prozent höher oder niedriger sein.

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. In der nördlichen Nordsee werden keine signifikanten Änderungen erwartet. Allerdings gibt es auch hier starke dekadische Schwankungen.

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

Eine Prozessstudie zum Einfluss eines um einen Meter erhöhten Meeresspiegels auf die Wellenhöhe liefert folgendes Bild: Bei Wassertiefen geringer als 8 – 10 m im Bereich der östlichen Nordsee würde die Wellenhöhe um weitere 20 – 40 cm ansteigen, in sehr eng begrenzten Gebieten kann es sogar ein Meter werden. In der zentralen und nördlichen Nordsee hätte ein Meeresspiegelanstieg um einen Meter wegen der größeren Wassertiefen keinen Effekt. Bei den Wellenrichtungen sind keine relevanten Änderungen sichtbar.



Klimabedingte  
Auswirkungen  
auf Küsten,  
Schifffahrt und  
Meeresnutzung

Abbildung 5: 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).

- **Meeresspiegel**

Die temperaturabhängigen (sterisch) Anteile am Meeresspiegelanstieg sowie die Änderungen, die sich aus veränderten Wind- und Strömungsverhältnissen ergeben (dynamisch), sind in allen drei Modellen sehr einheitlich simuliert, da sie stark vom Meeresspiegelanstieg im angrenzenden Atlantik bestimmt sind. Interne Änderungen in der Nordsee sind gering.

Der sterisch/dynamische Beitrag zum Meeresspiegelanstieg beträgt in der nahen Zukunft nur wenige Zentimeter, in der fernen Zukunft 24 bis 28 cm (Abb. 6).

Es besteht das Potential für einen leichten zusätzlichen Anstieg des atmosphärisch induzierten Anteils des Meeresspiegelanstiegs, der 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 sowie deren Auswirkungen auf die Anziehungskräfte (finger-print) noch nicht verlässlich abgeschätzt werden können. (Ein großer Eisverlust von einem der Eisschilde würde den Meeresspiegel auf der Eis verlierenden Seite fallen und auf der entgegengesetzten Erdhalbkugel ansteigen lassen.)

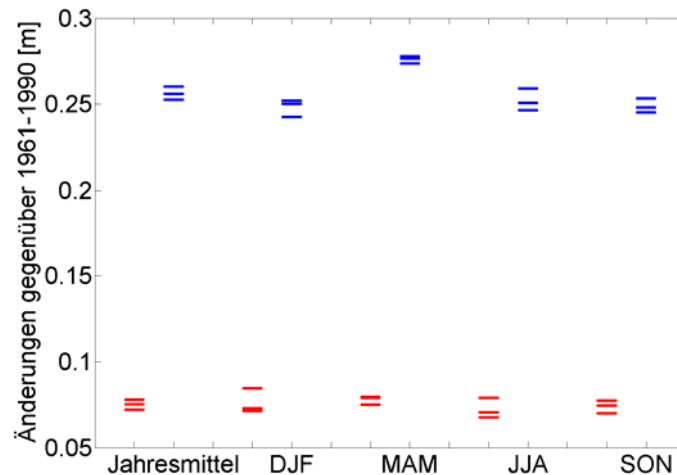


Abbildung 6: Bandbreiten der drei gekoppelten Klimamodellerggebnisse für Änderungen des mittleren Meeresspiegels an der Oberfläche in [m] . Dargestellt sind Jahresmittel sowie saisonale Mittel für die nahe (rot) und ferne Zukunft (blau).

#### 4.4 **Einschätzung zum Grad der Betroffenheit des Systems Wasserstraße, des operativen Geschäfts der WSV im Geschäftsbereich des BMVI sowie für andere Meeresnutzungen**

- **Schifffahrt und Offshore-Wirtschaft**

Die für die nahe und ferne Zukunft projizierten Änderungen der atmosphärischen und ozeanographischen Parameter lassen für die Schifffahrt und Offshore-Wirtschaft (ohne Fischerei) in der Nordsee geringe Veränderungen erwarten.

Aus den Untersuchungen zu Windstärken und –richtungen sowie zur Häufigkeit von Sturmfluten ergeben sich keine signifikanten Änderungen für die nahe und die ferne Zukunft. Auch unter Berücksichtigung der hohen dekadischen Schwankungen der einzelnen Parameter lässt sich zurzeit aus dem Szenario A1B keine bemerkenswert erhöhte Betroffenheit des Systems ableiten.

Die für die nahe und ferne Zukunft projizierten Änderungen der Seegangsverhältnisse in der östlichen Nordsee, und hier vor allem in der Deutschen Bucht, zeigen allerdings 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 Deutschen 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 ist kein Widerspruch zu oben erwähnten Ergebnissen für die

Windgeschwindigkeit, die keine signifikanten Änderungen aufweisen, da die prognostizierten Seegangänderungen vor allem aus den Windrichtungsänderungen resultieren. Diese bewirken eine deutliche Veränderung der Wirklänge des Windes auf der Meeresoberfläche (Fetch).

Meeresspiegeländerungen, auch in der Nordsee, lassen nur einen geringen Anstieg für die nahe Zukunft erwarten, so dass sich keine erhöhte Betroffenheit für die Küsten ergibt. Änderungen aufgrund des Eisverlusts von Grönland und der Antarktis sind dabei jedoch nicht berücksichtigt, können aber ggf. zu deutlich größeren Änderungen an den Küsten und im Hinterland führen.

Temperaturveränderungen werden in der Nordsee keinen unmittelbaren Effekt auf die Schifffahrt haben. Jedoch können klimabedingt mittelbare (Security) oder unmittelbare (Eisfreiheit) Verlagerungen von Schifffahrtswegen außerhalb der Nordsee zu Auswirkungen auf Logistikketten (Häfen, Binnentransporte) im Nordseeraum führen.

- **Tourismus**

Erhöhte Luft- und Wassertemperaturen sollten sich positiv auf den Tourismus auswirken. Allerdings kann sich, außer in den Sommermonaten, eine verstärkte Neigung zu Niederschlägen einstellen.

- **Fischerei und Ökosystem**

Allerdings kann mit erhöhten Betroffenheiten für den ökologischen Zustand der Nordsee gerechnet werden. Der Temperaturanstieg des Meerwassers wird einen Einfluss auf die Biodiversität haben, dahin gehend, dass wärmeliebende Arten, auch kommerziell nutzbare, in die Nordsee –weiter- einwandern werden und durch z.B. Ballastwasser eingeschleppte Arten sich fest ansiedeln. Eine abgeschwächte Zirkulation im südlichen Teil würde für Änderungen im Sedimenthaushalt und der Ökosystemdynamik führen, was für Küstenschutz, Fischerei etc. von Bedeutung wäre.

## 5 Ausblick

Die im Rahmen des Projekts entstandenen regional gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Klimamodelle zeigen, dass die Kopplung funktioniert und realistische Ergebnisse produziert werden können. Da die Kooperationen zur Durchführung der gekoppelten Läufe erst in der zweiten KLIWAS Phase begonnen haben und die Daten daher erst spät zur Verfügung standen, stehen viele tiefergehende Untersuchungen noch aus und bieten Raum für weiteren methodischen und wissenschaftlichen Fortschritt. Die erfolgreiche Kopplung der Modellkomponenten und die abgeleiteten regionalisierten Klimaprojekten konnten 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 des IPCC Reports Nr. 5 und weiteren Globalmodellen als Antrieb. Es scheint uns wichtig, dass auch die extremen Szenarien simuliert werden, die stärkere Änderungen im Klimasystem hervorrufen können und in den Bereich von nicht-linearen Wechselwirkungen zwischen Systemkomponenten kommen, die z.B. zum unwiderruflichen Abschmelzen der Eisschilde mit entsprechend hohem Anstieg des Meeresspiegels führen.

KLIWAS Meer hat mit der regionalen Koppelung von Ozean-Atmosphäre-Modellen erfolgreich einen neuen Weg in der Anpassung an den Klimawandel eröffnet. Dieser Weg eröffnet die Möglichkeit, die entwickelten Methodiken auf andere Meeresregionen auszuweiten und präzisere Ergebnisse zu erzielen. Von besonderem Interesse für die Seeschifffahrt sind dabei die möglichen Passagen durch den arktischen Ozean, die Auswirkungen auf die Warentransporte und die logistische Infrastruktur an den europäischen Küsten haben können.

## 6 Danksagung

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

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. Coppelae 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.

Bei den gekoppelten Modellierungen erhielten wir eine tatkräftige Unterstützung vom Max-Planck Institut für Meteorologie Hamburg (U. Mikolajewicz und Kollegen), von der Universität Hamburg (T. Pohlmann und Kollegen), vom Climate Service Center Hamburg (D. Jacob und Kollegen) und vom Schwedischen Wetterdienst (M. Meier und Kollegen).

Die Untersuchungen zu den Sturmfluten führten U. Ulbrich und D. Befort vom Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin durch.

Die Untersuchungen zu den Wasserständen führten J. Jensen, S. Dangendorf und C. Mudersbach von der Universität Siegen durch.

Die neue Nordsee-Klimatologie wurde in Zusammenarbeit mit dem BSH und DWD maßgeblich vom ICDC an der Universität Hamburg entwickelt (D. Stammer, R. Sadniki, M. Bersch).

Die Fa. Brockmann Consult, Geesthacht entwickelte in Zusammenarbeit mit dem BSH erstmalig eine Klimatologie ozeanischer Fronten in der Nordsee aus Satellitenbeobachtungen.

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

Weiter danken wir allen Kollegen aus den Referaten WS14 und WS24 des BMVI, aus dem BSH und dem DWD, vor allem denen am Seewetteramt Hamburg, und der



KLIWAS  
Forschungs-  
programm

KLIWAS Koordination an der BfG in Koblenz, die uns während des ganzen Projekts immer wieder unterstützt haben.

Schlussbericht

Dem Wissenschaftlichen Beirat des KLIWAS-Vorhabens, insbesondere Frau Prof. C. Schrumm und Herrn Prof. A. Macke, danken wir für die guten Ratschläge und fachlichen Anregungen.

Projekt 3.01

## 7 Literatur

Es wird auf die Literaturangaben in den Berichten zu den Teilprojekten 1.03 und 2.01 verwiesen.

Sterr, H. (1997): Klimawandel und mögliche Auswirkungen auf die deutsche Nordseeküste.  
[http://www.sdn-web.de/fileadmin/sdn/pdf/themen/klima\\_kueste/th\\_1995-04-14\\_sterr.pdf](http://www.sdn-web.de/fileadmin/sdn/pdf/themen/klima_kueste/th_1995-04-14_sterr.pdf)







**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)**

Kußmaulstraße 17  
76187 Karlsruhe

[www.baw.de](http://www.baw.de)  
[info@baw.de](mailto:info@baw.de)

**Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)**

Bernhard-Nocht-Straße 78  
20359 Hamburg

[www.bsh.de](http://www.bsh.de)  
[posteingang@bsh.de](mailto:posteingang@bsh.de)



**BUNDESAMT FÜR  
SEESCHIFFFAHRT  
UND  
HYDROGRAPHIE**



**Deutscher Wetterdienst (DWD)**

Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach/Main

[www.dwd.de](http://www.dwd.de)  
[info@dwd.de](mailto:info@dwd.de)

**Bundesanstalt für  
Gewässerkunde (BfG)**

Am Mainzer Tor 1  
56068 Koblenz

[www.bafg.de](http://www.bafg.de)  
[posteingang@bafg.de](mailto:posteingang@bafg.de)



**Bundesanstalt für  
Gewässerkunde**

## IMPRESSUM

### Herausgeber:

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

**Redaktion:** KLIWAS-Koordination,  
Bundesanstalt für Gewässerkunde

**Autoren:** Katharina Bülow<sup>1</sup>, Anette Ganske<sup>1</sup>,  
Sabine Hüttli-Kabus<sup>1</sup>, Birgit Klein<sup>1</sup>,  
Holger Klein<sup>1</sup>, Peter Löwe<sup>1</sup>, Jens Möller<sup>1</sup>,  
Nils Schade<sup>1</sup>, Birger Tinz<sup>2</sup>,  
Hartmut Heinrich<sup>1</sup>, Gudrun Rosenhagen<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>BSH; <sup>2</sup>DWD

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

**Druck:** Bundesanstalt für Gewässerkunde

**DOI:** 10.5675/Kliwas\_35/2014\_3.01