

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Periodical Part, Report, Published Version

Groll, Nikolaus; Weisse, Ralf; Behrens, Arno; Günther, Heinz; Möller, Jens

Berechnung von Seegangsszenarien für die Nordsee

KLIWAS Schriftenreihe

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105417>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Groll, Nikolaus; Weisse, Ralf; Behrens, Arno; Günther, Heinz; Möller, Jens (2014):
Berechnung von Seegangsszenarien für die Nordsee. Koblenz: Bundesanstalt für
Gewässerkunde (KLIWAS Schriftenreihe, 64/2014).

https://doi.org/10.5675/Kliwas_64/2014_Seegangsszenarien.

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-64/2014

**Berechnung von Seegangsszenarien
für die Nordsee**

Koblenz, im März 2014

 **Helmholtz-Zentrum
Geesthacht**
Zentrum für Material- und Küstenforschung


BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE



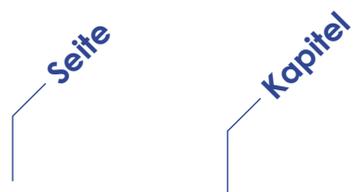
**KLIWAS Schriftenreihe
KLIWAS-64/2014**

**Berechnung von Seegangsszenarien
für die Nordsee**

Autoren:

**N. Groll,
R. Weisse,
A. Behrens,
H. Günther
(HZG)**

**J. Möller
(BSH)**



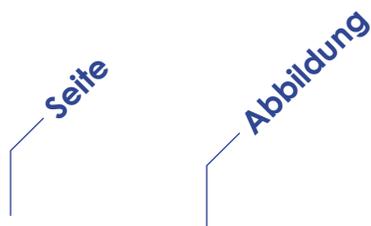
Inhaltsverzeichnis

04		TABELLENVERZEICHNIS
05		ABBILDUNGSVERZEICHNIS
09	1	EINLEITUNG
10	2	DYNAMISCHE SEEGANGSSZENARIEN FÜR DIE NORDSEE
10	2.1	EINLEITUNG
10	2.2	MODELLE, MODELLKETTE UND SZENARIENAUFBAU
12	2.3	ERGEBNISSE
12	2.3.1	VALIDIERUNG
16	2.3.2	KLIMAÄNDERUNGSSIGNAL
16		RÄUMLICHES KLIMAÄNDERUNGSSIGNAL
26		ANWENDUNGSBEZOGENE ÄNDERUNGEN
29	3	STATISTISCHE SEEGANGSSZENARIEN FÜR DIE NORDSEE
29	3.1	EINLEITUNG
29	3.2	DATEN UND METHODEN
29	3.2.1	STATISTISCHES MODELL
30	3.2.2	DATEN
31	3.3	ERGEBNISSE
31	3.3.1	ANPASSUNG DES MODELLS
32	3.3.2	ANWENDUNG DES STATISTISCHEN MODELLS
39	4	SENSITIVITÄTSSTUDIE MEERESSPIEGELANSTIEG
42	5	ZUSAMMENFASSUNG UND EINORDNUNG DER ERGEBNISSE
44	6	LITERATURVERZEICHNIS
46	7	ANHANG
46	7.1	ERGEBNISSE DER REKONSTRUKTION MIT HILFE DER REDUNDANZANALYSE FÜR DIE EINZELNEN MODELLE
51	7.2	VOLL ENTWICKELTE SEEGANGSZUSTÄNDE MIT HEUTIGER BATHYMETRIE
55	7.3	VOLL ENTWICKELTE SEEGANGSZUSTÄNDE MIT HEUTIGER BATHYMETRIE UND EINEM MEERESSPIEGELANSTIEG VON EINEM METER



Tabellenverzeichnis

11	2.1	BESCHREIBUNG DER VERWENDETEN MODELLE: MODELSETUP, VERWENDETE PARAMETER BZW. GESPEICHERTE WELLENPARAMETER; SOWIE MODELL-REFERENZEN
27	2.2	ANZAHL DER SO GENANNTEN WETTERFENSTER (HIER ZEITEN, IN DENEN DIE SWH UNUNTERBROCHEN KLEINER ALS 2 M IST) FÜR 30-JÄHRIGE PERIODEN AN DEN VERSCHIEDENEN STATIONEN
27	2.3	WIEDERKEHRWERTE [IN M] FÜR 100-JÄHRIGE WIEDERKEHRPERIODEN IN VERSCHIEDENEN 30-JAHRESPERIODEN. BERECHNET AUS DEN WERTEN DER JEWEILIGEN 30-JAHRESPERIODE, MIT ANNAHME EINER GEV-VERTEILUNG, NACH GUMBEL
34	3.1	MODELLRECHNUNGEN DES CMIP3 ARCHIVS, FÜR DIE DAS STATISTISCHE DOWNSCALING DURCHGEFÜHRT WURDE
38	3.2	ERGEBNISSE DES ZWEISEITIGEN VORZEICHENTESTS FÜR DIE VERWENDETE STICHPROBE



Abbildungsverzeichnis

11	2.1	LINKS: GEBIETSGRÖßEN DER REGIONALMODELLE REMO, HIRLAM SOWIE DES GROBEN UND FEINEN GITTERS DES SEEGANGSMODELLS. RECHTS: GEBIET DES HOCHAUFGEÖSTEN MODELLGEBIETS IN DER NORDSEE, MIT VERWENDETER TOPOGRAPHIE UND LOKATIONEN DER GESPEICHERTEN WELLENSPEKTREN IN DREISTÜNDIGER AUFLÖSUNG
12	2.2	QQ-PLOT DER WINDGESCHWINDIGKEIT UND DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE ZWISCHEN BEOBACHTUNGEN AN K13 UND REMO, HIRLAM UND COASTDAT-1
14	2.3	QQ-PLOT DER WINDGESCHWINDIGKEIT UND DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE ZWISCHEN BEOBACHTUNGEN AN EKOFISK UND REMO UND HIRLAM
14	2.4	QQ-PLOT DER WINDGESCHWINDIGKEIT UND DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE ZWISCHEN COASTDAT1 SEEWÄRTS SYLT UND REMO UND HIRLAM
14	2.5	QQ-PLOT DER WINDGESCHWINDIGKEIT UND DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE ZWISCHEN COASTDAT1 IM SEEGBIET WASH UND REMO UND HIRLAM
15	2.6	DIFFERENZ DES JÄHRLICHEN MEDIANS DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE ZWISCHEN REMO UND HIRLAM UND DEM COASTDAT-1 DATENSATZ IM ZEITRAUM 1961-2000 IN METER
15	2.7	DIFFERENZ DES 99. PERZENTILS DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE ZWISCHEN REMO UND HIRLAM UND DEM COASTDAT-1 DATENSATZ IM ZEITRAUM 1961-2000
16	2.8	DIFFERENZ DES JÄHRLICHEN MAXIMUM DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE ZWISCHEN REMO UND HIRLAM UND DEM COASTDAT-1 DATENSATZ FÜR 1961-2000
18	2.9	MITTLERE SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE (SWH) FÜR DIE REFERENZPERIODE 1961-1990 IM MODELL REMO, DMI-HIRHAM UND DIE DIFFERENZ DMI-REMO
19	2.10	ÄNDERUNG DER MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE (SWH) IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1961-1990 IM MODELL REMO (OBEN) UND DMI-HIRHAM IN %, FÜR DIE PERIODEN 2011-2040, 2041-2070 UND 2071-2100
20	2.11	99. PERZENTIL DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE (SWH) FÜR DIE REFERENZPERIODE 1961-1990 IM MODELL REMO, DMI-HIRHAM UND DIE DIFFERENZ DMI-REMO
21	2.12	ÄNDERUNG DES 99. PERZENTILS DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE (SWH) IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1961-1990 IM MODELL REMO UND DMI-HIRHAM IN %, FÜR DIE PERIODEN 2011-2040, 2041-2070 UND 2071-2100
22	2.13	30-JÄHRIGES GLEITENDES MITTEL DES 99. PERZENTILS DER SWH IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1961-1990 IM MODELL REMO FÜR VIER STATIONEN IN DER NORDSEE

Seite	Abbildung	
24	2.14	MITTLERES SEEGANGSSPEKTRUM FÜR DIE PERIODE 1961-1990, 2071-2100 UND DIFFERENZ 2071-2100 MINUS 1961-1990 AN DEN STATIONEN VOR SYLT, WESTLICHE NORDSEE UND NÖRDLICHE NORDSEE
25	2.15	HISTOGRAMM DER SWH IN WELLENKLASSEN VON 0,5 M FÜR DIE PERIODE 1961-1990, SOWIE DIE RELATIVEN PROZENTUALEN ÄNDERUNGEN IN DEN WELLENKLASSEN FÜR 2041-2070 UND 2071-2100 AN DEN STATIONEN VOR SYLT, WESTLICHE NORDSEE UND NÖRDLICHE NORDSEE
31	3.1	VERFÜGBARKEIT MONATLICH GEMITTELTER ATMOSPHÄRISCHER LUFTDRUCK-DATEN IM CMIP3 ENSEMBLE
33	3.2	ERGEBNISSE DER REDUNDANZANALYSE ZWISCHEN ANOMALIEN DES JÄHRLICHEN MITTLEREN LUFTDRUCKFELDES UND ANOMALIEN DER JÄHRLICHEN MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE IN DER SÜDLICHEN NORDSEE AUF BASIS STÜNDLICHER WERTE DES COASTDAT-1 HINDCASTS 1958-2007
35	3.3	ZEITREIHEN VON ANOMALIEN (IN M) DER JÄHRLICHEN MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHEN AM GITTERPUNKT 54.5 N, 07.00 E IN DER DEUTSCHEN BUCHT ERMITTELT MIT HILFE DES STATISTISCHEN MODELLS ANHAND DER BODENNAHEN LUFTDRUCKDATEN DER DARGESTELLTEN MODELLE
36	3.4	ERGEBNISSE DER REKONSTRUKTION MITTLERER SIGNIFIKANTER WELLENHÖHEN MIT HILFE DES BESCHRIEBENEN STATISTISCHEN MODELLS UND DER ATMOSPHERISCHEN BODENNAHEN LUFTDRUCKFELDER DES MODELLS ECHAM5
37	3.5	ANZAHL DER EXPERIMENT BEI DENEN DIE ÄNDERUNGEN IM 30-JÄHRIGEN MITTEL DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE ZWISCHEN DEN ZEITRÄUMEN 1970-1999 UND 2070-2099 POSITIV IST
40	4.1	LINKS: SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE IN M UND MITTLERE WELLENRICHTUNG. RECHTS: TM02 PERIODE IN S UND MITTLERE WELLENRICHTUNG, ZUSTAND JEWEILS NACH EINEM 5 TAGE ANDAUERNDEN STURM MIT HOMOGENEN WINDFELDERN VON 30M/S AUS NORDWEST UND HEUTIGER BATHYMETRIE
41	4.2	LINKS: DIFFERENZEN DER SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE IN M. RECHTS: DIFFERENZEN DER TM02 PERIODE IN S JEWEILS ZWISCHEN DEM ZUSTAND NACH EINEM 5 TAGE ANDAUERNDEN STURM MIT HOMOGENEN WINDFELDERN VON 30M/S AUS NORDWEST UND BEI EINEM MEERESSPIEGELANSTIEG UM EINEN METER UND HEUTIGER BATHYMETRIE
43	5.1	DIFFERENZ DES MITTELS 2071-2100 DES JÄHRLICHEN MEDIANS ZUR REFERENZ-PERIODE 1961-1990 AUS 10 KLIMAPROJEKTIONEN
46	A1-1	ERGEBNISSE DER REKONSTRUKTION MITTLERER SIGNIFIKANTER WELLENHÖHEN MIT HILFE DES BESCHRIEBENEN STATISTISCHEN MODELLS UND DER ATMOSPHERISCHEN BODENNAHEN LUFTDRUCKFELDER DES MODELLS NCAR PCM
47	A1-2	ERGEBNISSE DER REKONSTRUKTION MITTLERER SIGNIFIKANTER WELLENHÖHEN MIT HILFE DES BESCHRIEBENEN STATISTISCHEN MODELLS UND DER ATMOSPHERISCHEN BODENNAHEN LUFTDRUCKFELDER DES MODELLS NCAR CCSM3

Seite	Abbildung	
48	A1-3	ERGEBNISSE DER REKONSTRUKTION MITTLERER SIGNIFIKANTER WELLENHÖHEN MIT HILFE DES BESCHRIEBENEN STATISTISCHEN MODELLS UND DER ATMOSPHÄRISCHEN BODENNAHEN LUFTDRUCKFELDER DES KANADISCHEN MODELLS CGSM3
49	A1-4	ERGEBNISSE DER REKONSTRUKTION MITTLERER SIGNIFIKANTER WELLENHÖHEN MIT HILFE DES BESCHRIEBENEN STATISTISCHEN MODELLS UND DER ATMOSPHÄRISCHEN BODENNAHEN LUFTDRUCKFELDER DES JAPANISCHEN MODELLS CGCM2
50	A1-5	ERGEBNISSE DER REKONSTRUKTION MITTLERER SIGNIFIKANTER WELLENHÖHEN MIT HILFE DES BESCHRIEBENEN STATISTISCHEN MODELLS UND DER ATMOSPHÄRISCHEN BODENNAHEN LUFTDRUCKFELDER DES US MODELLS GISS ER
51	A2-1	LINKS: SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE IN M UND MITTLERE WELLENRICHTUNG. RECHTS: TM02 PERIODE IN S UND MITTLERE WELLENRICHTUNG, ZUSTAND JEWEILS NACH EINEM 5 TAGE ANDAUERNDEN STURM MIT HOMOGENEN WINDFELDERN VON 30M/S AUS OSTEN UND HEUTIGER BATHYMETRIE
51	A2-2	LINKS: SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE IN M UND MITTLERE WELLENRICHTUNG. RECHTS: TM02 PERIODE IN S UND MITTLERE WELLENRICHTUNG, ZUSTAND JEWEILS NACH EINEM 5 TAGE ANDAUERNDEN STURM MIT HOMOGENEN WINDFELDERN VON 30M/S AUS SÜDEN UND HEUTIGER BATHYMETRIE
52	A2-3	LINKS: SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE IN M UND MITTLERE WELLENRICHTUNG. RECHTS: TM02 PERIODE IN S UND MITTLERE WELLENRICHTUNG, ZUSTAND JEWEILS NACH EINEM 5 TAGE ANDAUERNDEN STURM MIT HOMOGENEN WINDFELDERN VON 30M/S AUS SÜDWEST UND HEUTIGER BATHYMETRIE
52	A2-4	LINKS: SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE IN M UND MITTLERE WELLENRICHTUNG. RECHTS: TM02 PERIODE IN S UND MITTLERE WELLENRICHTUNG, ZUSTAND JEWEILS NACH EINEM 5 TAGE ANDAUERNDEN STURM MIT HOMOGENEN WINDFELDERN VON 30M/S AUS WEST UND HEUTIGER BATHYMETRIE
53	A2-5	LINKS: SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE IN M UND MITTLERE WELLENRICHTUNG. RECHTS: TM02 PERIODE IN S UND MITTLERE WELLENRICHTUNG. OBEN: GESAMTE NORDSEE; UNTEN: DEUTSCHE BUCHT, ZUSTAND JEWEILS NACH EINEM 5 TAGE ANDAUERNDEN STURM MIT HOMOGENEN WINDFELDERN VON 30M/S AUS NORDWEST UND HEUTIGER BATHYMETRIE
54	A2-6	LINKS: SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE IN M UND MITTLERE WELLENRICHTUNG. RECHTS: TM02 PERIODE IN S UND MITTLERE WELLENRICHTUNG, ZUSTAND JEWEILS NACH EINEM 5 TAGE ANDAUERNDEN STURM MIT HOMOGENEN WINDFELDERN VON 30M/S AUS NORDEN UND HEUTIGER BATHYMETRIE
55	A3-1	LINKS: DIFFERENZEN DER SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE IN M. RECHTS: DIFFERENZEN DER TM02 PERIODE IN S JEWEILS ZWISCHEN DEM ZUSTAND NACH EINEM 5 TAGE ANDAUERNDEN STURM MIT HOMOGENEN WINDFELDERN VON 30M/S AUS OSTEN UND BEI EINEM MEERESSPIEGELANSTIEG UM EINEN METER UND HEUTIGER BATHYMETRIE

Seite	Abbildung	
55	A3-2	LINKS: DIFFERENZEN DER SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE IN M. RECHTS: DIFFERENZEN DER TM02 PERIODE IN S JEWEILS ZWISCHEN DEM ZUSTAND NACH EINEM 5 TAGE ANDAUERNDEN STURM MIT HOMOGENEN WINDFELDERN VON 30M/S AUS SÜDEN UND BEI EINEM MEERESSPIEGELANSTIEG UM EINEN METER UND HEUTIGER BATHYMETRIE
56	A3-3	LINKS: DIFFERENZEN DER SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE IN M. RECHTS: DIFFERENZEN DER TM02 PERIODE IN S JEWEILS ZWISCHEN DEM ZUSTAND NACH EINEM 5 TAGE ANDAUERNDEN STURM MIT HOMOGENEN WINDFELDERN VON 30M/S AUS SÜDWEST UND BEI EINEM MEERESSPIEGELANSTIEG UM EINEN METER UND HEUTIGER BATHYMETRIE
56	A3-4	LINKS: DIFFERENZEN DER SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE IN M. RECHTS: DIFFERENZEN DER TM02 PERIODE IN S JEWEILS ZWISCHEN DEM ZUSTAND NACH EINEM 5 TAGE ANDAUERNDEN STURM MIT HOMOGENEN WINDFELDERN VON 30M/S AUS WESTEN UND BEI EINEM MEERESSPIEGELANSTIEG UM EINEN METER UND HEUTIGER BATHYMETRIE
57	A3-5	LINKS: DIFFERENZEN DER SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE IN M. RECHTS: DIFFERENZEN DER TM02 PERIODE IN S JEWEILS ZWISCHEN DEM ZUSTAND NACH EINEM 5 TAGE ANDAUERNDEN STURM MIT HOMOGENEN WINDFELDERN VON 30M/S AUS NORDWEST UND BEI EINEM MEERESSPIEGELANSTIEG UM EINEN METER UND HEUTIGER BATHYMETRIE; OBEN: GESAMTE NORDSEE; UNTEN: DEUTSCHE BUCHT
57	A3-6	LINKS: DIFFERENZEN DER SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE IN M. RECHTS: DIFFERENZEN DER TM02 PERIODE IN S JEWEILS ZWISCHEN DEM ZUSTAND NACH EINEM 5 TAGE ANDAUERNDEN STURM MIT HOMOGENEN WINDFELDERN VON 30M/S AUS NORDEN UND BEI EINEM MEERESSPIEGELANSTIEG UM EINEN METER UND HEUTIGER BATHYMETRIE

1 Einleitung

Seegangs-
Szenarien
Nordsee

Helmholtz-
Zentrum
Geesthacht

Bundesamt für
Seeschifffahrt und
Hydrographie

Im Rahmen des Verbundprojekts „KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) wurden im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Material und Küstenforschung GmbH (HZG) und dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) Seegangsszenarien für die Nordsee für unterschiedliche Klimaprojektionen erstellt.

Eine genaue Abschätzung von möglichen Seegangsänderungen in der Nordsee durch Klimaänderung ist wichtig, um mögliche Auswirkungen sowohl für den Offshore- als auch für den Küstenbereich frühzeitig zu erkennen und gegebenenfalls Anpassungsoptionen einleiten zu können.

Die Untersuchungen wurden in drei Abschnitten durchgeführt: Im ersten Abschnitt wurden detaillierte Seegangsberechnungen bis 2100 mit Hilfe der Version 4.5.3 des Wellenmodells WAM durchgeführt. Dabei wurden Windfelder aus zwei unterschiedlichen regionalen Klimamodellen verwendet, um die Spannbreite bedingt durch unterschiedliche Regionalmodelle besser abschätzen zu können. Wie im Verbundprojekt KLIWAS vereinbart, wurden nur Windfelder die unter dem Emissionsszenario A1B simuliert wurden verwendet.

Im zweiten Abschnitt wurde mit Hilfe eines statistischen Modells die Spannbreite möglicher Seegangsänderungen aufgrund unterschiedlicher Modelle und Anfangszustände untersucht. Im Gegensatz zur dynamischen Modellierung im ersten Abschnitt ist es mit einem statistischen Modell möglich, mit Hilfe einer Vielzahl von unterschiedlichen Modellen, Emissionsszenarien und Anfangszuständen die Unsicherheit der Spannbreite möglicher Seegangsänderungen besser abzuschätzen.

Im dritten Abschnitt wurde die Sensitivität des Seegangs aufgrund eines geänderten Meeresspiegels untersucht. Dabei wurden unter jeweils extremen Windbedingungen voll entwickelte Seegangszustände mit Hilfe des Seegangmodells WAM erzeugt, um Obergrenzen möglicher Veränderungen abzuschätzen.

2 Dynamische Seegangsszenarien für die Nordsee

2.1 Einleitung

Um detaillierte Aussagen zum Seegang bei Klimaänderung im Nordseeraum treffen zu können, wurden mit dem Wellenmodell WAM zeitlich und räumlich hochaufgelöste Seegangsszenarien erstellt. Das Wellenmodell WAM wurde in der aktuellsten Version (4.5.3) mit stündlichen Windfeldern aus zwei unterschiedlichen regionalen Klimamodellen angetrieben. Um mögliche Modellunterschiede und die dadurch resultierenden Unterschiede im Wellenklima diskutieren zu können, wurden Simulationen der beiden Regionalmodelle mit derselben Klimarealisation desselben globalen Klimamodells und demselben Emissionsszenario angetrieben verwendet.

2.2 Modelle, Modellekte und Szenarienaufbau

Die Grundlage zur Berechnung des Seegangs sind hochaufgelöste Windfelder. Die verwendeten Windfelder stammen zum einen vom Regionalmodell REMO mit einer räumliche Auflösung von etwa 25 km und wurden vom Max-Planck Institut für Meteorologie in Hamburg zur Verfügung gestellt und zum anderem vom Regionalmodell HIRHAM mit einer räumliche Auflösung von etwa 25 km welche vom Dänischen Meteorologischen Institut (DMI) zur Verfügung gestellt wurden. Beide Simulationen wurden mit derselben Realisation des allgemeinen Zirkulationsmodells ECHAM5/MPI-OM angetrieben, welches für das Emissionsszenario A1B berechnet wurde. Die Gebietsgrößen der beiden Regionalmodelle sind in Abb. 2.1 dargestellt, sowie die Gebietsgrößen der Seegangssimulationen für die Berechnung in grober (Nord-Ost Atlantik) und feiner Auflösung (Nordsee).

Die verwendete Topographie für die Wellensimulation mit hoher Auflösung, gemeinsam mit 20 Gitterpunkten an denen das Wellenspektrum in dreistündlicher Auflösung abgespeichert wurde, ist in Abb. 2.1 dargestellt. Ein Überblick der verwendeten Modelle zum Antrieb des Wellenmodells ist in Tabelle 2.1 dargestellt.

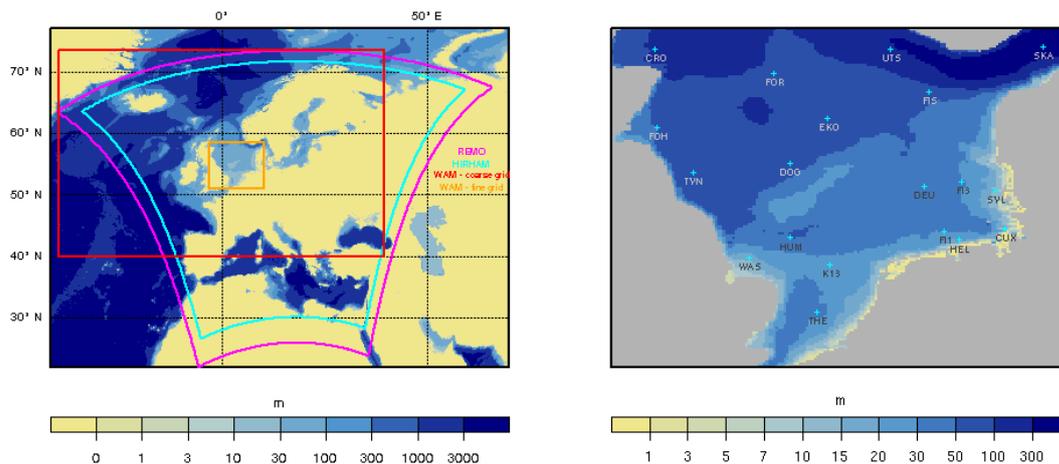


Abbildung 2.1: Links, Gebietsgrößen der Regionalmodelle REMO(magenta), HIRLAM(cyan) sowie des groben (rot) und feinen (orange) Gitters des Seegangmodells. Rechts, Gebiet des hochaufgelösten Modellgebiets in der Nordsee, mit verwendeter Topographie und Lokationen der gespeicherten Wellenspektren in drei stündiger Auflösung.

Model	Setup	Verwendete bzw. gespeicherte Modellparameter	Referenz
ECHAM5/MPI-OM	ca. 1.8°x1.8°, monatlich	Meereisbedeckung	Röckner et al. 2003; Marsland et al. 2003
REMO 5.9	0.22°x0.22° (ca.25km x 25km), stündlich	10m Wind (u & v-Komponente)	Jakob et al. 2007
HIRHAM 5	0.22°x0.22° (ca.25km x 25km), stündlich	10m Wind (u & v-Komponente)	Christensen et al. 2007
WAM 4.5.3	grobes Gitter: 0,5°x0,75° (ca. 50km x 50km); 40°N-73,5°N, 40°W-39,5°O feines Gitter: 0,05°x0,075° (ca. 5,5km x 5,5km); 51°N-58,5°N, 3,25°W-10,25°O jeweils 25 Frequenzen (0,04177Hz-0,41145) und 24 Richtungen, stündlich	Signifikante Wellenhöhe, Wellenperioden (mittlere, peak, m1 und m2), mittlere Wellenrichtung,	WAMDI Group 1988

Tabelle 2.1: Beschreibung der verwendeten Modelle: Modelsetup, verwendete Parameter bzw. gespeicherte Wellenparameter; sowie Modellreferenzen

Zuerst wurde mit dem Wellenmodell der Seegang auf einem relativ groben Gitter ($0,5^\circ \times 0,75^\circ$, ca. $50\text{km} \times 50\text{km}$) für den Nordost Atlantik berechnet (siehe Abb.2.1). Das räumliche Gebiet des Seegangmodells wurde dabei durch die Ränder des jeweiligen Regionalmodelles begrenzt. Um den Einfluss von Meereis auf die reduzierte Windwirklänge zu berücksichtigen, wurde am Nordrand der Wellensimulation mit grober Auflösung die Meereisbedeckung aus der globalen Klimasimulation verwendet. Am Rand der hochaufgelösten Simulation ($0,05^\circ \times 0,075^\circ$, ca. $5,5\text{km} \times 5,5\text{km}$) des Seegangs in der Nordsee, wurden die Seegangsspektren der groben Simulation verwendet.

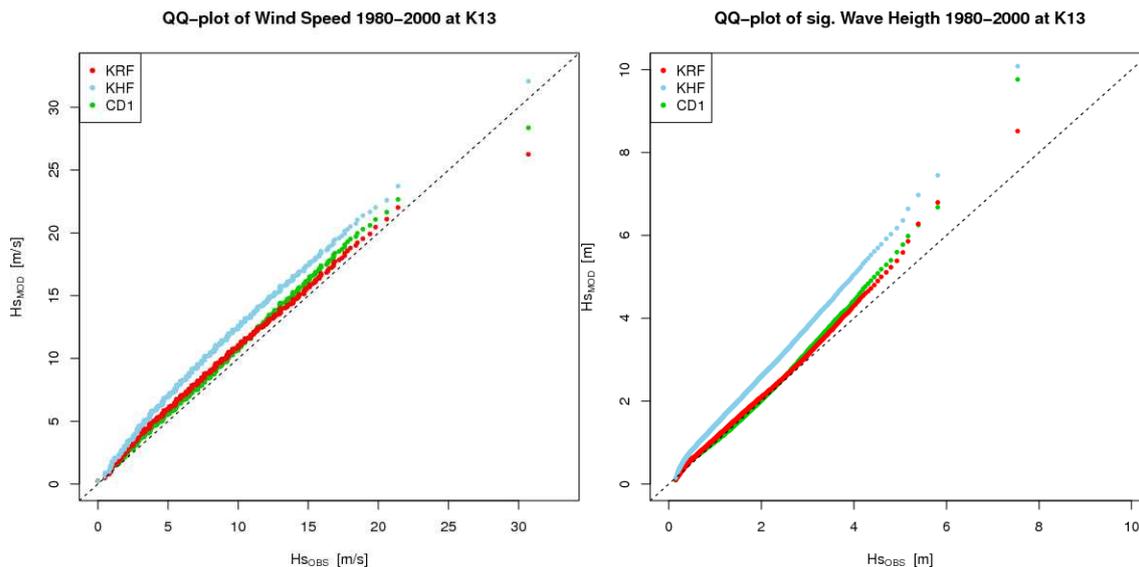


Abbildung 2.2: QQ-Plot der Windgeschwindigkeit und der signifikanten Wellenhöhe zwischen Beobachtungen an K13 und REMO (rot), HIRLAM (blau) und CoastDat-1 (grün)

Der Seegang wurde für den Zeitraum 1960-2100 in stündlicher Auflösung berechnet. Bis zum Jahr 2000 handelt es sich um das sogenannte Kontrollklima, welches als Referenz für den darauffolgenden Zeitraum 2001-2100 unter Klimaänderungsszenarien dient. In der Kontrollperiode wurde das globale Klimamodell mit gemessenen Treibhausgaskonzentrationen angetrieben. Ab dem Jahr 2001 wurde die Treibhausgaskonzentration die dem Emissionsszenario A1B zugrunde liegt verwendet. Insgesamt wurde zweimal (grobe und feine Auflösung) der Seegang für 141 Jahre (1960-2100) angetrieben mit Windfeldern aus der Simulation mit dem Model REMO bzw. 140 Jahre (1960-2099) angetrieben mit dem Modell HIRHAM berechnet. Die Simulationen des Seegangs wurden am Hochleistungsrechner des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) durchgeführt. Die erzeugten Daten (Parameter, Spektren und Restartfelder) machten einen Speicherbedarf von etwa 6TB notwendig. Die Daten sind auf den Dateisystem des DKRZ archiviert.

2.3 Ergebnisse

Die Auswertung der Simulationen mit dem Wellenmodell erfolgt in zwei Schritten. Erstens erfolgt eine Validierung der Modelldaten, indem die Ergebnisse aus der Kontrollperiode (1961-2000) mit Beobachtungen und Rekonstruktionen verglichen werden. Im zweiten Schritt erfolgt die Analyse des Klimaänderungssignals, indem verschiedene Perioden des Zeitraums 2001-2100 mit der Kontrollperiode verglichen werden.

2.3.1 Validierung

Da es sich bei der Simulation der Kontrollperiode nicht um die wahren Jahre 1961-2000 handelt, kann die Validierung von Klimasimulationen immer nur im statistischen Sinne betrieben werden. Ein Vergleich der Verteilung als Quantil-Quantil-

Diagramm von Wind und Wellenhöhe zwischen Beobachtungen an der Plattform K13 (53,22°N; 3,22°E) in der südlichen Nordsee und den dazugehörigen Gitterpunkten ist in Abb. 2.2 dargestellt. Da die Beobachtungsdaten an K13 erst ab 1980 vorliegen, kann dieser Vergleich nur für den Zeitraum 1980-2000 stattfinden. Vergleicht man diese Windgeschwindigkeiten mit REMO (KRF, rot) so erkennt man, dass für den größten Teil des Wertebereichs eine leicht Überschätzung im Vergleich zu den Beobachtungen vorliegt. Die Werte aus HIRHAM (KHF, blau) zeigen eine deutlichere Überschätzung der Windgeschwindigkeiten. Zur besseren Einordnung dieser Überschätzungen sind auch die Windgeschwindigkeiten aus dem gut geprüften CoastDat-1 Datensatz (Weisse et al, 2008)(CD1, grün) dargestellt. Auch dieser Datensatz überschätzt den beobachteten Wind an K13 und ist in dieser Hinsicht vergleichbar zu den beiden hier verwendeten Winddaten. Die aus den Winddaten resultierenden und mit dem Wellenmodell berechneten Wellenhöhen zeigen eine ähnliche Überschätzung im Vergleich zu den Beobachtungen.

Seegangs-
Szenarien
Nordsee

Helmholtz-
Zentrum
Geesthacht

Bundesamt für
Seeschifffahrt und
Hydrographie

Ein Vergleich der beiden KLIWAS Simulationen mit einer Beobachtung in der nördlichen zentralen Nordsee an der Plattform EKOFISK (EKO 56,5°N; 3,2°O) zeigt ein ähnliches Ergebnis (Abb. 2.3), eine leichte Überschätzung der niedrigen bis mittleren Windgeschwindigkeiten gegenüber den Beobachtungen. Allerdings werden die hohen Windgeschwindigkeiten in beiden Simulationen unterschätzt. Die Windgeschwindigkeiten aus dem Modell HIRHAM liegen generell über denen aus dem Modell REMO. Die resultierenden Wellenhöhen zeigen generell eine Überschätzung der beobachteten Wellenhöhen. Ein Vergleich mit den Daten aus dem CoastDat1-Datensatz ist hier nicht möglich, da das simulierte Gebiet in CoastDat1 südlich der Plattform EKOFISK endet. Um einen Vergleich näher an der Küste zu ermöglichen wurden die Simulationen mit Daten aus dem CoastDat1 Datensatz seewärts von Sylt (SYL 54,55°N; 8,22°O) und vor der südöstlichen englischen Küste (WAS 53,45°N; 0,875°O) verglichen (Abb. 2.4 und 2.5).

Vergleicht man Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe der Simulation angetrieben mit REMO Windfeldern erkennt man eine gute Übereinstimmung mit den Daten aus dem Hindcast CoastDat1. Die Ergebnisse aus den mit HIRHAM Windfeldern angetriebenen Simulationen zeigen hingegen wieder eine leichte Überschätzung verglichen mit CoastDat1. Ein Vergleich mit Beobachtung ist in diesen Regionen nicht möglich, da mögliche vorhandene Daten einen zu kurzen Zeitraum abdecken um eine belastbare statistische Auswertung durchzuführen.

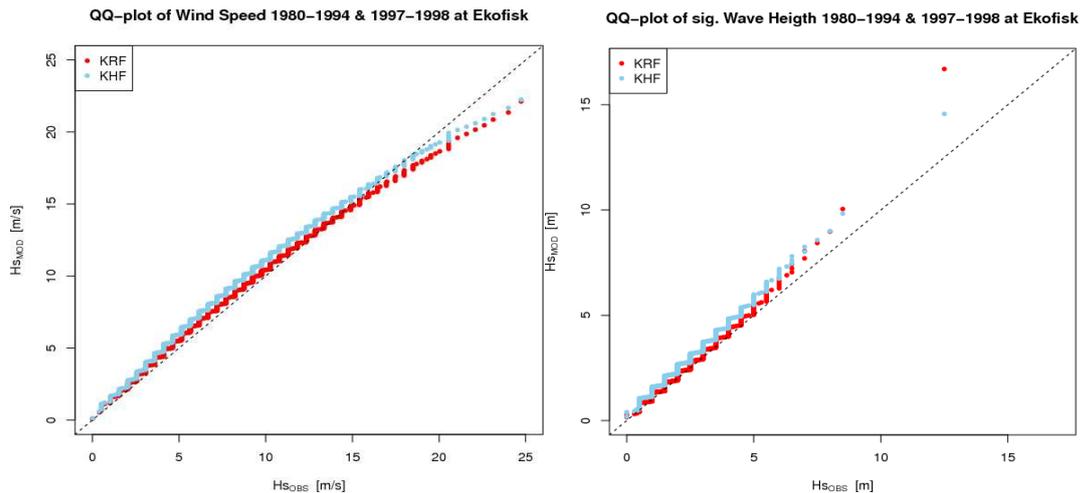


Abbildung 2.3: QQ-Plot der Windgeschwindigkeit und der signifikanten Wellenhöhe zwischen Beobachtungen an Ekofisk und REMO (rot), HIRLAM (blau)

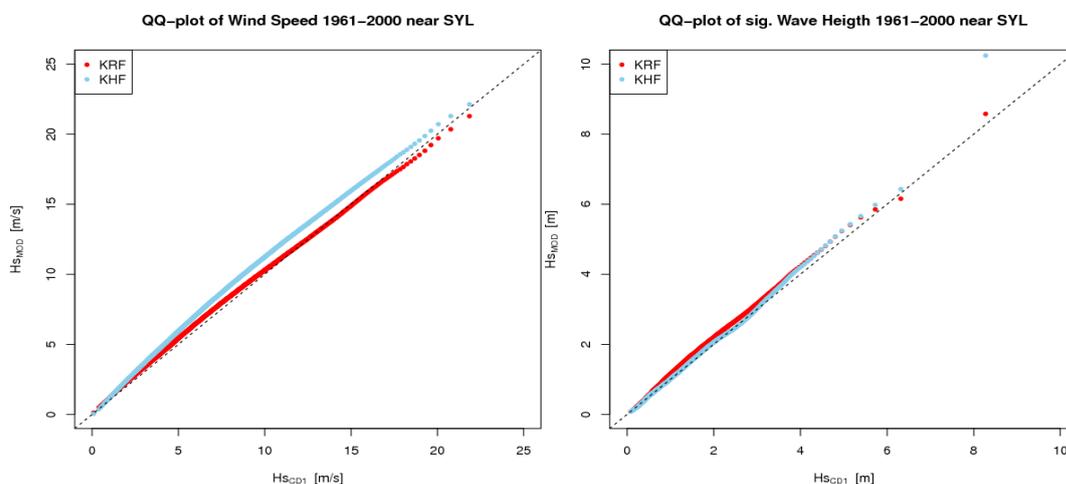


Abbildung 2.4: QQ-Plot der Windgeschwindigkeit und der signifikanten Wellenhöhe zwischen CoastDat1 seewärts Sylt und REMO (rot), HIRLAM (blau)

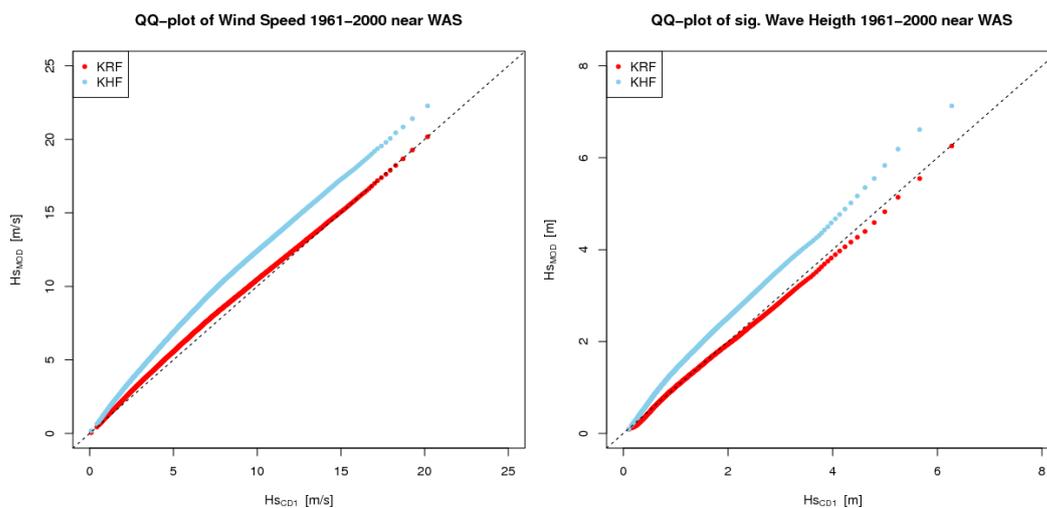


Abbildung 2.5: QQ-Plot der Windgeschwindigkeit und der signifikanten Wellenhöhe zwischen CoastDat1 im Seengebiet Wash (Südost Küste Großbritanniens) und REMO (rot), HIRLAM (blau)

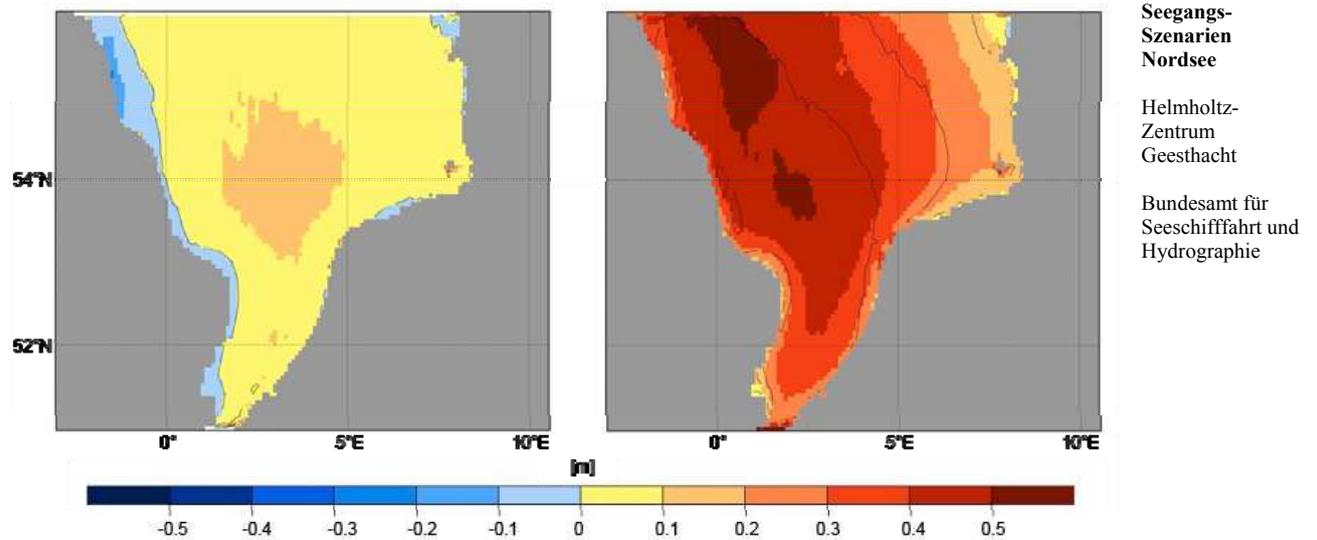


Abbildung 2.6: Differenz des jährlichen Medians der signifikanten Wellenhöhe zwischen REMO (links) und HIRLAM (rechts) und dem CoastDat-1 Datensatz im Zeitraum 1961-2000 in Meter

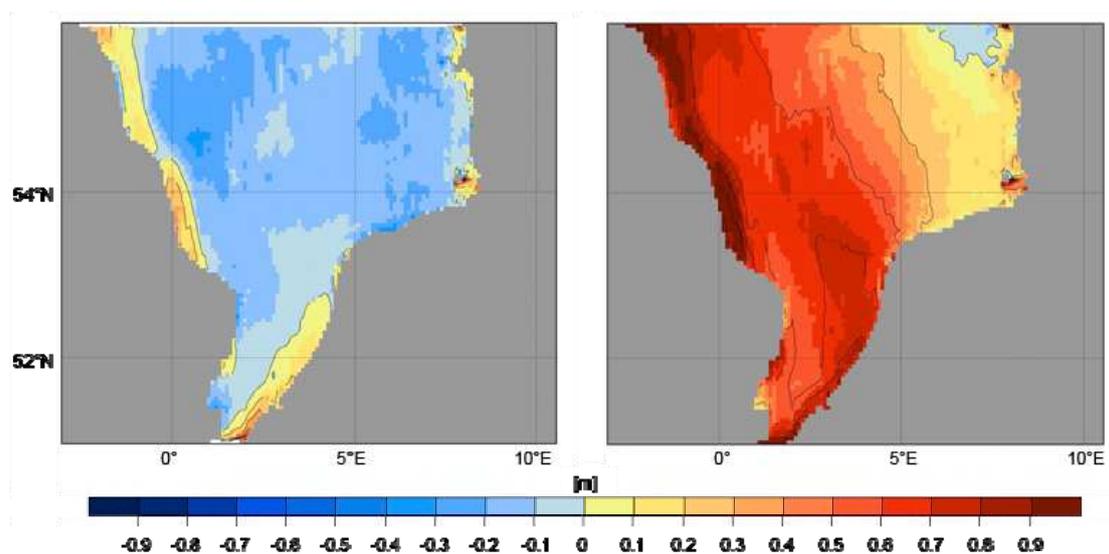


Abbildung 2.7: Differenz des 99. Perzentils der signifikanten Wellenhöhe zwischen REMO (links) und HIRLAM (rechts) und dem CoastDat-1 Datensatz im Zeitraum 1961-2000 in Meter

Um eine räumliche Abschätzung der Unter- und Überschätzung von Windgeschwindigkeiten und Wellenhöhen zu ermitteln, wurden die hier erhaltenen Ergebnisse mit dem Datensatz aus CoastDat1 verglichen. Die Unterschiede im Median (Abb. 2.6) des REMO-Antriebs weisen auf eine leichte Überschätzung von bis zu 10-20 cm (unter 10%) der Wellenhöhe verglichen mit den CoastDat1 Daten hin. Die Ergebnisse der HIRHAM Simulation zeigen höhere Überschätzungen bis zu 45 cm (> 30 %) in der westlichen Nordsee, allerdings nähern sich die Werte im Bereich der deutschen Küste mit bis zu 20 cm Überschätzung ((10-20 %) denen der REMO Simulation an.

Abbildung 2.7 zeigt die Abweichung zwischen dem 99 - Perzentil der Wellenhöhe aus der Simulation mit REMO (links) bzw. HIRHAM (rechts) und dem CoastDat-1 Datensatz für die Periode 1961-2000. Die Wellenhöhen in der Simulation mit REMO

sind in großen Gebieten um 10cm bis 20cm im Vergleich zu CoastDat-1 unterschätzt, der relative Unterschied liegt zwischen 1% und 5%. Die Ergebnisse mit dem HIRHAM Windfeldern ergeben hingegen eine Überschätzung bis zu 90cm nahe der englischen Küste oder einem relativen Unterschied von bis zu 25%. Zur östlichen Nordsee werden diese Unterschiede allerdings geringer.

Unterschiede bei den mittleren jährlichen Maxima (Abb. 2.8) fallen dagegen geringer aus. Während die REMO Simulation Unterschiede zwischen bis zu +/-75cm (etwa $\pm 5\%$) zeigt, zeigt die HIRHAM Simulation Überschätzungen des jährlichen Maxima bis zu 1m (10%) auf. Die stellenweise hohen Unterschiede im küstennahen Bereich können durch eine unterschiedliche Auflösung und damit Unterschiede in der Topographie und Land-See-Maske zwischen Szenarienrechnungen und CoastDat-1 erklären werden.

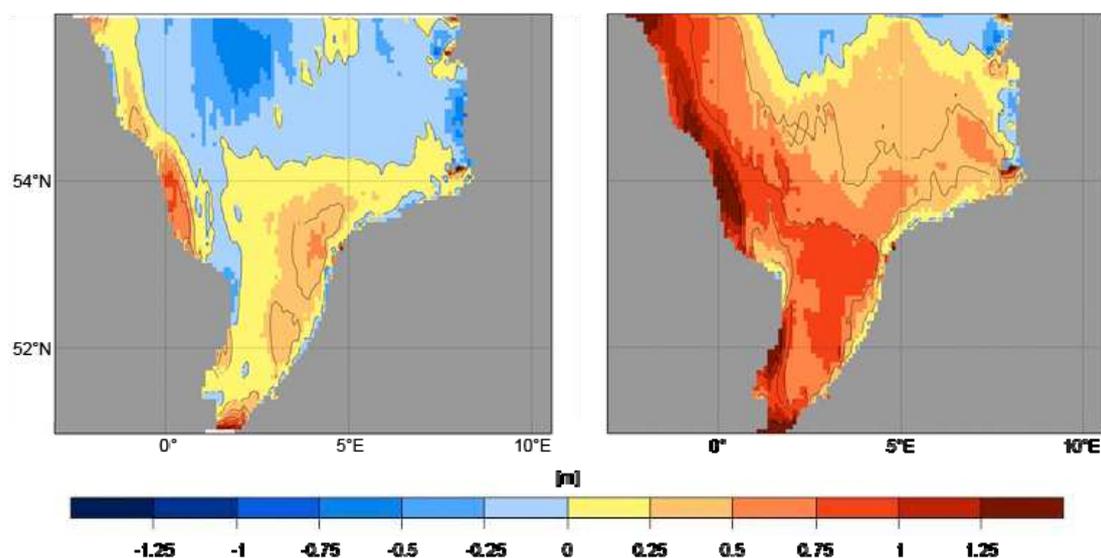


Abbildung 2.8: Differenz des jährlichen Maximums der signifikanten Wellenhöhe zwischen REMO (links) und HIRLAM (rechts) und dem CoastDat-1 Datensatz im Zeitraum 1961-2000 in Meter

2.3.2 Klimaänderungssignal

Räumliches Klimaänderungssignal

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 entfernteren Zukunft in den Klimäläufen wieder.

In Abb. 2.9 sind die mittlere signifikante Wellenhöhe (Hs) in der Referenzperiode für REMO und DMI-HIRHAM, sowie die Differenz DMI-REMO dargestellt. Bei REMO zeigt sich zum einen in der zentralen Nordsee eine Abnahme der Hs von Nord nach

Süd infolge der aus dem Nordostatlantik einlaufenden Wellen, zum anderen eine Abnahme der Hs zu den Küsten hin infolge des Einflusses der Wassertiefe auf die Wellenhöhe. Dasselbe Wellenmodell WAM 4.5.3, aber angetrieben von DMI-HIRHAM (Abb.2.9, Mitte), lässt ebenfalls die Abhängigkeit von der Wassertiefe hin zu den Küsten und auch im Bereich der Doggerbank erkennen. Es zeigt aber für die Abnahme der Hs von Nord nach Süd eine etwas andere Struktur, in der die Isoplethen der mittleren Hs in der zentralen Nordsee eher von Südwest nach Nordost als von West nach Ost verlaufen. Gleichzeitig ist die Hs insgesamt etwas höher. Dies wird noch deutlicher im Differenzenbild (DMI minus REMO, Abb.2.9 rechts) mit größerer mittlerer Hs (bis zu 0,45 m) vor allem in der westlichen Nordsee. Das regionale Klimamodell DMI-HIRHAM ist schon aus anderen Untersuchungen dafür bekannt, dass es bei gleichem „Muttermodell“ (hier ECHAM5/MPI-OM) höhere Windstärken produziert als andere Regionalmodelle. Die größeren Unterschiede vor allem in der westlichen Nordsee lassen sich eventuell auf andere Starkwindrichtungen (weniger westliche zugunsten nordöstlicher Richtungen im Vergleich zu REMO) zurückführen. Dies erfordert aber noch weitere Untersuchungen.

Seegangs-
Szenarien
Nordsee

Helmholtz-
Zentrum
Geesthacht

Bundesamt für
Seeschifffahrt und
Hydrographie

Abbildung 2.10 zeigt die prozentualen zukünftigen Änderungen der mittleren Hs für die Regionalmodelle REMO und DMI im Vergleich zur Referenzperiode. Das Wellenmodell WAM produziert mit beiden Antrieben eine deutliche Zweiteilung, mit einer Abnahme der Hs in der westlichen und einer Zunahme in der östlichen Nordsee. Dabei liefert das DMI-Modell höhere Zunahme im Osten und geringere Abnahme im Westen. Die Zweiteilung in den Änderungen ist für die 30-Jahres-Perioden in beiden Antrieben schon in der nahen Zukunft erkennbar und verstärkt sich zum Ende des Jahrhunderts. Allerdings ist die Zunahme der mittleren Hs in der östlichen Nordsee (bzw. Abnahme in der westlichen Nordsee) nicht gleichmäßig, sondern wird von dekadischen Schwankungen überlagert. Hierauf wird weiter unten am Beispiel des 99. Perzentils der Hs noch näher eingegangen.

**Seegangs-
Szenarien
Nordsee**

Helmholtz-
Zentrum
Geesthacht

Bundesamt für
Seeschifffahrt und
Hydrographie

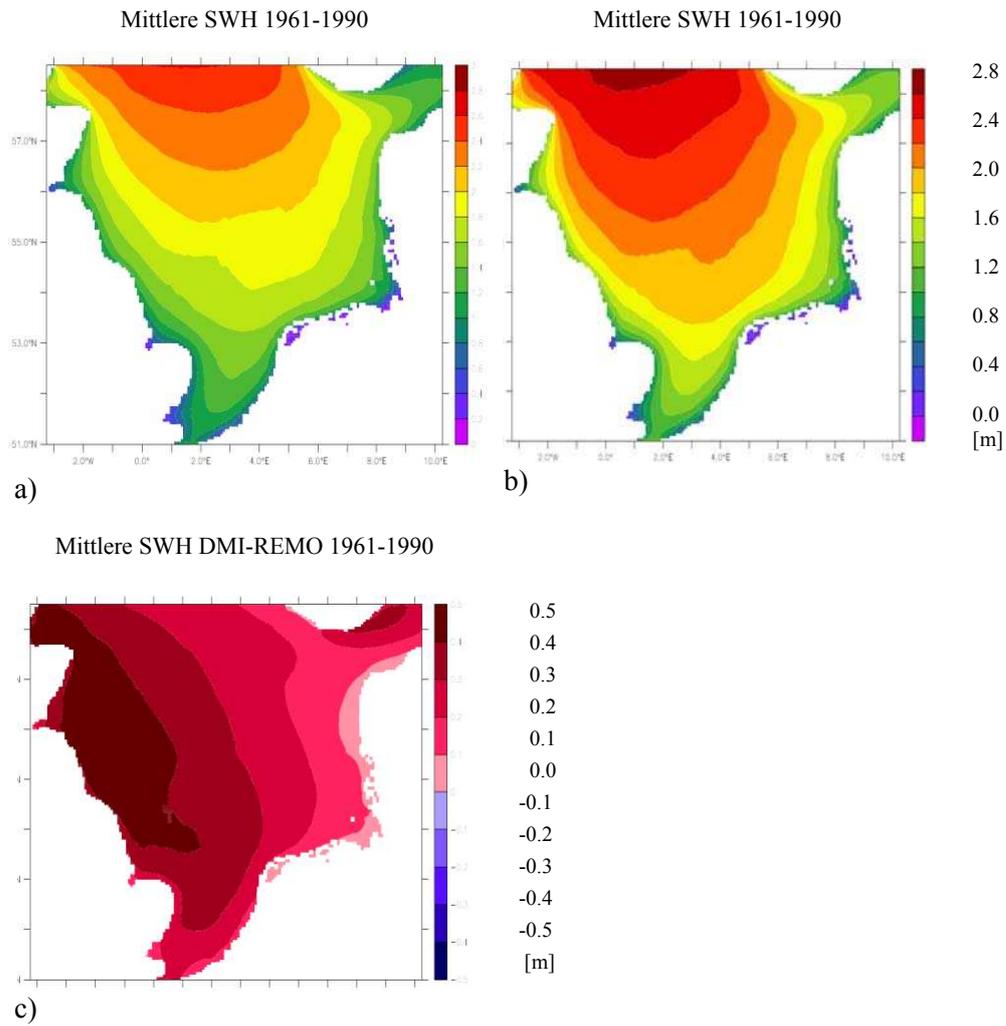


Abbildung 2.9: Mittlere signifikante Wellenhöhe (SWH) für die Referenzperiode 1961-1990 im Modell REMO (a), DMI-HIRHAM (b) und die Differenz DMI-REMO (c) .

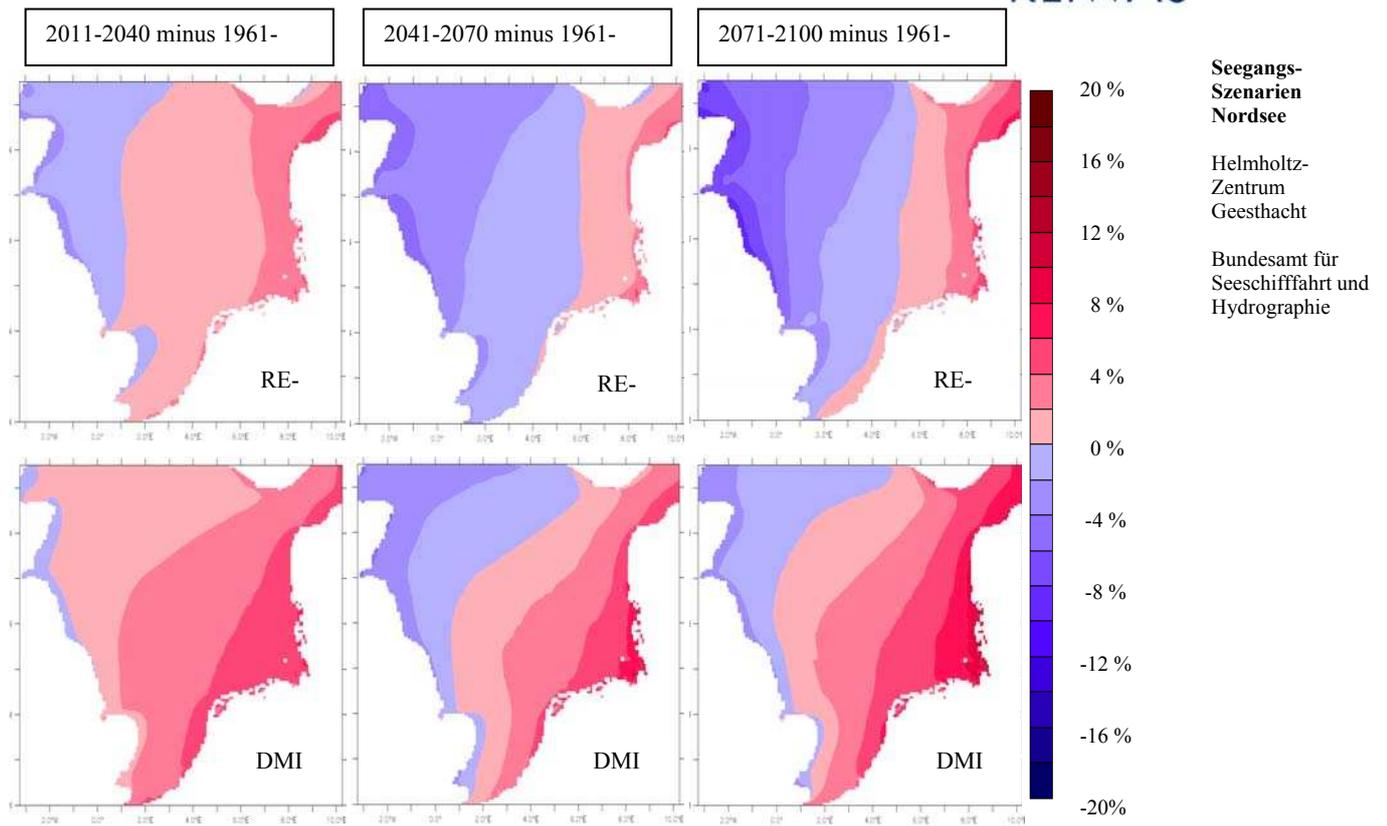


Abbildung 2.10: Änderung der mittleren signifikanten Wellenhöhe (SWH) im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 im Modell REMO (oben) und DMI-HIRHAM (unten) in %, für die Perioden 2011-2040 (links), 2041-2070 (Mitte) und 2071-2100 (rechts).

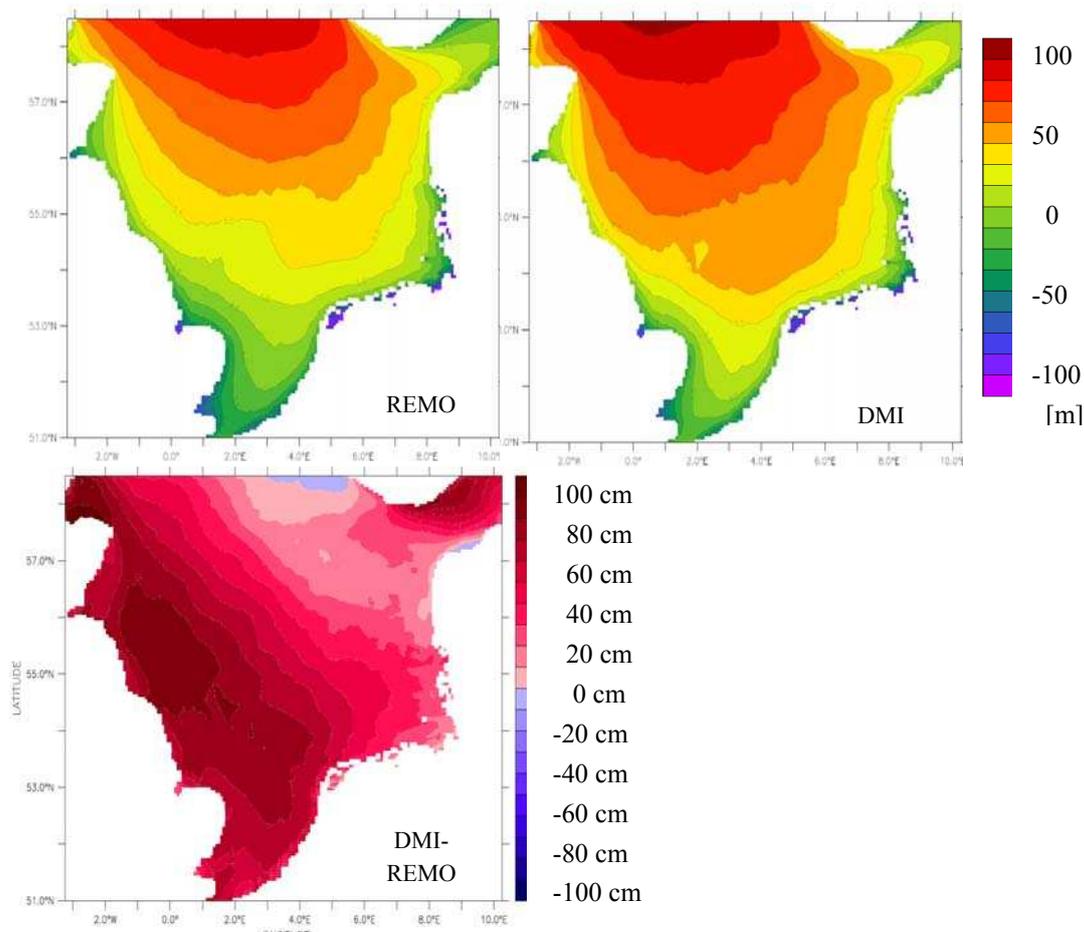


Abbildung 2.11: 99. Perzentil der signifikanten Wellenhöhe (SWH) für die Referenzperiode 1961-1990 im Modell REMO (oben links), DMI-HIRHAM (oben rechts) und die Differenz DMI-REMO (unten)

Sowohl für die Offshore-Industrie wie auch für die Sicherheit der Seeschifffahrtswege ist vor allem die mögliche Auswirkung des Klimawandels auf die höheren Wellen relevant. In Abb. 2.11 ist als ein Maß für extremere Wellen das 99. Perzentil der H_s für die Referenzperiode 1961-1990 dargestellt. Wie in Abb. 2.9 wird links das Ergebnis für den Windantrieb mit REMO, in der Mitte mit DMI-HIRHAM und rechts die Differenz der beiden Antriebe gezeigt. In der zentralen nördlichen Nordsee werden dabei Werte von etwa 7,5 m (REMO) bzw. 8 m (DMI) für das 99. Perzentil erreicht. Insgesamt zeigt sich für beide Antriebe eine ähnliche Struktur wie bei der mittleren H_s (Abb. 2.9). Die Auswirkung der abnehmenden Wassertiefe zu den Küsten oder an der Doggerbank wie auch die abnehmenden Wellenhöhen von Nord nach Süd sind deutlich zu erkennen.

Differenzbild (DMI minus REMO, Abb. 2.11) lässt wieder höhere Werte der H_s beim DMI-Antrieb, vor allem in der westlichen Nordsee erkennen, wobei die maximalen Unterschiede beim 99. Perzentil bis 1 m betragen.

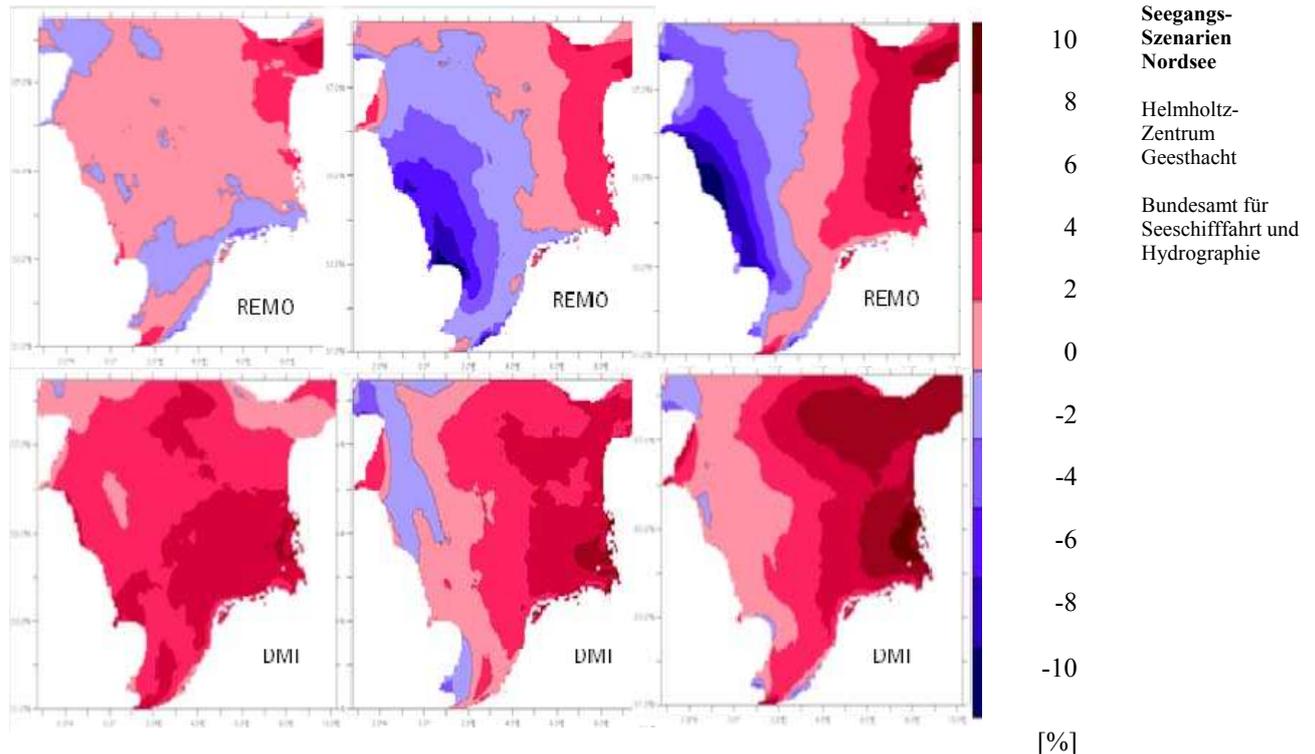


Abbildung 2.12: Änderung des 99. Perzents der signifikanten Wellenhöhe (SWH) im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 im Modell REMO (oben) und DMI-HIRHAM (unten) in %, für die Perioden 2011-2040 (links), 2041-2070 (Mitte) und 2071-2100 (rechts).

Die prozentualen Änderungen des 99. Perzents der H_s für die drei 30-Jahresperioden in der Zukunft im Vergleich zur Referenzperiode sind in Abb. 2.12 dargestellt. Wie für die mittlere H_s (siehe Abb. 2.10) zeigen beide Modelle eine Zweiteilung, mit einer Zunahme des 99. Perzents der SWH im Osten und einer Abnahme (REMO) bzw. leichten Zunahme (DMI) in der westlichen Nordsee. Allerdings wird diese Dipolstruktur erst später (ab der 30-Jahresperiode 2040-2070) erkennbar und die prozentualen Änderungen erscheinen weniger „glatt“ als bei der mittleren H_s . Dennoch ist auch beim 99. Perzentil eine Verstärkung dieser Dipolstruktur zum Ende des Jahrhunderts erkennbar, mit etwa den gleichen prozentualen Änderungen wie für die mittlere H_s (für REMO ca. 8% Zunahme in der Deutschen Bucht und bis zu 10 % Abnahme vor der englischen Ostküste).

Zeitliches Klimaänderungssignal

Die oben dargestellten Analysen zeigen die räumliche Struktur des Klimaänderungssignals. Für eine Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Klimaänderung ist in Abb. 2.13 das 30-jährige gleitende Mittel des jährlichen 99. Perzents der H_s exemplarisch für vier Stationen im Lauf REMO dargestellt. Gezeigt werden zwei Stationen in der Deutschen Bucht (vor Sylt und vor Norderney als Beispiel für Regionen mit größer werdender H_s), eine Station vor der englischen Ostküste (als Beispiel für eine Region mit abnehmender H_s) und eine Station in der zentralen nördlichen Nordsee (exemplarisch für Gebiete, in denen das Mittel über die 30-jährigen Zeitscheiben keine Ände-

rung der Hs zeigt). Für das Gebiet der Deutschen Bucht erkennt man eine dekadische Variabilität der Hs, die nur etwas kleiner als die Zunahme über die 110 Jahre ist und im Bereich von etwa 20 cm liegt. Es zeigt sich eine große Übereinstimmung im zeitlichen Verlauf zwischen den beiden Stationen der DEUTSCHEN BUCHT, NORDERNEY und SYLT, daher wird in den folgenden Untersuchungen nur noch die Station SYLT als Beispiel für die Deutsche Bucht gezeigt. In der westlichen Nordsee wird eine ähnlich starke dekadische Variabilität deutlich, allerdings ist hier das (negative) Änderungssignal noch etwas größer. Die dekadische Variabilität in der nördlichen Nordsee ist auch stark ausgeprägt, während hier nach über 100 Jahren kein Trend erkennbar ist.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass dem Änderungssignal der Hs in der gesamten Nordsee eine starke dekadische Variabilität überlagert ist. Die in Abb. 5 gezeigten gleitenden Mittel des 99. Perzentils der Hs machen deutlich, welchen großen Einfluss der Startzeitpunkt und die Länge der untersuchten Zeitperiode auf das Ergebnis hat. So würde beispielsweise eine Untersuchung der Hs in der nördlichen Nordsee über den Zeitraum von 2010 bis 2040 (2040-2070) auf einen stark positiven (negativen) Trend des 99. Perzentils der Hs schließen lassen, während im gleichen Gebiet über den gesamten Zeitraum kein Trend feststellbar ist.

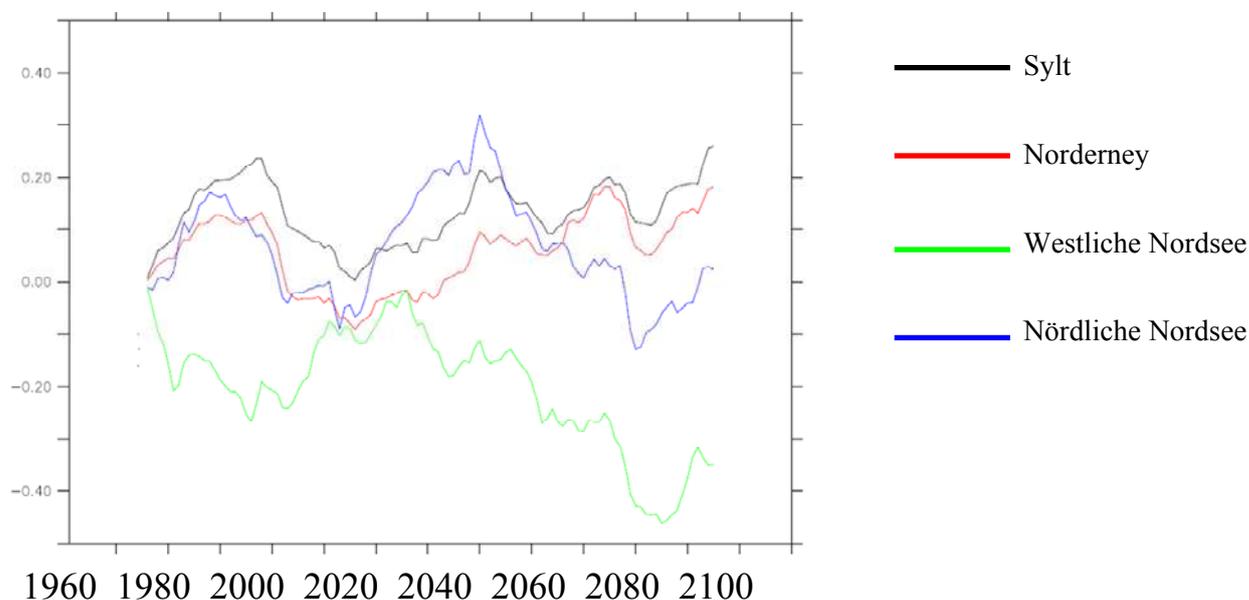


Abbildung 2.13: 30-jähriges gleitendes Mittel des 99. Perzentils der SWH im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 im Modell REMO für vier Stationen in der Nordsee (siehe Abb. 2.12)

Die in Abb. 2.10 und Abb. 2.14 dargestellten Änderungen der Hs zeigen eine Abschwächung im Westen und eine Verstärkung im Osten. Das Gebiet der Nordsee ist allerdings zu klein, um dies nur mit Änderungen der Windstärke erklären zu können. Um einen eventuellen Einfluss der Windrichtungen zu untersuchen, wurden Rich-

tungsspektren des Seegangs berechnet, da so geänderte Hauptwellenrichtungen erkannt werden können.

Seegangs-
Szenarien
Nordsee

Abbildung 2.14 zeigt exemplarisch für die drei Regionen Deutsche Bucht (oben), westliche Nordsee (Mitte) und nördliche zentrale Nordsee (unten) Seegangsspektren für die Referenzperiode 1961-1990 (links), die Periode 2071-2100 (Mitte) und die Änderungen des Seegangsspektrums von 1961-1990 zu 2071-2100. Dargestellt wird die Wellenenergie [in m^2s] in Abhängigkeit von der Wellenlaufrichtung und der Wellenfrequenz [in Hz]. Dabei bedeutet ein Maximum in östlicher Richtung, dass die Wellen nach Osten laufen, also aus Westen kommen. Je näher das Maximum am Mittelpunkt der Polardarstellung liegt, desto kleiner ist die Frequenz und desto größer die Wellenperiode.

Helmholtz-
Zentrum
Geesthacht

Bundesamt für
Seeschifffahrt und
Hydrographie

Für die Deutsche Bucht (Abb. 2.14, oben) erkennt man, dass die energiereichsten (also höchsten) Wellen aus westlichen Richtungen (genauer von NW bis WSW) kommen mit einer Wellenperiode von etwa 10 s. Zum Ende des Jahrhunderts verstärken sich die Wellen aus W um bis zu 20%, was einer Wellenerhöhung um etwa 10 % entspricht.

In der westlichen Nordsee (Abb. 2.14, Mitte) liegt das Energiemaximum bei Wellen aus nördlichen Richtungen bei einer Wellenperiode von etwa 12 s. Sowohl die Richtung wie auch die Länge der Wellen sprechen dafür, dass es sich hierbei um einlaufende Dünung aus dem Nordostatlantik handelt. Dass in dieser Region (in der ebenfalls die Starkwinde meist aus West kommen) die Wellen aus Westen keine Rolle spielen, liegt an dem geringen Fetch für Wellen aus diesen Richtungen. Zum Ende des Jahrhunderts zeigt sich eine Abschwächung des Energiemaximums aus Norden. Gleichzeitig erkennt man wie in der Deutschen Bucht energiereichere Wellen aus allen westlichen Richtungen von NNW bis SSW.

In der nördlichen zentralen Nordsee (Abb. 2.14, unten) liegt das Maximum für Richtungen aus N bei einer Wellenlänge von etwa 15 s. Hier erkennt man allerdings auch für fast alle anderen Richtungen (außer für Wellen aus NE) energiereiche Wellen (man achte auf die veränderte Skalierung im Vergleich zur Deutschen Bucht) bei allerdings geringerer Wellenlänge von etwa 10 s. Zum Ende des Jahrhunderts zeigt sich zum einen wie in der westlichen Nordsee eine starke Abschwächung der Wellen aus N-lichen Richtungen (bis zu 25 %), zum anderen aber eine Verstärkung für Wellen aus SW-lichen Richtungen um bis zu 20 %. Außerdem erkennt man eine Abschwächung der Wellen aus östlichen Richtungen. Wie schon für die westliche Nordsee und die Deutsche Bucht zeigt sich auch hier eine generelle Verstärkung der Wellen aus allen westlichen Richtungen von NNW bis SSW.

In allen untersuchten Regionen der Nordsee nehmen Wellen aus W-lichen Richtungen bis zum Ende des Jahrhunderts zu und aus östlichen Richtungen ab. Diese Zunahme ist insbesondere für das Gebiet der Deutschen Bucht relevant, da hier der Fetch für Wellen aus W besonders lang ist. In der westlichen Nordsee kann diese Zunahme keinen Einfluss nehmen aufgrund des geringen Fetches für Wellen aus W.

Hier sind die Abnahme der Wellenenergie aus NE-lichen und vor allem N-lichen Richtungen entscheidend. In der zentralen nördlichen Nordsee zeigen sich zwei gegenläufige Trends: zum einen eine Abschwächung der Dünung aus N und zum anderen eine stärkere Windsee aus SW-lichen Richtungen.

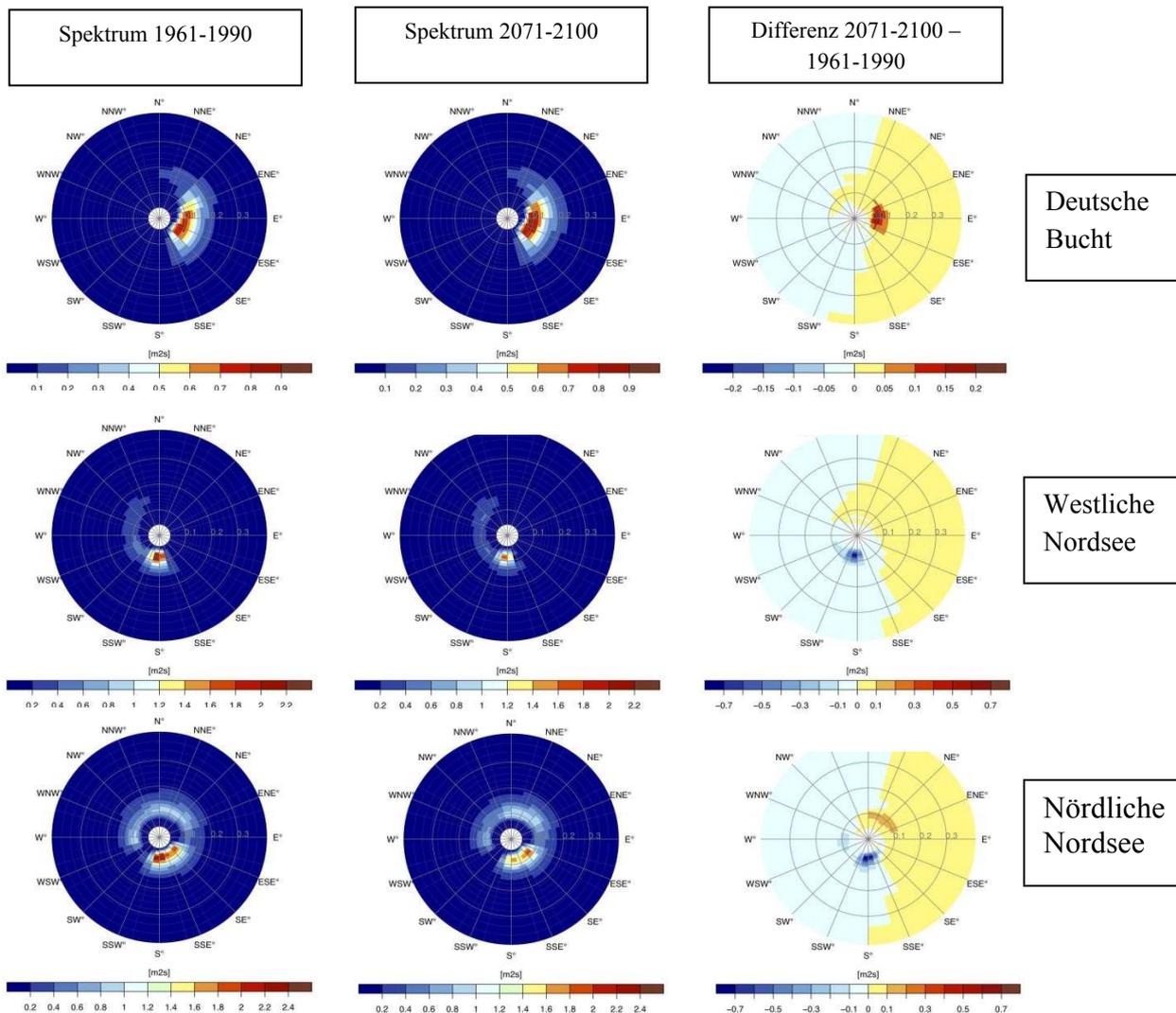


Abbildung 2.14: Mittleres Seegangsspektrum für die Periode 1961-1990 (links), 2071-2100 (mitte) und Differenz 2071-2100 minus 1961-1990 (rechts) an den Stationen vor Sylt SYL (55N, 8E, oben), westliche Nordsee TYN (55N, 2W, mitte) und nördliche Nordsee FOR (58N, 2E, unten). Die Skalierung für das Spektrum vor Sylt wurde zur besseren Darstellung der Verhältnisse angepasst.

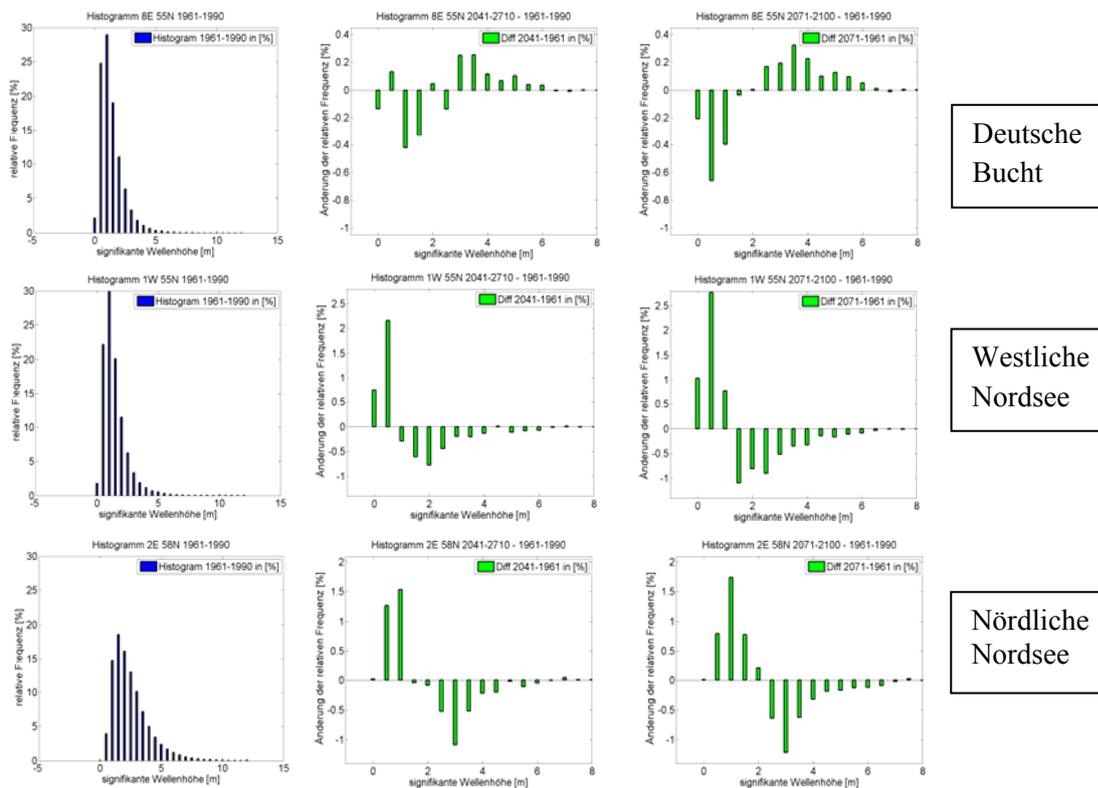


Abbildung: 2.15: Histogramm der SWH in Wellenklassen von 0,5 m für die Periode 1961-1990 (links), sowie die relativen prozentualen Änderungen in den Wellenklassen für 2041-2070 (Mitte) und 2071-2100 (rechts) an den Stationen vor Sylt (55N, 8E, oben), westliche Nordsee (55N, 2W, mitte), nördliche Nordsee (58N, 2E, unten).

Änderung der Wellenklassen

Die bisherigen Darstellungen beschränkten sich auf die mittlere H_s bzw. das 99. Perzentil der H_s . In Abb. 2.15 sind die Änderungen der H_s als Histogramm, aufgeteilt in Halbmeterklassen dargestellt, für die Referenzperiode 1961-1990, sowie die relativen Änderungen zu 1961-1990 für 2041-2070 und 2071-2100 an den Stationen Deutsche Bucht, westliche Nordsee und nördliche zentrale Nordsee. Für die Stationen Deutsche Bucht und westliche Nordsee erkennt man Wellen von 1,0 bis 1,5 m als häufigste Wellenklasse mit jeweils knapp 30 % Anteil, während in der nördlichen Nordsee die häufigste Wellenklasse bei 2,0-2,5 m liegt mit nur knapp 20 % Anteil. Dort fallen vor allem die größeren Anteile der hohen Wellen über 2m auf.

Für die Änderungen der Wellenverteilung ergibt sich folgendes:

- In der Deutschen Bucht werden die niedrigen Wellen ($H_s < 2\text{m}$) in der Zukunft seltener und die hohen Wellen ($H_s > 2\text{m}$) häufiger, diese Verschiebung ist schon ab 2041 zu erkennen

- b) In der westlichen Nordsee werden umgekehrt die niedrigen Wellen häufiger und die höheren Wellen ($H_s > 1,5$ m) seltener. Auch hier ist die Änderung schon ab 2041 sichtbar.
- c) In der nördlichen zentralen Nordsee werden wie in der westlichen Nordsee ebenfalls die niedrigen Wellen ($H_s < 2$ m) häufiger und die höheren Wellen seltener.

Für die Deutsche Bucht und die westliche Nordsee stehen diese Resultate in Übereinstimmung sowohl mit der Verschiebung des 99. Perzentils (Abb. 2.13) wie auch mit den Ergebnissen aus den Richtungsspektren (Abb. 2.14). Dort ergab sich für die Deutsche Bucht (westliche Nordsee) eine Erhöhung (Erniedrigung) des 99. Perzentils und eine Verstärkung (Abschwächung) des Energiemaximums in jeweils genau der Richtung des Maximums.

In der zentralen nördlichen Nordsee würde man die beobachtete Verschiebung hin zu häufigeren niedrigen Wellen (Abb. 2.15) aus dem etwa gleichbleibenden 99. Perzentil (Abb. 2.13) so nicht erwarten. Allerdings erkennt man im Histogramm, dass v. a. die Wellen mit einer H_s von etwa 2,5 m bis 7,5 m seltener auftreten, während die noch höheren Wellen etwa gleich bleiben bzw. sogar etwas häufiger werden (in Abb. 2.15 nur dargestellt bis einer H_s von 8,5 m). Da in dem Seegebiet das 99. Perzentil bei etwa 7,5 m liegt, lässt sich so die Konstanz des 99. Perzentils erklären. Für noch höhere Wellen scheint hier die Zunahme der Energie der Windwellen aus SW-lichen Richtungen die Abnahme der Dünung aus N etwa zu kompensieren (siehe Abb. 2.14).

Anwendungsbezogene Änderungen

Für den Aufbau und Betrieb der Offshore-Bauwerke (z.B. Windkraftanlagen) ist weniger das 99. Perzentil der H_s entscheidend, sondern eher die zu erwartende Häufigkeit und Dauer von Schönwetterperioden (für Installations- bzw. Reparaturarbeiten) sowie die zu erwartende maximale Wellenhöhe (die sogenannte Jahrhundertwelle).

In Tabelle 2.2 sind, wieder beispielhaft für die drei Stationen, durchschnittliche jährliche Häufigkeiten der sogenannten Wetterfenster dargestellt. Als Wetterfenster bezeichnet man hier die Zeiträume, in denen die H_s die Höhe von 2 m nicht überschreitet. Ein Lesebeispiel: In der Deutschen Bucht nimmt die Anzahl der Perioden, in denen für mindestens 24 h die H_s 2 m nicht überschreitet, von jährlich etwa 42.3 (von 1961-1990) auf 43.3 (2071-2100) zu. Aus der Entwicklung sowohl des 99. Perzentils (Abb. 2.10 und Abb. 2.12) wie auch der Wellenklassen (Abb. 2.15) könnte man eventuell häufigere günstige Wetterfenster in der westlichen Nordsee und seltenere günstige Wetterfenster in der Deutschen Bucht erwarten, dies lässt sich aber nur für Andauern von mehr als einen Monat belegen.

Deutsche Bucht (55°N; 8°E)				
HS < 2 m	1961-1990	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Dauer > 1 Tag	42.3	44.2	42.1	43.3
Dauer > 2 Tage	30.8	31.6	31.3	32.5
Dauer > 1 Woche	12	12.4	12.6	12.4
Dauer > 1 Monat	1.0	1.1	0.9	0.8
Westliche Nordsee (55°N; 1°W)				
Dauer > 1 Tag	39	38.2	38.9	38.7
Dauer > 2 Tage	29.8	28.9	28.7	29.7
Dauer > 1 Woche	11.7	10.7	11.9	11.1
Dauer > 1 Monat	1.3	1.6	1.8	1.6
Nördliche Nordsee (58°N; 2°E)				
Dauer > 1 Tag	42.6	42.9	42.5	45.4
Dauer > 2 Tage	25.4	25.7	26.7	25.7
Dauer > 1 Woche	5	4.9	5.4	6.1
Dauer > 1 Monat	0.1	0	0.1	0.1

Tabelle 2.2: Anzahl der so genannten Wetterfenster (hier Zeiten, in denen die SWH ununterbrochen kleiner als 2 m ist) für 30-jährige Perioden an den verschiedenen Stationen.

100-jähriger Wiederkehrwert	1961-1990	2011-2040	2041-2070	2071-2100
55°N, 8°E	10,85	11,17	11,18	11,38
55°N, 1°W	11,49	11,42	11,00	10,48
58°N, 2°E	17,82	17,92	17,90	17,68

Tabelle 2.3 Wiederkehrwerte [in m] für 100-jährige Wiederkehrperioden in verschiedenen 30-Jahresperioden. Berechnet aus den Werten der jeweiligen 30-Jahresperiode, mit Annahme einer GEV-Verteilung, nach Gumbel.

Während für Installation und Reparaturarbeiten der Offshore-Bauwerke die Wetterfenster eine entscheidende Rolle spielen, ist für die Planung der Höhe des Bauwerks und Stabilität der Fundamente die größte anzunehmende Welle (meist für einen bestimmten Zeitraum berechnet) wichtig.

In Tabelle 2.3 sind die 100-jährigen Wiederkehrwerte (also der Wert der Hs, der aufgrund der stündlichen Modellwerte einmal in 100 Jahren erwartet wird) für die drei Stationen und verschiedene 30-Jahresperioden dargestellt. Deutlich wird eine zukünftige Verschiebung in der Deutschen Bucht (westlichen Nordsee) zu höheren (niedrigeren) Werten, während sie in der nördlichen zentralen Nordsee etwa stabil bleiben. Dies ist in Übereinstimmung mit den Änderungen des 99. Perzentils der Hs (Abb. 2.12) wie auch den Wellenklassen (Abb. 2.15), allerdings ist die zwischenjährliche Entwicklung der 100-jährigen Wiederkehrwerte nicht so linear, wie es obige Tabelle

suggestiert, sondern es gibt auch hier (ähnlich wie für das 99. Perzentil der H_s , Abb. 2.13) dekadische Schwankungen. Auch sind die Ergebnisse in der Extremwertstatistik sehr stark von der verwendeten Methode abhängig.

3 Statistische Seegangsszenarien für die Nordsee

Seegangs-
Szenarien
Nordsee

Helmholtz-
Zentrum
Geesthacht

Bundesamt für
Seeschifffahrt und
Hydrographie

3.1 Einleitung

Dynamische Seegangsszenarien stellen einen optimalen Ansatz dar, Änderungen des Seegangsklimas konsistent, in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung, sowie detailliert in Abhängigkeit vom gewählten atmosphärischen Antrieb (Modell und Emissionsszenario) zu beschreiben. Aufgrund des mit ihrer Erstellung verbundenen hohen Bedarfs an Computerressourcen ist die Anzahl solcher dynamischer Seegangsszenarien, die auf diese Art und Weise erstellt werden können jedoch begrenzt. Der Ansatz eignet sich daher nur eingeschränkt, um Spannbreiten möglicher Änderungen zu erfassen.

Ergänzend zu den im vorigen Abschnitt vorgestellten dynamischen Seegangsszenarien wurde deshalb hier zusätzlich ein statistischer Ansatz entwickelt. Im Gegensatz zu den dynamisch erstellten Szenarien lassen sich hier keine detaillierten Abläufe, sondern lediglich Änderungen statistischer Eigenschaften des Seegangsklimas, wie z.B. Jahres- oder saisonale Mittel, erfassen. Aufgrund des ausgesprochen geringen Rechenzeitbedarfs lassen sich mit dieser Methode jedoch Seegangsprojektionen für eine große Vielzahl von atmosphärischen Antrieben (verschiedene Szenarien und/oder Modelle) erstellen und Spannbreiten robust abschätzen. Die Ergebnisse des statistischen Modells werden im Wesentlichen dazu verwendet, die Aussagen der dynamischen Seegangsszenarien in einem breiteren Kontext einzuordnen und zu bewerten.

3.2 Daten und Methoden

3.2.1 Statistisches Modell

Ausgehend von der Idee, dass zwischen dem Seegangsfeld und der großskaligen atmosphärischen Zirkulation ein enger Zusammenhang besteht, wurde ein statistisches Modell zwischen verschiedenen Parametern, die die atmosphärische Zirkulation und verschiedenen Parametern, die das Seegangsfeld beschreiben entwickelt.

Analog dem in WASA (1998) vorgestellten Ansatz wurde dazu ein Regressionsmodell zwischen den Vektorzeitreihen verschiedener atmosphärischer Parameter (z.B. jährliche oder saisonal Mittel des Lufrucks auf Meeresniveau [SLP]) und den Vektorzeitreihen verschiedener Seegangparameter (z.B. jährliche oder saisonal Mittel oder Perzentile der signifikanten Wellenhöhe [Hs]) erstellt. In einem ersten Schritt wurden zunächst Anomalien der jeweiligen Vektorzeitreihen berechnet (d.h. die lang-

jährigen Mittel wurden subtrahiert) und eine Datenreduktion mit Hilfe einer empirischen Orthogonalfunktion (EOF) Analyse durchgeführt, um künstlich erhöhte Korrelationen zu vermeiden (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 (von Storch und Zwiers, 1995). Die so erhaltenen Redundanzbeziehungen lieferten anschließend die Grundlage, um aufgrund atmosphärischer Szenarienrechnungen Aussagen über mögliche zukünftige Änderungen des Seegangsklimas in der Nordsee abzuleiten.

3.2.2 Daten

Zur Erstellung der statistischen Beziehung zwischen Seegang in der Nordsee und großräumiger atmosphärischer Zirkulation wurde der coastDat-1 Datensatz (Weisse et al., 2009) verwendet. Dieser Datensatz wurde mit Hilfe eines konsistenten meteorologischen Hindcasts für die Nordsee erstellt und umfasst neben stündlichen atmosphärischen Daten wie Wind und Luftdruck auf Meeressniveau auch stündliche Seegangdaten, Wasserstände und Strömungen des Zeitraums 1958-2007. Weiss et al. (2005) zeigten, dass der Datensatz die langfristige Variabilität im Sturmklimate im nordeuropäischen Raum realistisch wiedergibt. Winterfeldt et al. (2011) untersuchten im Detail die bodennahen Windgeschwindigkeiten dieses Datensatzes und verglichen sie mit in-situ Messungen und Satellitendaten. Sie schlussfolgerten, dass im marinen Bereich die bodennahen Windgeschwindigkeiten von coastDat-1 realistisch wiedergegeben werden und insbesondere im küstennahen Bereich die Qualität der coastDat-1 Windfelder besser als die der das Regionalmodell antreibenden Reanalysedaten sind. Eine Validation der Wasserstands- und Seegangdaten von coastDat-1 ist in Weiss und Pluess (2006) sowie in Weiss und Günther (2007) beschrieben.

Zur Erstellung der Szenariendaten wurden im Gegensatz zum Antrag auf das größere CMIP3 Ensemble (Meehl et al. 2007) zurückgegriffen, um eine bessere Abschätzung möglicher Spannbreiten zu erhalten. Abbildung 3.1 gibt einen Überblick über die in CMIP3 vorhandenen atmosphärischen Szenarienrechnungen. Zur Erstellung der Seegangsszenarien wurden jeweils von der Seite <http://www-pcmdi.llnl.gov/> die monatlichen mittleren Luftdruckdaten auf Meeressniveau herunter geladen und anschließend auf das coastDat-1 Gitter interpoliert. Anschließend wurde eine Datenreduktion wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben durchgeführt und mit Hilfe der so erhaltenen Daten und des erstellten Regressionsmodells Projektionen für das Seegangsklima in der Nordsee erstellt.

Monthly Mean Atmosphere Data Availability (as of 27 February 2008)

1 realization multiple realizations

	PIntrl	PDntrl	20C3M	Commit	SRESA2	SRESA1B	SRESB1	1%to2x	1%to4x	Slabcntl	2xCO2	AMIP
BCC-CM1, China												
BCCR-BCM2.0, Norway	1		1	1	1	1	1	1				
CCSM3, USA	2	1	9	5	5	7	8	1	1	1	1	1
CGCM3.1(T47), Canada	1		5	5	5	5	4	1	1	1	1	
CGCM3.1(T63), Canada	1		1			1	1	1		1	1	
CNRM-CM3, France	1		1	1	1	1	1	1	1			1
CSIRO-Mk3.0, Australia	2		3	1	1	1	1	1		1	1	
CSIRO-Mk3.5, Australia	1		1	1	1	1	1	1				
ECHAM5/MPI-OM, Germany	1		4	3	3	4	3	3	1	1	1	3
ECHO-G, Germany/Korea	1	1	5	4	3	3	3	1	1			
FGOALS-g1.0, China	3		3	3		3	3	3				3
GFDL-CM2.0, USA	1		3	1	1	1	1	1	1	1	1	
GFDL-CM2.1, USA	1		3	1	1	1	1	1	1			
GISS-AOM, USA	2		2			2	2					
GISS-EH, USA	1		5			4		1				
GISS-ER, USA	1		9	1	1	5	1	1	1	1	1	4
INGV-SXG, Italy	1		1		1	1		1	1			
INM-CM3.0, Russia	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
IPSL-CM4, France	1	1	2	1	1	1	1	1	1			6
MIROC3.2(hires), Japan	1		1			1	1	1		1	1	1
MIROC3.2(medres), Japan	1		3	1	3	3	3	3	3	1	1	3
MRI-CGCM2.3.2, Japan	1	1	5	1	5	5	5	1	1	1	1	1
PCM, USA	1	1	4	3	4	4	4	5	1			1
UKMO-HadCM3, UK	2		2	1	1	1	1	1				
UKMO-HadGEM1, UK	1		1		1	1		2	1	1	1	1

a shaded box indicates that at least some, but not necessarily all, fields of this type are available

Seegangs-Szenarien Nordsee

Helmholtz-Zentrum Geesthacht

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Abbildung 3.1 Verfügbarkeit monatlich gemittelter atmosphärischer Luftdruckdaten im CMIP3 Ensemble, Quelle: http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/data_status_tables.htm

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Anpassung des Modells

Abbildung 3.2 zeigt die Ergebnisse der Redundanzanalyse am Beispiel des Zusammenhangs zwischen großräumigen jährlichen Anomalien des mittleren Luftdruckfeldes und der signifikanten Wellenhöhe. Das atmosphärische Anomalienmuster beschreibt einen Dipol mit erhöhtem Bodenluftdruck im Nordosten und verringertem Bodenluftdruck im Südwesten des Modellgebiets. Dieses Muster hat starke Ähnlichkeit mit der Nordatlantischen Oszillation und erklärt etwa 42% der Varianz der Schwankungen im jährlichen Bodenluftdruckfeld. Dieses atmosphärische Anomalienmuster ist mit verringerten jährlichen Mitteln der signifikanten Wellenhöhe in der südöstlichen und erhöhten Werten in der südwestlichen Nordsee und umgekehrt verbunden. Dieses Anomalienmuster erklärt etwa 85% der beobachteten Varianz der Schwankungen im jährlichen mittleren Wellenhöhenfeld in der südlichen Nordsee. Die zu den Anomalienmustern gehörigen Zeitreihen sind mit etwa 0,81 korreliert, d.h. dieses Redundanzmuster zwischen jährlichen mittleren Luftdruck und Wellenhöhen-

anomalien beschreibt eine Regression, die etwa 56% (85% erklärte Varianz des Wellenhöhenmusters mal Korrelation von 0,81 zum Quadrat) der Varianz der jährlichen mittleren Wellenhöhe beschreibt. Betrachtet man nur die Werte im Winter (Dezember, Januar, Februar) so erhöht sich dieser Varianzanteil von 56% auf etwa 73%.

Betrachtet man statt jährlicher Mittel der signifikanten Wellenhöhe, deren Extreme in Form jährlicher 99%-Perzentile, so fällt die statistischen Beziehungen deutlich geringer aus. Bei ähnlichen räumlichen Mustern, beschreibt das erste Redundanzmuster lediglich noch eine Regression, die im jährlichen Mittel noch etwa 16% und im saisonalen Mittel (Dezember, Januar, Februar) noch 37% der Varianz des extremen Seegangsfelds beschreibt. Im Folgenden werden deshalb lediglich die mittleren Bedingungen betrachtet.

3.3.2 Anwendung des statistischen Modells

Die so erhaltenen Regressionsbeziehungen wurden anschließend auf das CMIP3 Ensemble angewandt und Spannbreiten möglicher Änderungen bestimmt. Hierzu wurden aus den vorhandenen Modellsimulationen (Abb. 3.1) diejenigen ausgewählt, für die jeweils mindestens 4 Realisationen des A1B Szenarios zur Verfügung standen. Da teilweise nicht für alle in Abb. 3.1 aufgeführten Läufe auch monatliche Bodenluftdruckdaten verfügbar waren, ergab sich im Detail folgende Auswahl von insgesamt 30 Realisationen (Tab. 3.1):

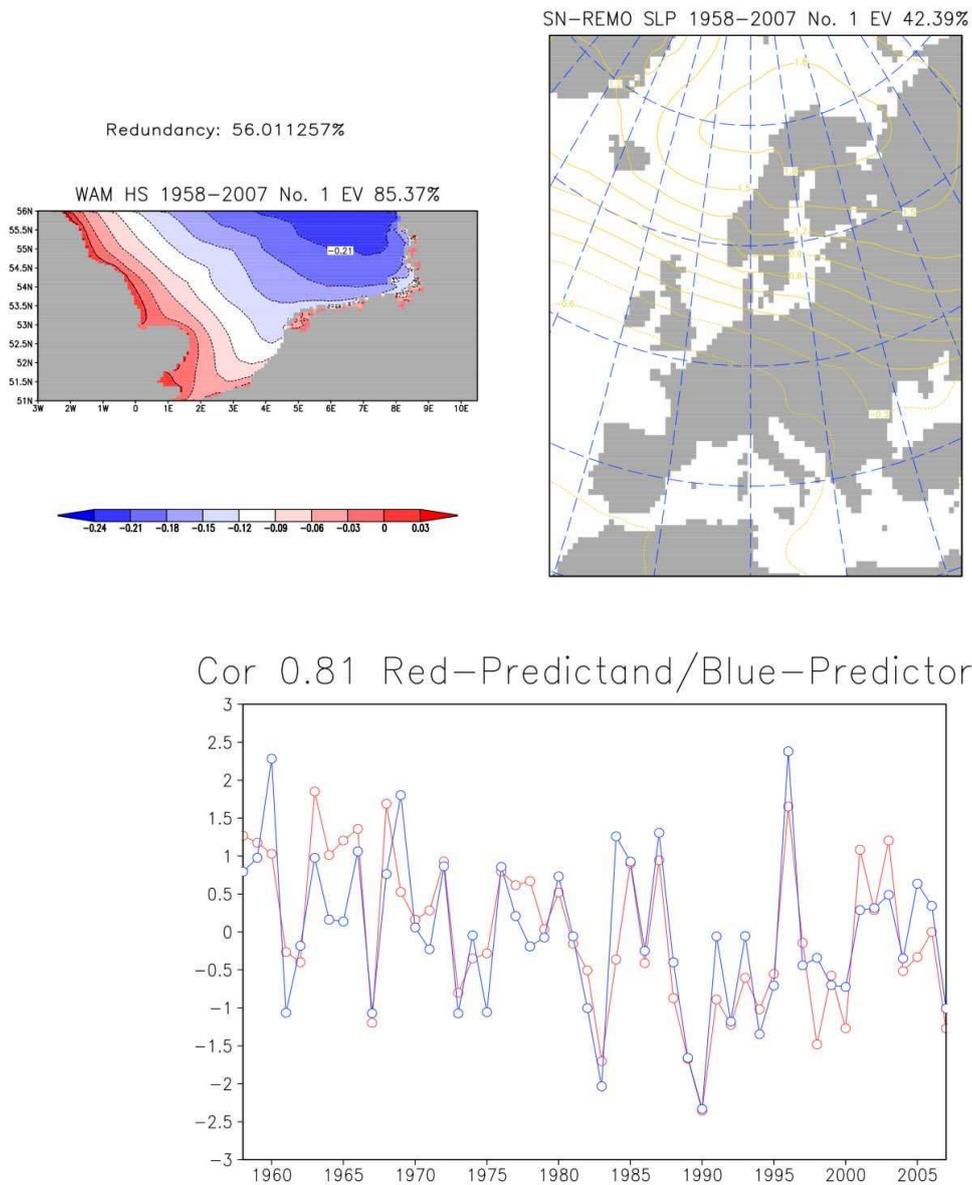


Abbildung 3.2 Ergebnisse der Redundanzanalyse zwischen Anomalien des jährlichen mittleren Luftdruckfeldes und Anomalien der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe in der südlichen Nordsee auf Basis stündlicher Werte des coastDat-1 Hindcasts 1958–2007 (Weisse et al. 2009). Dargestellt ist das 1. Redundanzmuster für die signifikante Wellenhöhe in m (links oben) und das Bodenluftdruckfeld in hPa (rechts oben) sowie die zugehörigen Zeitreihen (unten; Wellenhöhe - rot, Bodenluftdruck - blau). Der Redundanzindex (s. von Storch und Zwiers 1998) beträgt etwa 56%.

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, 5, 6, 7, 9	Run 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9	7
MPI ECHAM5 (Germany)	Run 1, 2, 3, 4	Run 1, 2, 3, 4	4
CGCM3.1 (Canada)	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

Tabelle 3.1: Modellrechnungen des CMIP3 Archivs, für die das statistische Downscaling durchgeführt wurde. Quelle: http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/data_status_tables.htm

Aufgrund der Stärke der gefundenen Regressionsbeziehungen wurde das Modell jeweils auf Anomalien des jährlichen mittleren Luftdruckfeldes angewandt, um Anomalien und daraus Spannbreiten der Änderungen der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe abzuleiten.

Abbildung 3.3 zeigt exemplarisch Zeitreihen von Anomalien der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe an einem Gitterpunkt in der Deutschen Bucht für alle 30 Realisationen. Auffallend ist hier zunächst eine stark ausgeprägte dekadische Variabilität, die sich in der allerdings lediglich in der Größenordnung von wenigen Zentimetern bewegt. Weiterhin auffallend ist, dass, bis auf wenige Ausnahmen, alle Modelle und Realisationen einen relativ ähnlichen zeitlichen Verlauf mit relativ niedrigen Werten um etwa 2010-2020 und relativ hohen Werten in den Zeiträumen davor und danach zeigen. Die Werte zum Ende der Projektionsperiode (2070-2100) liegen dabei auf relativ hohem Niveau. Dieses Niveau ist jedoch in etwa vergleichbar mit dem zum Ende des 20. Jahrhunderts, so dass sich hier keine ausgeprägten Klimaänderungssignale ausmachen lassen.

Betrachtet man Klimaänderungssignale in Szenarienrechnungen, werden typischerweise 30-jährige Mittelwerte zum Ende des Jahrhunderts mit denen zum Ende des vorigen Jahrhunderts betrachtet. Abbildung 6.4 zeigt eine solche Analyse exemplarisch für die 4 Realisationen des ECHAM5 Modells. Auffallend ist hier, dass alle 4 Realisationen zu einer Zunahme der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe in der südlichen Nordsee führen. Diese liegen typischerweise zwischen etwa 0 und maximal 5%, wobei die höchsten Werte vor der nordfriesischen Küste simuliert werden. Im Ensemblemittel betragen die größten Änderungen etwa 2%.

Während auf Grundlage des ECHAM5 Modells generell ein wenn auch geringer Anstieg der mittleren jährlichen Wellenhöhen zum Ende des Jahrhunderts projiziert wird, werden durch die anderen Modelle sowohl Abnahmen als auch Anstiege projiziert (Abb. A1-1 bis A1-5 im Anhang). Generell haben hier bereits einzelne Realisationen der einzelnen Modelle unterschiedliche Vorzeichen, was auf eine im Vergleich zu den erwarteten treibhausgasbedingten Änderungen im Seegangsklima hohe natürliche Variabilität schließen lässt. Wie bereits für das ECHAM5 Modell diskutiert,

sind die Änderungen auch hier im Bereich von etwa -5% bis +5%. Für einzelne Realisationen werden Werte bis $\pm 10\%$ erreicht.

Seegangs-
Szenarien
Nordsee

Helmholtz-
Zentrum
Geesthacht

Bundesamt für
Seeschifffahrt und
Hydrographie

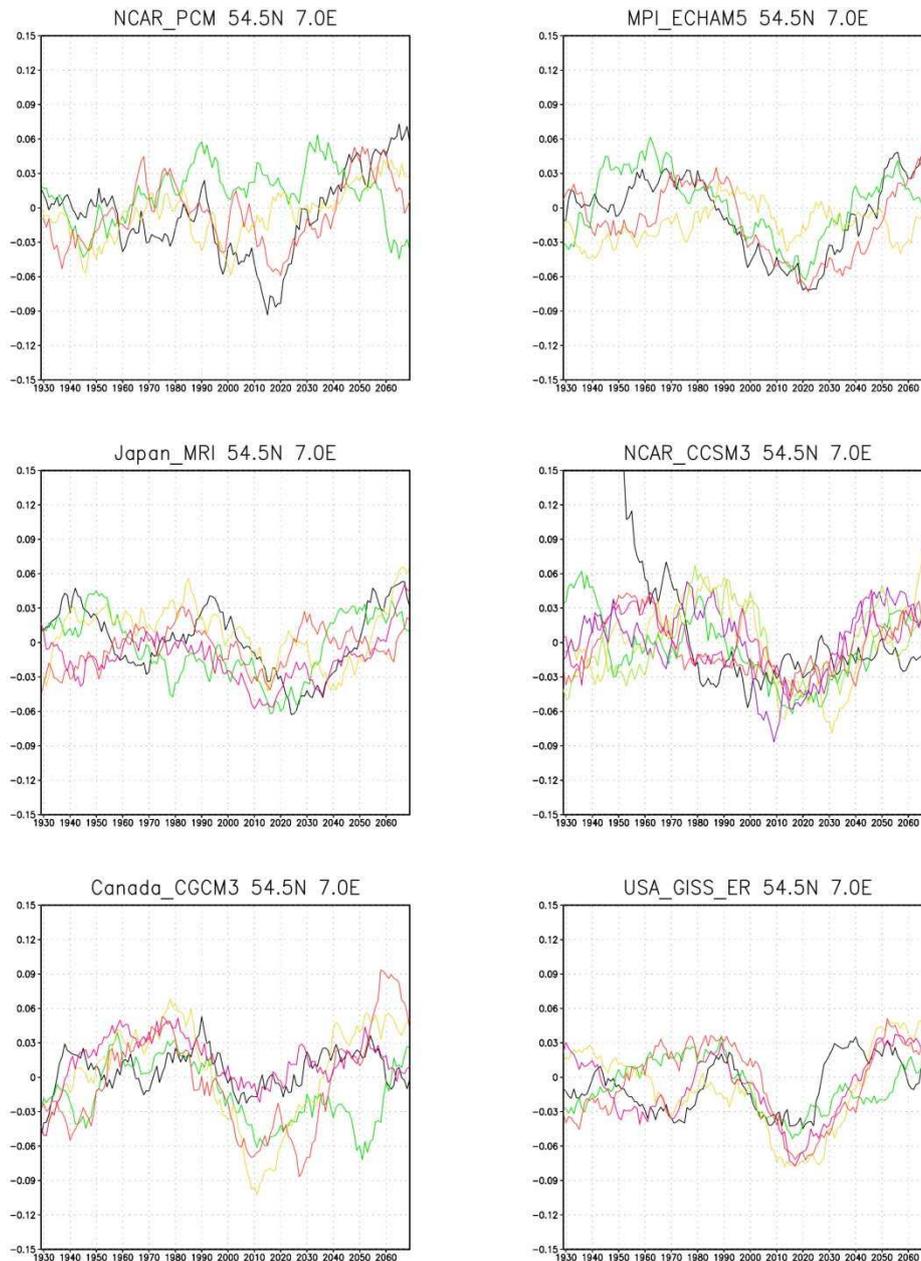


Abbildung: 3.3: Zeitreihen von Anomalien (in m) der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhen am Gitterpunkt 54.5 N, 07.00 E in der Deutschen Bucht ermittelt mit Hilfe des statistischen Modells anhand der bodennahen Luftdruckdaten der dargestellten Modelle. Gezeigt sind jeweils die Zeitreihen für 30-jährig gleitende Mittel der einzelnen Realisierungen des SREAS A1B Szenarios und des Kontrollklimas aus 20C3M.

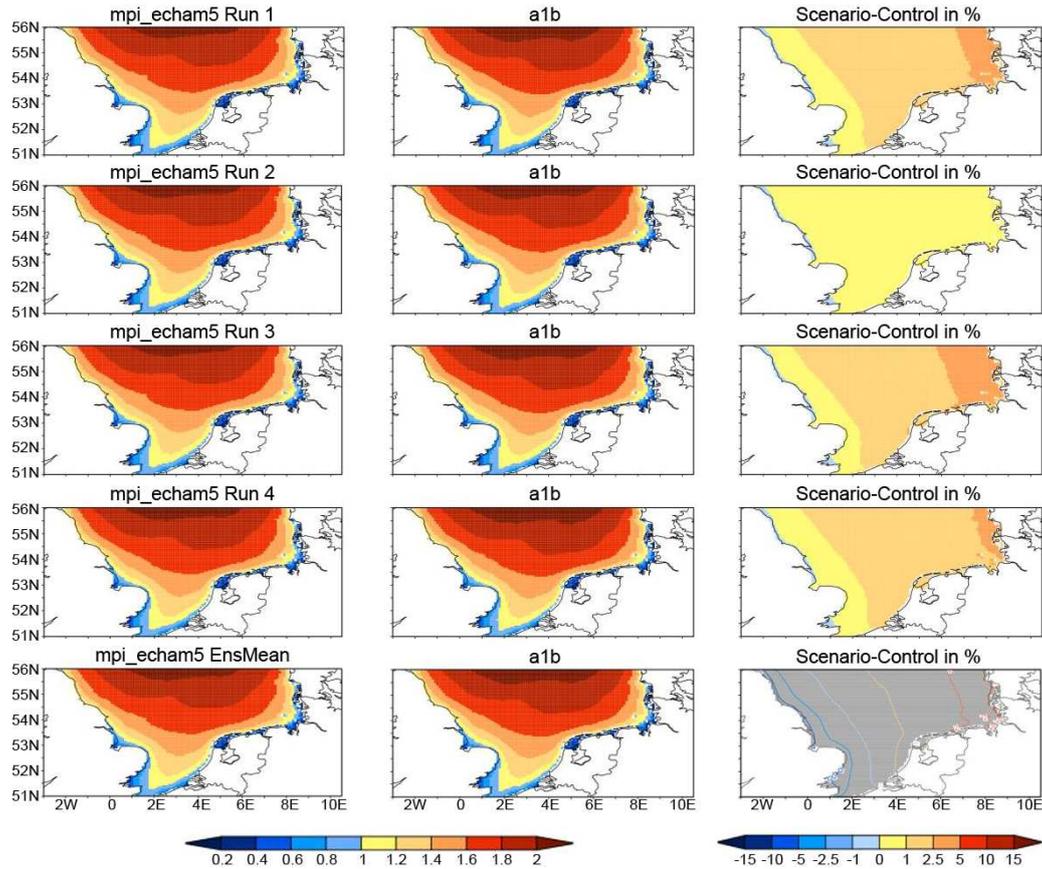
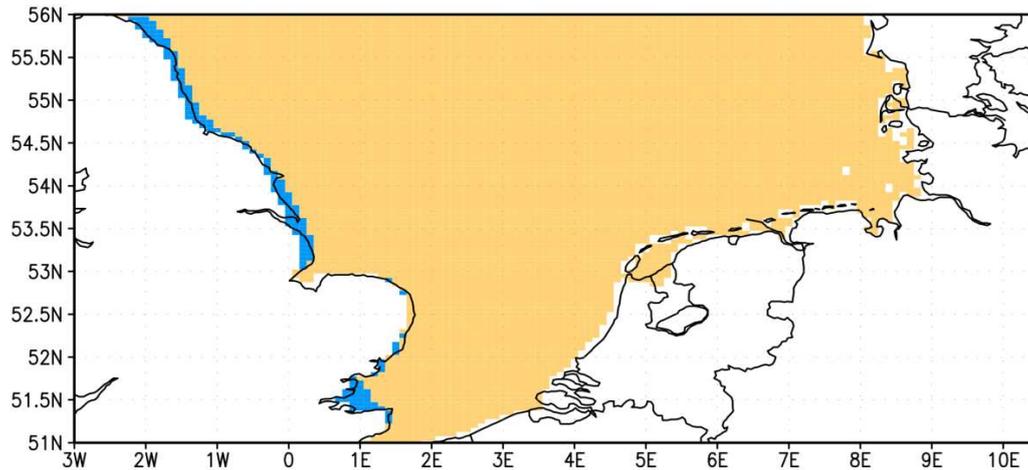


Abbildung 3.4: Ergebnisse der Rekonstruktion mittlerer signifikanter Wellenhöhen mit Hilfe des beschriebenen statistischen Modells und der atmosphärischen bodennahen Luftdruckfelder des Modells ECHAM5. (Links) 30-jähriges Mittel 1970-1999 der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe in Metern basierend auf C203M. (Mitte) 30-jähriges Mittel 2070-2099 der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe in Metern basierend auf SRES A1B. (Rechts) Differenz in Metern der 30-jährigen Mittelwerte 2070-2099 minus 1970-1999. (Von oben nach unten) Ergebnisse für die Realisierungen 1-4 der Modellsimulation sowie Ergebnisse für das Ensemblemittel. (Unten Rechts): Differenz der Ensemblemittel in Metern (Isolinien) sowie Regionen in denen die Änderungen in allen Realisationen das gleiche Vorzeichen haben (grau schattiert).



Seegangs-
Szenarien
Nordsee

Helmholtz-
Zentrum
Geesthacht

Bundesamt für
Seeschifffahrt und
Hydrographie

Abbildung 3.5: Anzahl der Experimente bei denen die Änderungen im 30-jährigen Mittel der signifikanten Wellenhöhe zwischen den Zeiträumen 1970-1999 und 2070-2099 positiv ist.

Abbildung 3.5 zeigt eine Zusammenfassung der mit Hilfe der Redundanzanalyse erhaltenen Ergebnisse. Dargestellt sind an jedem Gitterpunkt die Anzahl der Realisationen T der $n=30$ Realisationen der Klimaänderungsexperimente, für die die Projektion der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe zum Ende des Jahrhunderts positiv (Zunahme der jährlichen mittleren Wellenhöhe) war. Unter der Annahme, dass es keine systematische Veränderung gibt, würde man eine gleiche Anzahl von Experimenten mit positiven und negativen Änderungen erwarten. Wir bilden daher die Teststatistik T mit

$$T = \sum_{i=1}^n Z_i \quad \text{und} \quad Z_i = \begin{cases} 1 & ; Y_i > X_i \\ 0 & ; Y_i < X_i \end{cases}$$

Hierbei repräsentieren die Y_i die 30-jährigen Mittelwerte der Periode 2070-2099 und die X_i die 30-jährigen Mittelwerte der Periode 1960-1999. Unter der Annahme, dass die Realisierungen unabhängig und aus einer unendlich großen Stichprobe gezogen wurden, ist die Teststatistik T binomial verteilt mit $T \leq t_{\alpha/2} \quad T \sim B(n, p = 0.5)$ und wir würden die Nullhypothese (keine Änderung) verwerfen, wenn

$$T \leq t_{\alpha/2} \quad \text{oder} \quad T \geq t_{1-\alpha/2}$$

wobei $t_{\alpha/2}$ und $t_{1-\alpha/2}$ die Quantile der Binomialverteilung für eine gegebene Irrtumswahrscheinlichkeit α sind. Abbildung 3.5 zeigt, dass die Teststatistik $T=20$ für nahezu die gesamte südliche Nordsee ist, d.h. zwei Drittel aller Realisationen positive Änderungen zeigen. Gemäß obiger Formel beträgt die Irrtumswahrscheinlichkeit, dass 20 oder mehr Realisationen bei einer Stichprobe aus 30 Ereignissen positiv sind weniger als (in etwa) 5%, womit die Nullhypothese verworfen würde und die Ergebnisse innerhalb des gewählten Ensembles auf eine signifikante Zunahme der mittleren jährlichen Wellenhöhe zum Ende des Jahrhunderts hindeuten, auch wenn die Größenordnung der Zunahme mit maximal 5% eher gering ausfällt.

Ein Problem besteht jedoch in der Interpretation dieser formalen Testergebnisse. Eine entscheidender Punkt bei der Anwendung dieses Tests ist die Frage nach der Unabhängigkeit der hier verwendeten Ensemblemitglieder (von Storch and Zwiers, 2013) oder in anderen Worten: Wie repräsentativ ist die hier gewählte Stichprobe?

Das Problem kann eingegrenzt werden, wenn lediglich mehrere Realisationen eines Modells für ein gegebenes Szenario verwendet werden. Tabelle 3.2 zeigt die Ergebnisse des Tests für jedes einzelne Modell. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10% zeigen 3 von 6 Modellen signifikante Änderungen in der jährlichen mittleren Wellenhöhe zum Ende des Jahrhunderts. Dabei sind die Änderungen in zwei der drei Modelle (ECHAM5, GISS ER) positiv, im kanadischen Modell jedoch negativ. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% sind aufgrund des geringen Stichprobenumfangs lediglich die Ergebnisse des ECHAM5 Modells signifikant, da bei diesem als einzigem Modell die Veränderungen in allen Realisationen positiv sind.

Modell	Stichproben umfang N	Teststatistik T	$t_{0.05}$	$t_{0.95}$	Signifi- kanz
NCAR PCM (USA)	4	2	0	4	-
NCAR CCSM3 (USA)	7	4	1	6	-
MPI ECHAM5 (Germany)	4	4	0	4	90%
CGCM3.1 (Canada)	5	1	1	4	90%
MRI CGCM2.3.2 (Japan)	5	3	1	4	-
GISS ER (USA)	5	4	1	4	90%

Tabelle 3.2: Ergebnisse des zweiseitigen Vorzeichenstests für die verwendete Stichprobe. Für Details siehe Duller (2008)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass im hier vorliegenden Ensemble von 6 Modellen unter A1B Bedingungen mit Hilfe des angepassten statistischen Modells lediglich in zwei von 6 Fällen eine signifikante Zunahme der mittleren jährlichen Wellenhöhen in der Nordsee zum Ende des Jahrhunderts abgeleitet werden kann. In drei Fällen sind die Änderungen nicht signifikant, in einem Fall sogar negativ. In der Gesamtzahl der vorliegenden Stichprobe von 30 Rechnungen zeigen 20 eine Zunahme der mittleren Wellenhöhen in der Nordsee. Generell sind die Änderungen jedoch gering (in der Größenordnung von maximal 5% des langjährigen Mittelwerts), so dass es angesichts der im Vergleich zu den Änderungssignalen beträchtlichen dekadischen Variabilität plausibel ist, von keinen wesentlichen Änderungen im mittleren Wellenklima zum Ende des Jahrhunderts auszugehen.

4 Sensitivitätsstudie Meeresspiegelanstieg

Seegangs-
Szenarien
Nordsee

Helmholtz-
Zentrum
Geesthacht

Bundesamt für
Seeschifffahrt und
Hydrographie

Zur Untersuchung der Sensitivität des extremen Seegangsfeldes in Bezug auf einen Meeresspiegelanstieg wurden verschiedene Sensitivitätsrechnungen mit dem Nordsee Seegangsmodell (s. Abschnitt 2) durchgeführt. Hierbei wurden extreme Bedingungen gewählt, um Obergrenzen für einen voll entwickelten Seegang abschätzen zu können. Im Einzelnen wurden Rechnungen durchgeführt, die mit

- stationären und homogenen Windfeldern von 30m/s,
- für die Windrichtungen: Nord, Nordwest, West, Südwest, Süd und Ost,
- mit der aktuellen Nordseetopographie und
- mit einer um 1m tieferen Tiefenverteilung

durchgeführt wurden. Die Simulationsdauer betrug jeweils 5 Tage, um den stationären Seegangszustand zu erreichen. Im Einzelnen wurden dabei jeweils Änderungen der signifikanten Wellenhöhe (Hs), der Wellenperiode (Tm02) und der mittlere Wellenrichtung untersucht.

Abbildung 4.1 zeigt als Beispiel den voll entwickelten Seegangszustand bei Nordwestwind. Deutlich zu erkennen ist zunächst eine Zunahme von Wellenhöhe und Periode von Nordwest nach Südost mit zunehmender Windwirklänge. Dabei werden in der zentralen Nordsee signifikante Wellenhöhen von bis zu 19m und Wellenperioden von etwa 14s erreicht. Weiter Richtung Südwesten nehmen die Wellenhöhen aufgrund der abnehmenden Wassertiefe und aufgrund von Wellenbrechen wieder ab. Ebenso werden die Perioden zunächst kürzer, um in unmittelbarer Küstennähe aufgrund von Shoaling Effekten deutlich zuzunehmen.

Abbildung 4.2 zeigt die Veränderungen im Falle eines Meeresspiegelanstiegs um einen Meter. In der südwestlichen Nordsee sind hierbei Zunahmen der signifikanten Wellenhöhen im Bereich um 20-40 cm, in sehr begrenzten Küstenabschnitten aufgrund lokaler Effekte von bis zu einem Meter zu erkennen. Die Perioden zeigen mit Ausnahme eng begrenzter Bereiche Änderungen im Bereich von etwa -0,3 bis +0,6 s. Einzelheiten und Darstellungen für andere Windrichtungen finden sich im Anhang dieses Berichts.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass in der sehr extremen Wetterlage eines Sturmes mit einer Dauer von 5 Tagen und 30m/s Windgeschwindigkeit bei einem Wasserstandsanstieg um einen Meter folgende Seegangsänderungen in der Nordsee festgestellt wurden

- Anstieg der signifikanten Wellenhöhe in den Flachwassergebieten um etwa 20-40cm unabhängig von der Windrichtung; in lokal begrenzten Gebieten na-

he der Küste um bis zu 1m bei auflandigem Wind

- Anstieg der Tm02 Periode in den Flachwassergebieten um etwa 0,3-0,6s unabhängig von der Windrichtung; in lokal begrenzten Gebieten nahe der Küste um bis zu 1,5s auflandigem Wind
- keine wesentlichen Richtungsänderungen

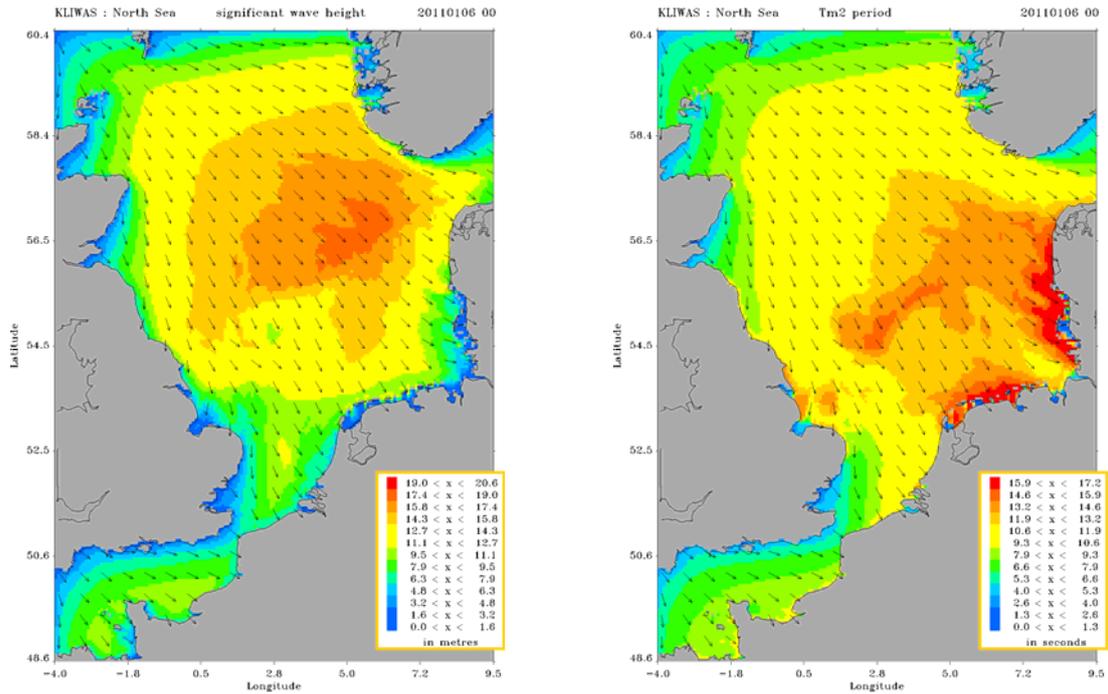
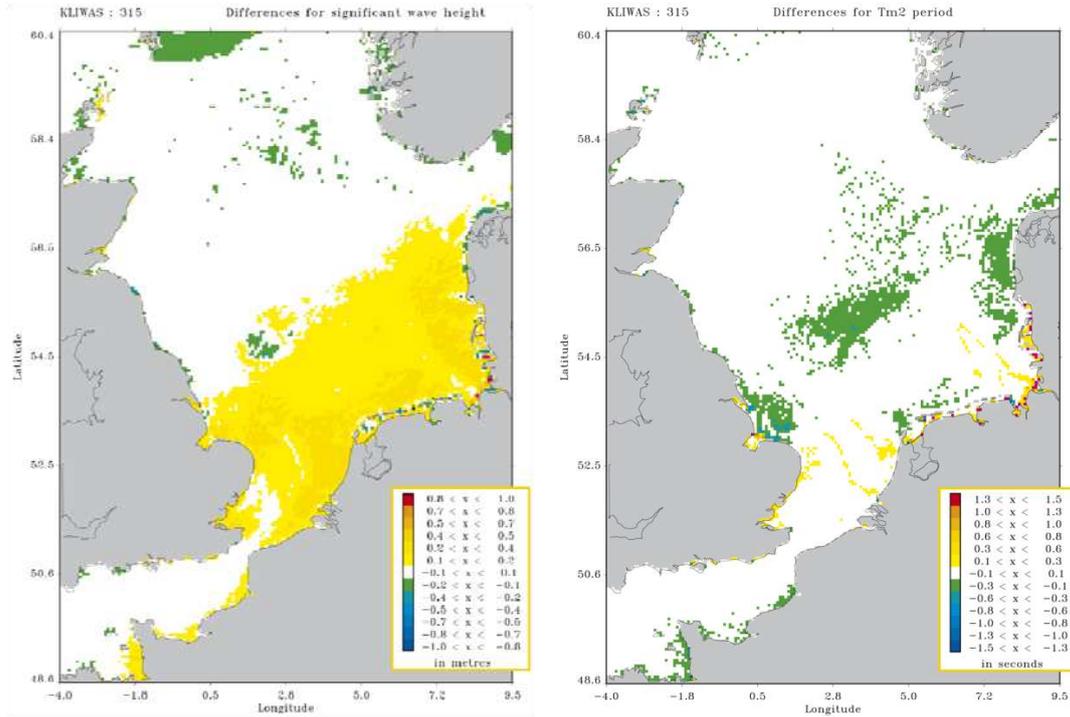


Abbildung 4.1: Links: Signifikante Wellenhöhe in m (farbig) und mittlere Wellenrichtung (Pfeile); Rechts: Tm02 Periode in s (farbig) und mittlere Wellenrichtung (Pfeile), Zustand jeweils nach einem 5 Tage andauernden Sturm mit homogenen Windfeldern von 30m/s aus Nordwest und heutiger Bathymetrie.



Seegangs-
Szenarien
Nordsee

Helmholtz-
Zentrum
Geesthacht

Bundesamt für
Seeschifffahrt und
Hydrographie

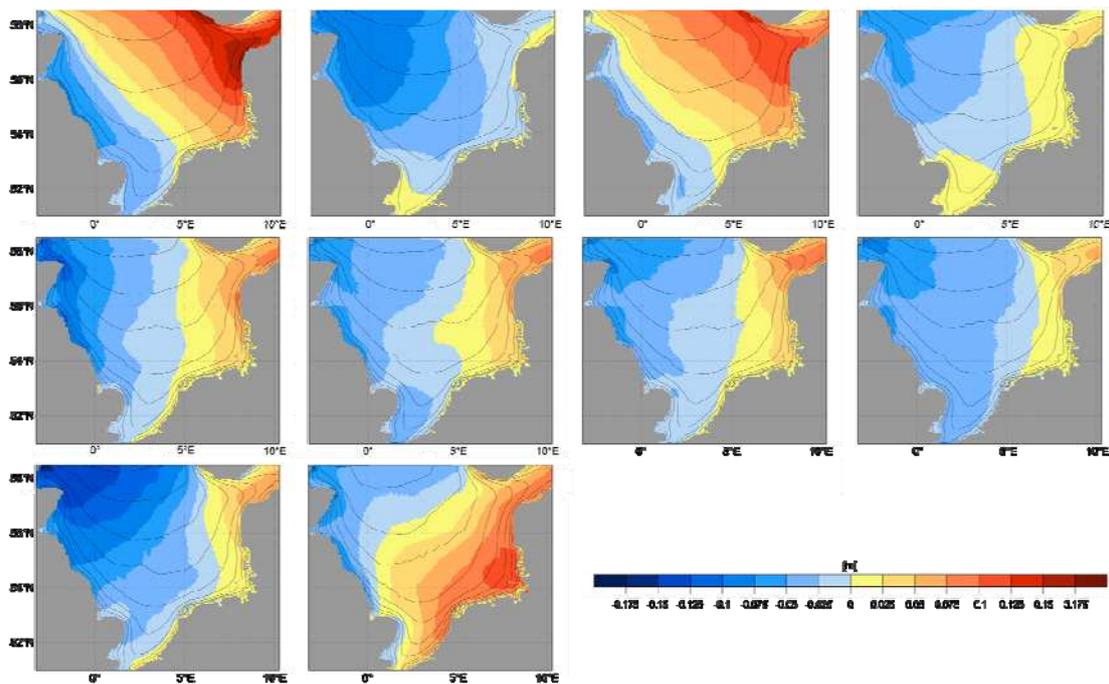
Abbildung 4.2: Links: Differenzen der signifikante Wellenhöhe in m; Rechts: Differenzen der Tm02 Periode in s (farbig) jeweils zwischen dem Zustand nach einem 5 Tage andauernden Sturm mit homogenen Windfeldern von 30m/s aus Nordwest und bei einem Meeresspiegelanstieg um einen Meter und heutiger Bathymetrie.

5. Zusammenfassung und Einordnung der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus der in Kapitel 2 durchgeführten Simulationen der Wellenhöhe und Wellenrichtung liegen im Bereich der von anderen Studien zur Seegangsänderungen in der Nordsee aufgezeigt wurde. In Abbildung 5.1 ist ein Vergleich der Änderungen des 30 jährigen Mittels des jährlichen Medians der im Rahmen von KLIWAS hier erstellten Klimaänderungsszenarien mit den Ergebnissen aus Grabemann und Weisse (2008) und Groll et al. (2013) dargestellt für den Zeitraum 2071-2100 relativ zu 1961-1990. Die Simulation mit REMO liefert ähnliche Änderungen wie die in Groll et al. (2013) und die jene mit dem global Modell HadCM3 aus Grabemann und Weisse (2008) wenn auch unter anderen Emissionsszenarien. Die Simulation mit HIRHAM ist vergleichbar mit zwei Projektionen aus Grabemann und Weisse (2008) angetrieben mit ECHAM4. Ein ausführlicher Vergleich aller zehn Simulationen ist in Grabemann et al. (2014) zu finden.

Auch die in Kapitel 3 erstellten Klimaprojektionen mit Hilfe eines statistischen Modells fügen sich gut in den von den zehn numerisch berechneten Projektionen Wertebereich ein. Nicht nur die Zunahme von bis zu 5% der mittleren Wellenhöhe liegt ähnlich wie die in den numerischen Simulationen auch die räumliche Verteilung der Änderungen ist vergleichbar. Eine stärkere Zunahme der Wellenhöhe im Osten der Nordsee und keine Änderung bzw. eine leicht Abnahme der Wellenhöhe in der westlichen Nordsee.

Die in dieser Kooperation erzeugten Klimaprojektionen für den Seegang in der Nordsee dienen dazu, zusammen mit anderen Studien die mögliche Spannbreite zukünftiger Seegangsänderungen besser abschätzen zu können.



Seegangs-
Szenarien
Nordsee

Helmholtz-
Zentrum
Geesthacht

Bundesamt für
Seeschifffahrt und
Hydrographie

Abbildung 5.1: Differenz des Mittels 2071-2100 des jährlichen Medians zur Referenzperiode 1961-1990 aus 10 Klimaprojektionen. Erste Reihe aus Grabemann und Weisse 2008, von links nach rechts (global Modell/regional Model I/ Emissionsszenario-Realisation): ECHAM4/RCAO/A2; HadCM3/RCAO/ A2; ECHAM4/RCAO/B2; HadCM/RCAO/B2. Zweite Reihe aus Groll et al. 2013: ECHAM5/CCLM/A1B_1; ECHAM5/CCLM/A1B_2; ECHAM5/CCLM/B1_1; ECHAM5/CCLM/B1_2. Dritte Reihe, im Rahmen von KLIWAS erzeugte Klimaprojektionen ECHAM5/REMO/A1B_3; ECHAM5/HIRLAM/A1B_3

6. Literaturverzeichnis

Christensen O.B., M. Drews, J.H. Christensen, K. Dethloff, K. Ketelsen, I. Hebestadt und A. Rinke (2007): The HIRHAM Regional Climate Model Version 5 (beta), Technical Report 06-17, Danish Meteorological Institute, 22pp.

Duller, C (2008): Einführung in die nichtparametrische Statistik im SAS und R, Physica-Verlag Heidelberg, doi: 10.1007/978-3-7908-2060-7

Grabemann I. und R. Weisse (2008): Climate change impact on extreme wave conditions in the North Sea: an ensemble study. *Ocean Dyn* 58:199–212. doi:10.1007/s10236-008-0141-x

Grabemann I., N. Groll, J. Möller und R. Weisse (2014): Climate change impact on North Sea wave conditions: a review of ten projections. In preparation

Groll N., I. Grabemann und L. Gaslikova (2013): North Sea wave conditions: an analysis of four transient future climate realizations. *Ocean Dyn* 64: 1-12. doi: 10.1007/s10236-013-0666-5

Jakob, D., L. Bäring, O.B. Christensen, J.H. Christensen, M. de Castro, M. Déqué, F. Giorgi, S. Hagemann, M. Hirschi, R. Jones, R. Kjellstöm, G. Lenderink, B. Rockel, E. Sanchez Sanchez, C. Schär, S. Senevirate, S. Somot, A. van Ulden and B. van den Hurk (2007): An intercomparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance. *Climatic Change* 81, Supplement 1, 31-52

Marsland S., H. Haak, J. Jungclaus, M. Latif und F. Röske (2003): The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. *Ocean Model* 5: 91-127.

Röckner E., G. Bäuml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, I. Kirchner, L. Kronbluh, E. Manzini, A. Rhodin, U. Schlese, U. Schulweida und A. Tompkins (2003): The atmospheric circulation model ECHAM5. Part I: model description. MPI-Rep 249, Max-Planck Institute für Meteorology, Hamburg, 140pp.

von Storch, H. und F. Zwiers (1998): *Statistical analysis in climate research*, Cambridge Univ. Press, ISBN 0521450713.

von Storch, H. und F. Zwiers (2013): Testing ensembles of climate change scenarios for "statistical significance". *Climatic Change*, 117, 1-9, doi: 10.1007/s10584-012-0551-0

WAMDI Group (1988): The WAM model – a third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.* 18: 1776-1810

WASA Group (1998): Changing waves and storms in the Northeast Atlantic? *Bull. Am. Met. Soc.*, 79, 741-760.

Weisse, R. und A. Pluess (2006): Storm-related sea level variations along the North Sea coast as simulated by a high-resolution model 1958-2002. *Ocean Dynamics*, 2006, 56, 16-25.

Weisse, R. und H. Günther (2007): Wave climate and long-term changes for the Southern North Sea obtained from a high-resolution hindcast 1958-2002, *Ocean Dynamics*, 57, 161-172.

Weisse, R., von Storch, H., Callies, U., Chrastansky, A., Feser, F., Grabemann, I., Günther, H., Pluess, A., Stoye, T., Tellkamp, J., Winterfeldt, J. und K. Woth (2009): Regional Meteorological-Marine Reanalyses and Climate Change Projections: Results for Northern Europe and Potential for Coastal and Offshore Applications. Bull. Am. Met. Soc., 90, 849-860.

Winterfeldt, J., Geyer, B. und R. Weisse (2011): Using QuikSCAT in the added value assessment of dynamically downscaled wind speed. Int. J. Climatol., 31, 1028-1039.

**Seegangs-
Szenarien
Nordsee**

Helmholtz-
Zentrum
Geesthacht

Bundesamt für
Seeschifffahrt und
Hydrographie

7. Anhang

7.1 Ergebnisse der Rekonstruktion mit Hilfe der Redundanzanalyse für die einzelnen Modelle

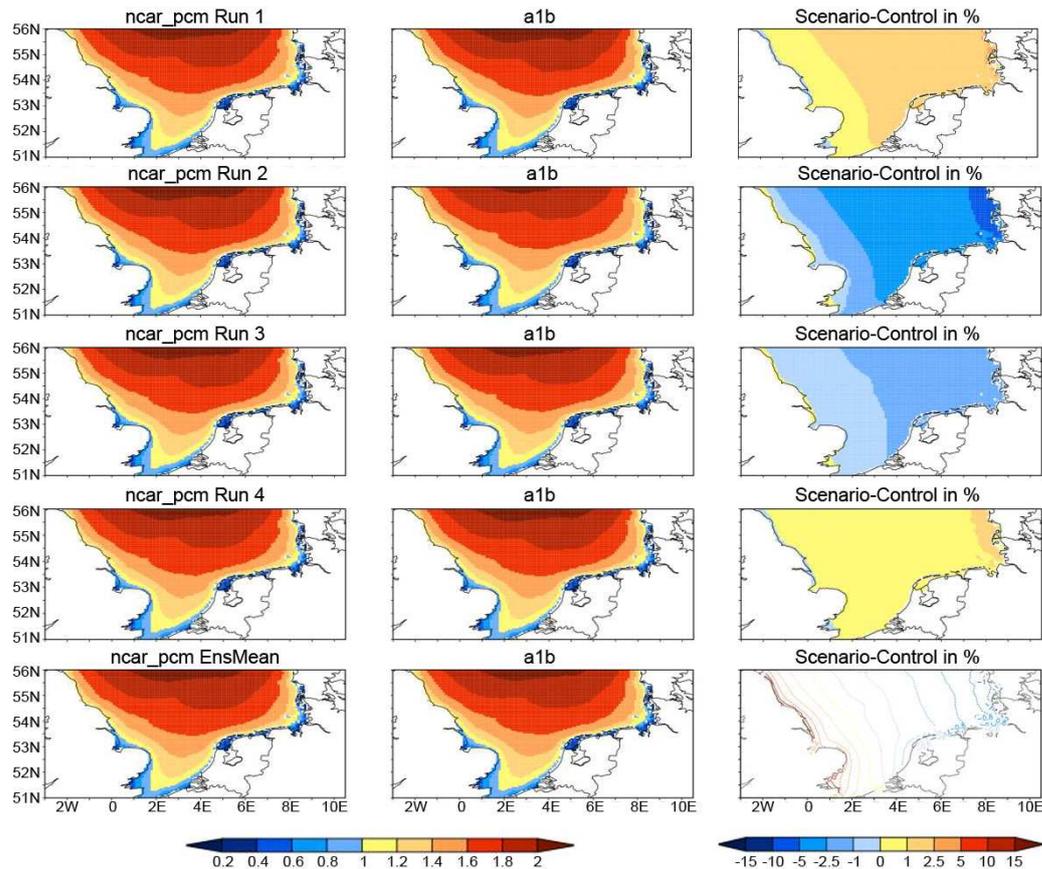
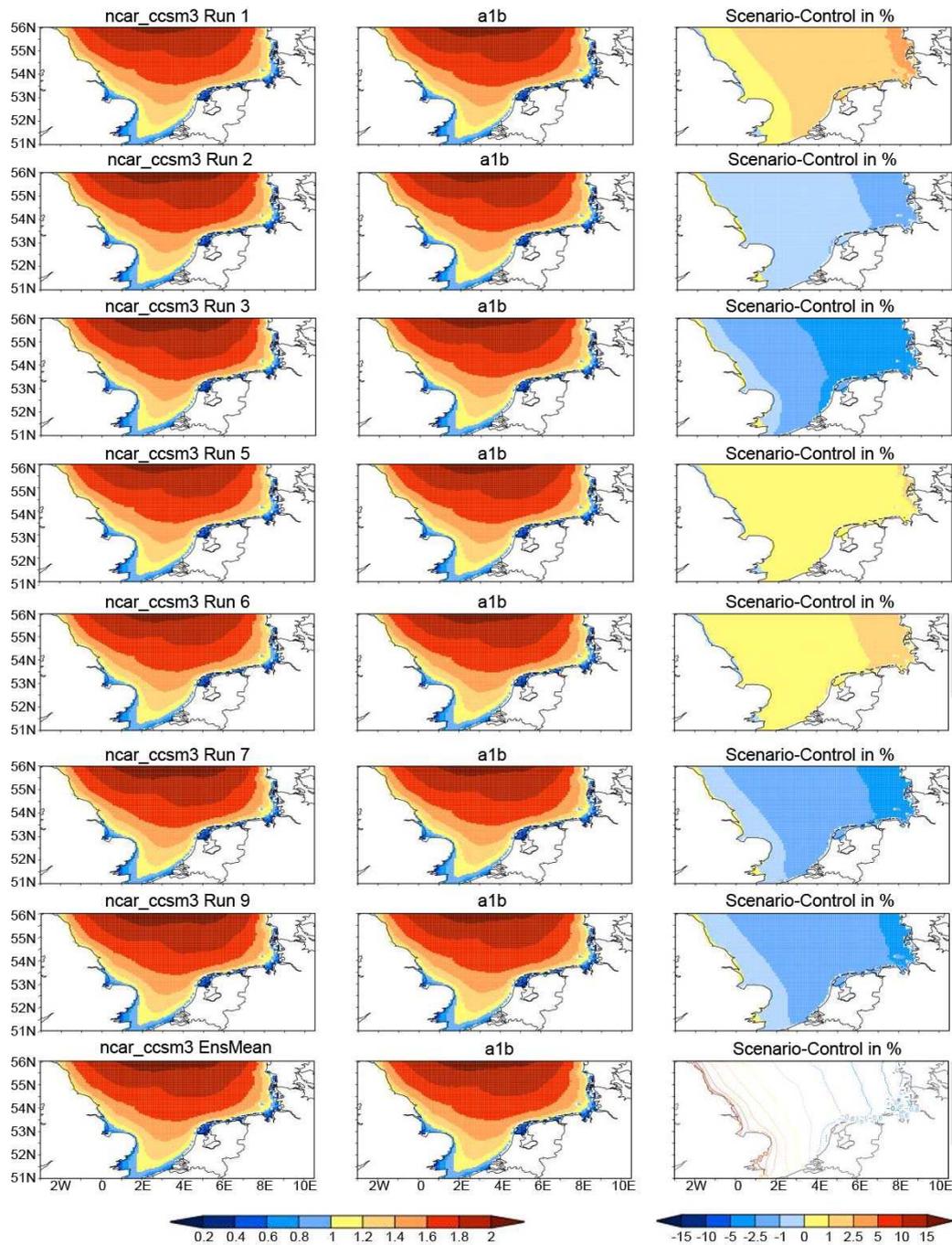


Abbildung A1-1: Ergebnisse der Rekonstruktion mittlerer signifikanter Wellenhöhen mit Hilfe des beschriebenen statistischen Modells und der atmosphärischen bodennahen Luftdruckfelder des Modells NCAR PCM. (Links) 30-jähriges Mittel 1970-1999 der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe in Metern basierend auf C203M. (Mitte) 30-jähriges Mittel 2070-2099 der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe in Metern basierend auf SRES A1B. (Rechts) Differenz in Metern der 30-jährigen Mittelwerte 2070-2099 minus 1970-1999. (Von oben nach unten) Ergebnisse für die Realisierungen 1-4 der Modellsimulation sowie Ergebnisse für das Ensemblemittel. (Unten Rechts): Differenz der Ensemblemittel in Metern (Isolinien) sowie Regionen in denen die Änderungen in allen Realisationen das gleiche Vorzeichen haben (grau schattiert).



Seegangs-
Szenarien
Nordsee

Helmholtz-
Zentrum
Geesthacht

Bundesamt für
Seeschifffahrt und
Hydrographie

Abbildung A1-2: Ergebnisse der Rekonstruktion mittlerer signifikanter Wellenhöhen mit Hilfe des beschriebenen statistischen Modells und der atmosphärischen bodennahen Luftdruckfelder des Modells NCAR CCSM3. (Links) 30-jähriges Mittel 1970-1999 der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe in Metern basierend auf C203M. (Mitte) 30-jähriges Mittel 2070-2099 der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe in Metern basierend auf SRES A1B. (Rechts) Differenz in Metern der 30-jährigen Mittelwerte 2070-2099 minus 1970-1999. (Von oben nach unten) Ergebnisse für die Realisierungen 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9 der Modellsimulation sowie Ergebnisse für das Ensemblemittel. (Unten Rechts): Differenz der Ensemblemittel in Metern (Isolinien) sowie Regionen in denen die Änderungen in allen Realisationen das gleiche Vorzeichen haben (grau schattiert).

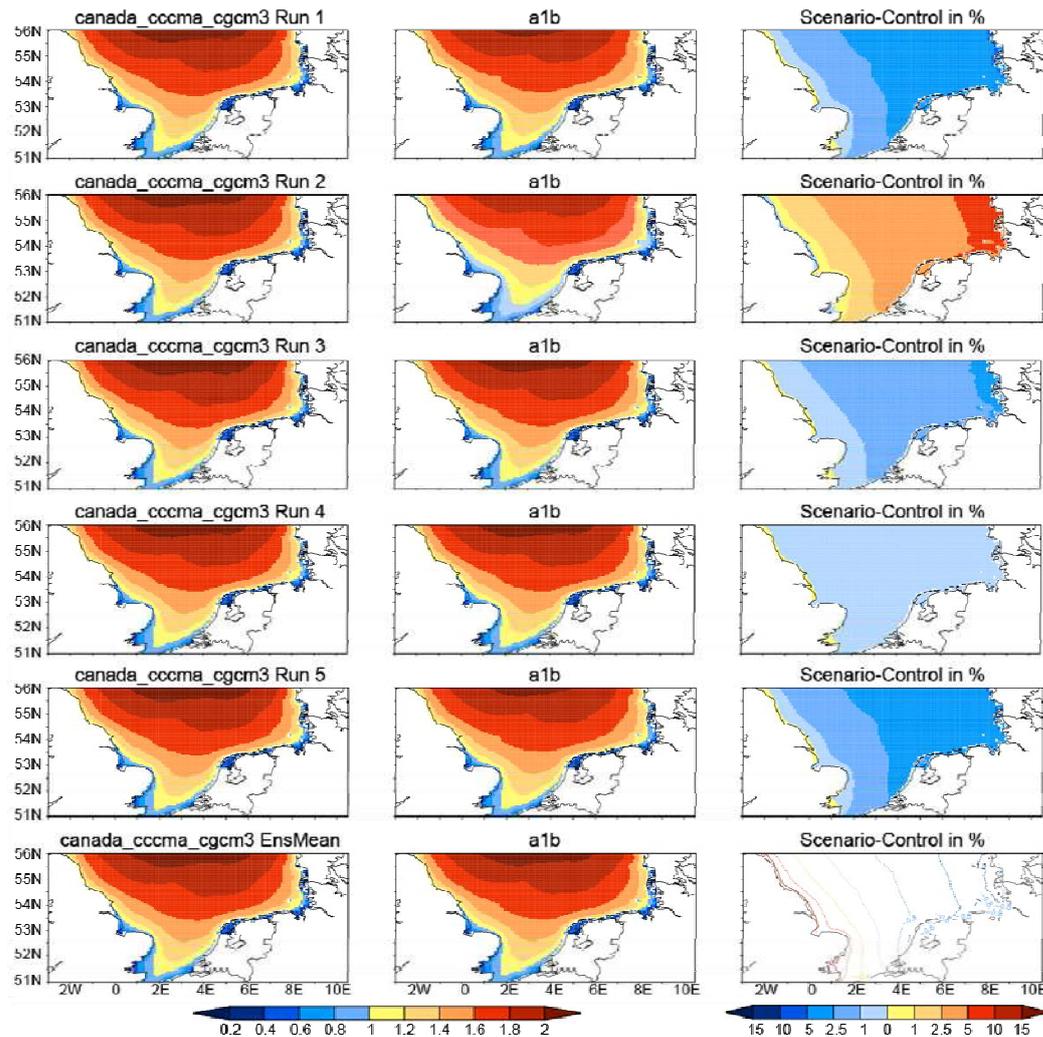
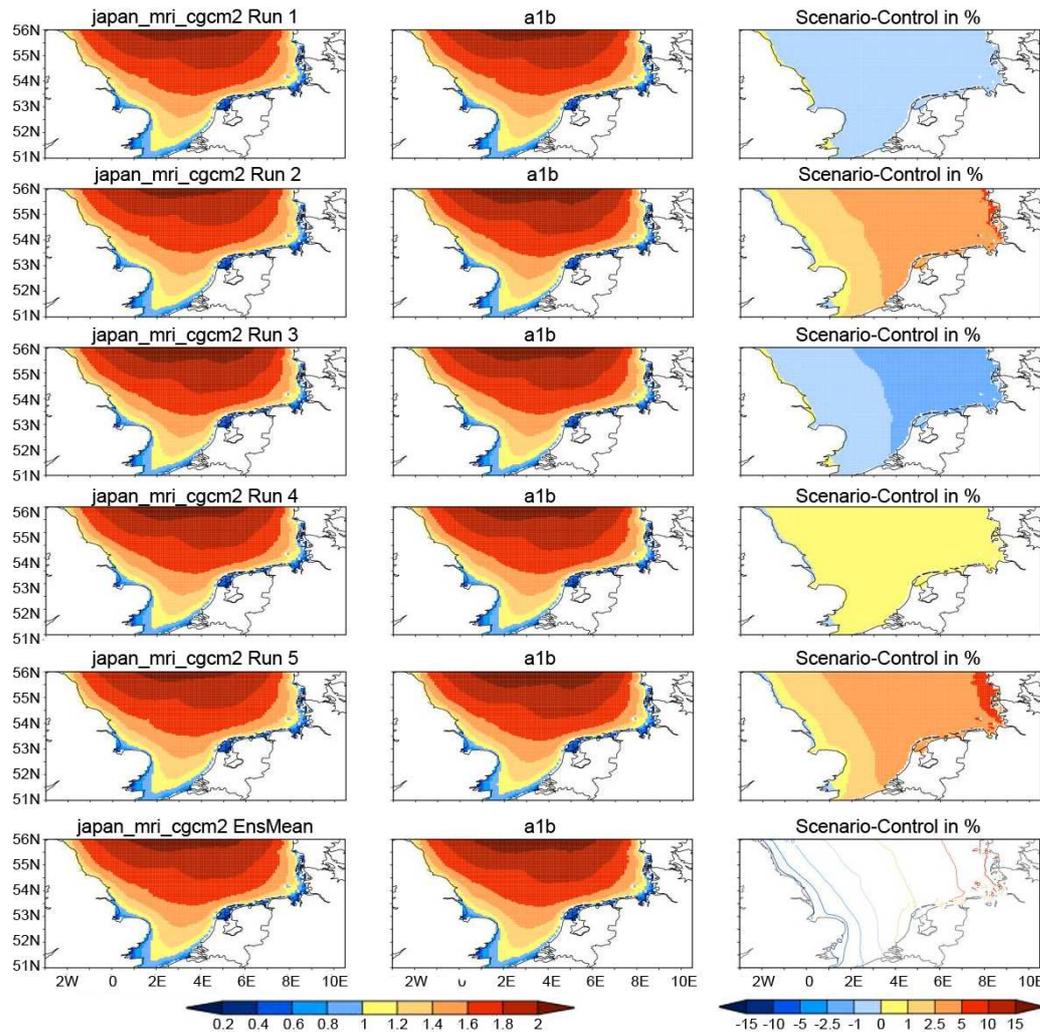


Abbildung A1-3: Ergebnisse der Rekonstruktion mittlerer signifikanter Wellenhöhen mit Hilfe des beschriebenen statistischen Modells und der atmosphärischen bodennahen Luftdruckfelder des kanadischen Modells CGSM3. (Links) 30-jähriges Mittel 1970-1999 der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe in Metern basierend auf C203M. (Mitte) 30-jähriges Mittel 2070-2099 der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe in Metern basierend auf SRES A1B. (Rechts) Differenz in Metern der 30-jährigen Mittelwerte 2070-2099 minus 1970-1999. (Von oben nach unten) Ergebnisse für die Realisierungen 1-5 der Modellsimulation sowie Ergebnisse für das Ensemblemittel. (Unten Rechts): Differenz der Ensemblemittel in Metern (Isolinien) sowie Regionen in denen die Änderungen in allen Realisationen das gleiche Vorzeichen haben (grau schattiert).



Seegangs-
Szenarien
Nordsee

Helmholtz-
Zentrum
Geesthacht

Bundesamt für
Seeschifffahrt und
Hydrographie

Abbildung A1-4: Ergebnisse der Rekonstruktion mittlerer signifikanter Wellenhöhen mit Hilfe des beschriebenen statistischen Modells und der atmosphärischen bodennahen Luftdruckfelder des japanischen Modells CGCM2. (Links) 30-jähriges Mittel 1970-1999 der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe in Metern basierend auf C203M. (Mitte) 30-jähriges Mittel 2070-2099 der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe in Metern basierend auf SRES A1B. (Rechts) Differenz in Metern der 30-jährigen Mittelwerte 2070-2099 minus 1970-1999. (Von oben nach unten) Ergebnisse für die Realisierungen 1-5 der Modellsimulation sowie Ergebnisse für das Ensemblemittel. (Unten Rechts): Differenz der Ensemblemittel in Metern (Isolinien) sowie Regionen in denen die Änderungen in allen Realisationen das gleiche Vorzeichen haben (grau schattiert).

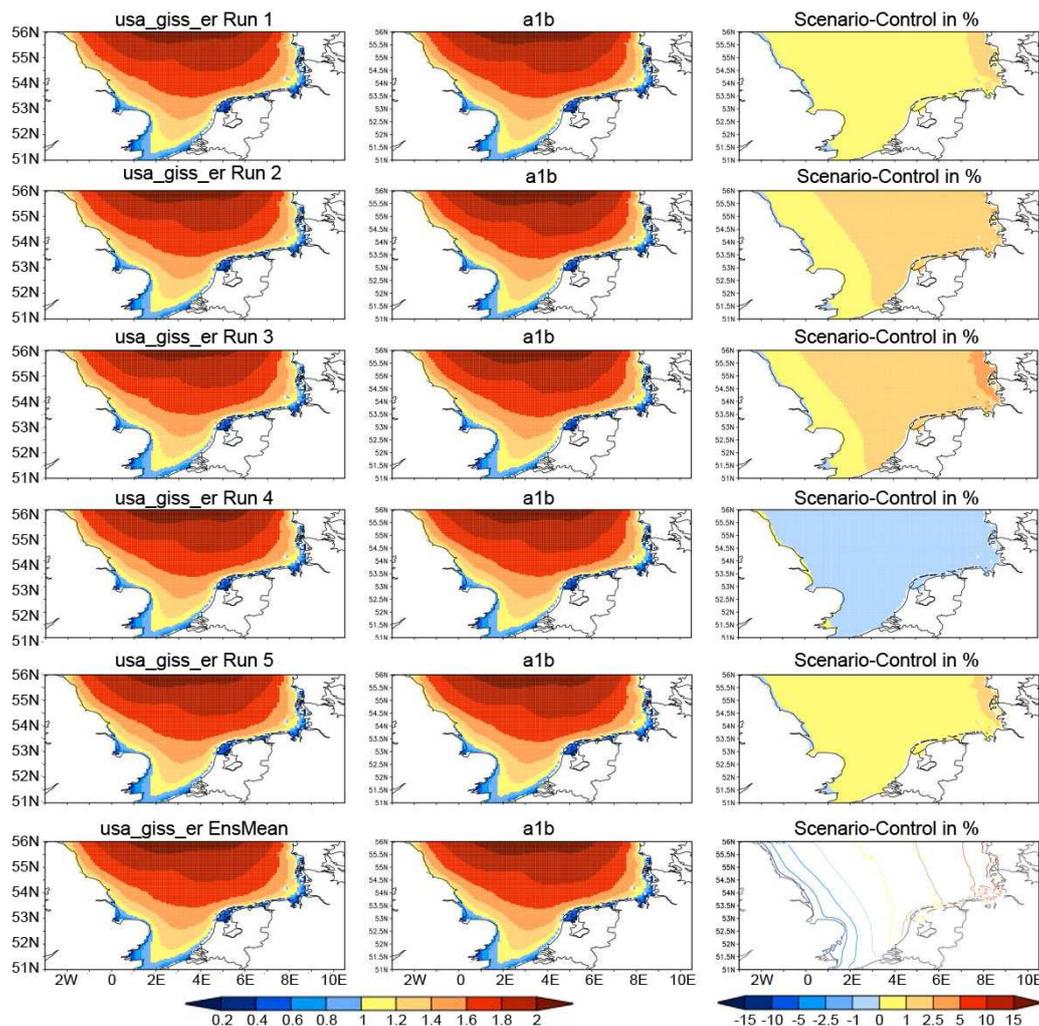


Abbildung A1-5: Ergebnisse der Rekonstruktion mittlerer signifikanter Wellenhöhen mit Hilfe des beschriebenen statistischen Modells und der atmosphärischen bodennahen Luftdruckfelder des US Modells GISS ER. (Links) 30-jähriges Mittel 1970-1999 der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe in Metern basierend auf C203M. (Mitte) 30-jähriges Mittel 2070-2099 der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe in Metern basierend auf SRES A1B. (Rechts) Differenz in Metern der 30-jährigen Mittelwerte 2070-2099 minus 1970-1999. (Von oben nach unten) Ergebnisse für die Realisierungen 1-5 der Modellsimulation sowie Ergebnisse für das Ensemblemittel. (Unten Rechts): Differenz der Ensemblemittel in Metern (Isolinien) sowie Regionen in denen die Änderungen in allen Realisationen das gleiche Vorzeichen haben (grau schattiert).

7.2 Voll entwickelte Seegangszustände mit heutiger Bathymetrie

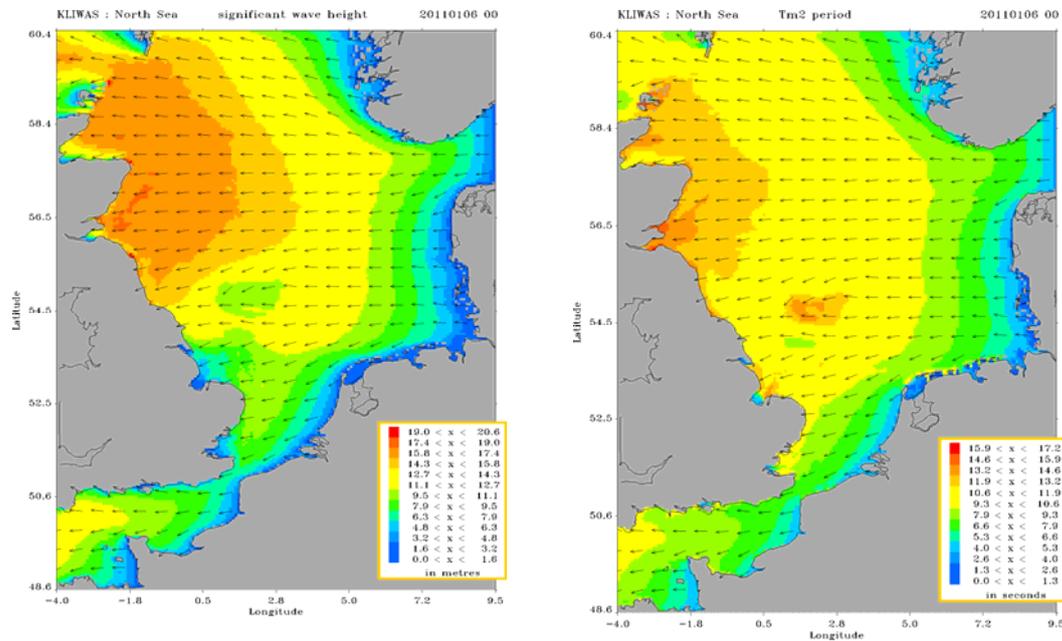


Abbildung A2-1: Links: Signifikante Wellenhöhe in m (farbig) und mittlere Wellenrichtung (Pfeile); Rechts: Tm02 Periode in s (farbig) und mittlere Wellenrichtung (Pfeile), Zustand jeweils nach einem 5 Tage andauernden Sturm mit homogenen Windfeldern von 30m/s aus Osten und heutiger Bathymetrie.

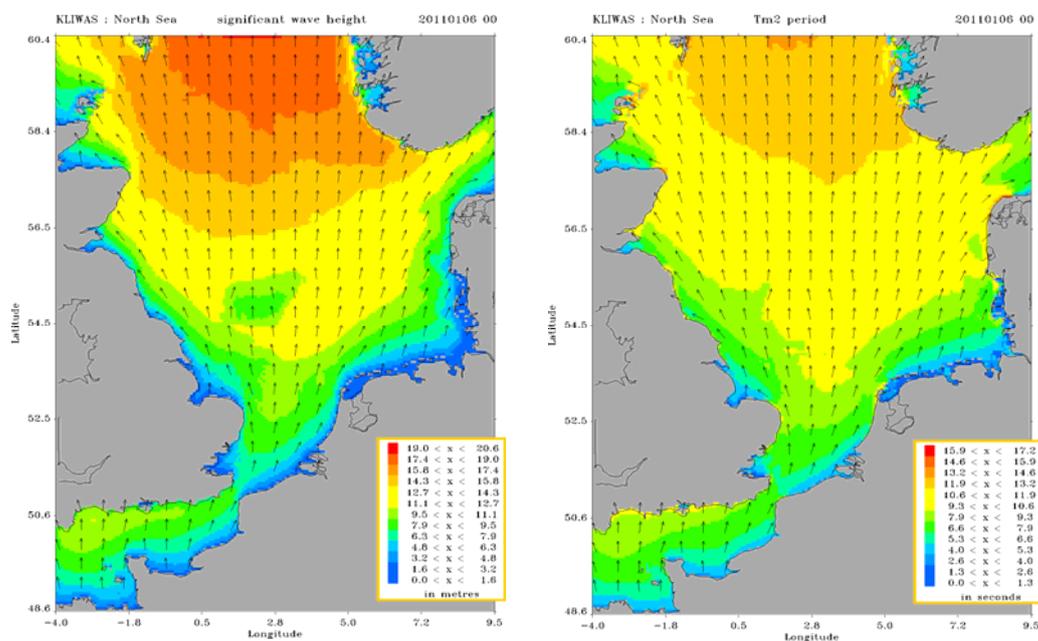


Abbildung A2-2: Links: Signifikante Wellenhöhe in m (farbig) und mittlere Wellenrichtung (Pfeile); Rechts: Tm02 Periode in s (farbig) und mittlere Wellenrichtung (Pfeile), Zustand jeweils nach einem 5 Tage andauernden Sturm mit homogenen Windfeldern von 30m/s aus Süden und heutiger Bathymetrie.

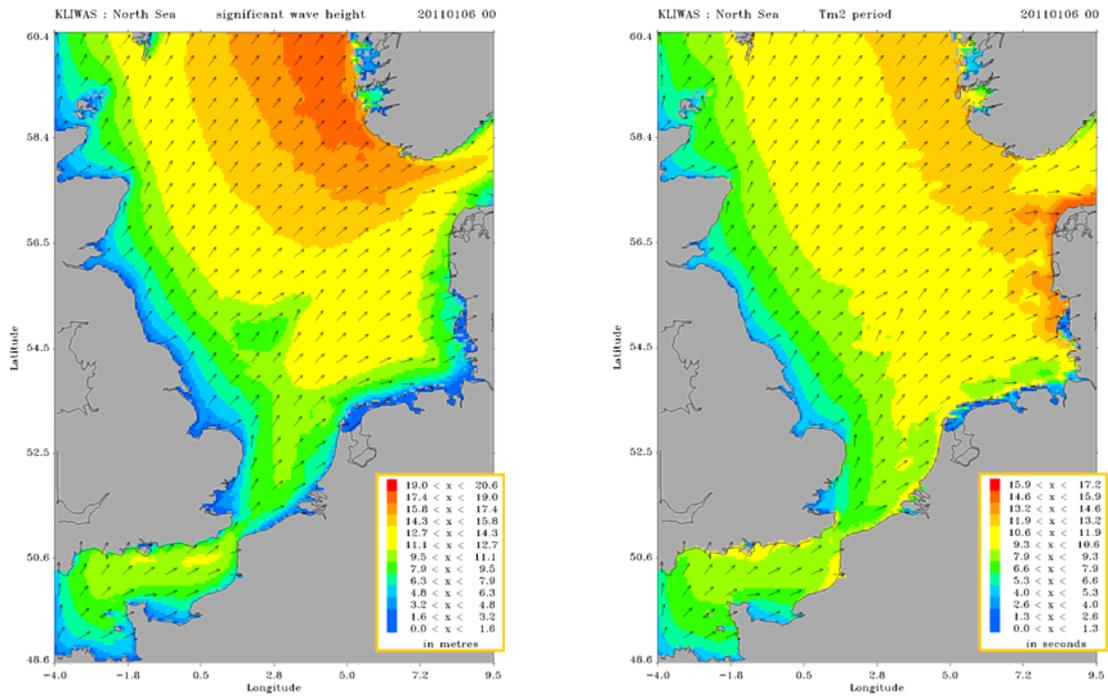


Abbildung A2-3: Links: Signifikante Wellenhöhe in m (farbig) und mittlere Wellenrichtung (Pfeile); Rechts: Tm02 Periode in s (farbig) und mittlere Wellenrichtung (Pfeile), Zustand jeweils nach einem 5 Tage andauernden Sturm mit homogenen Windfeldern von 30m/s aus Südwest und heutiger Bathymetrie.

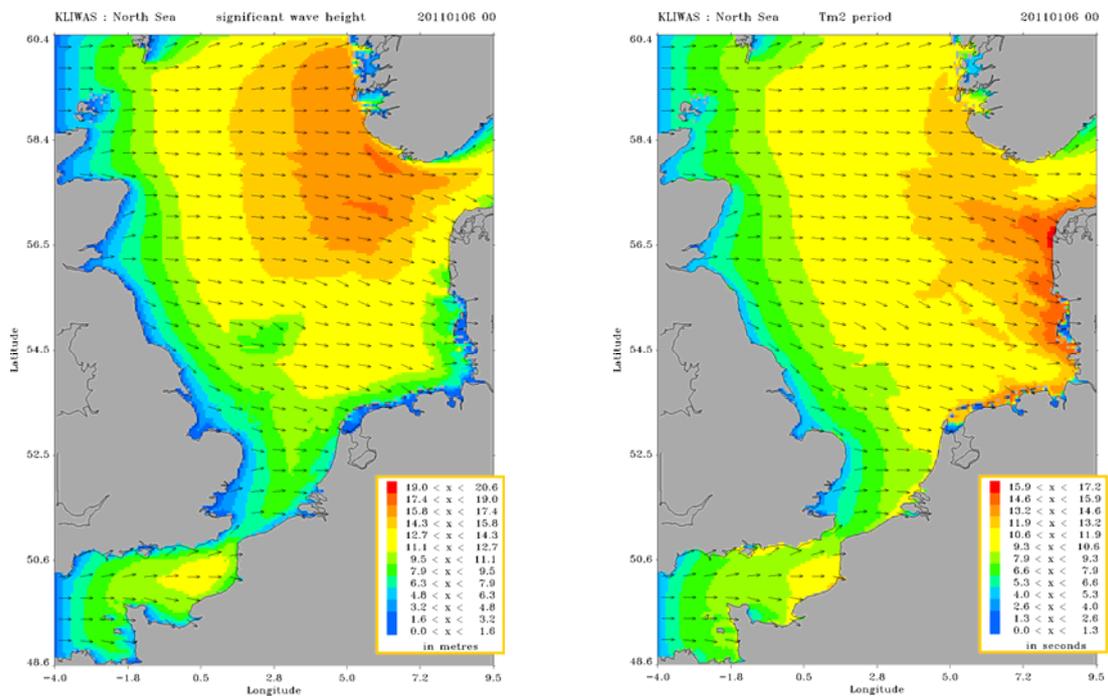
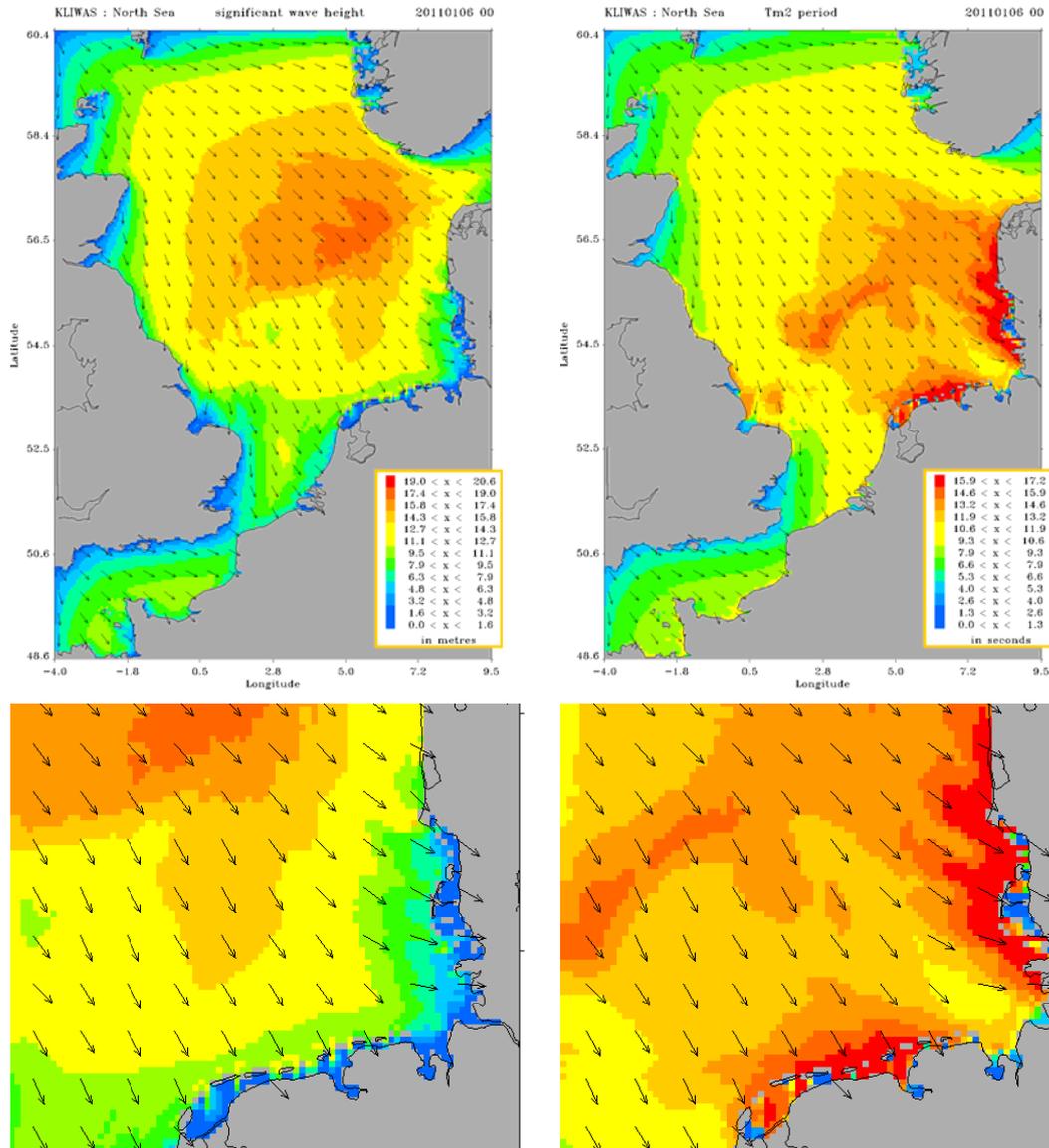


Abbildung A2-4: Links: Signifikante Wellenhöhe in m (farbig) und mittlere Wellenrichtung (Pfeile); Rechts: Tm02 Periode in s (farbig) und mittlere Wellenrichtung (Pfeile), Zustand jeweils nach einem 5 Tage andauernden Sturm mit homogenen Windfeldern von West und heutiger Bathymetrie.



Seegangs-
Szenarien
Nordsee

Helmholtz-
Zentrum
Geesthacht

Bundesamt für
Seeschifffahrt und
Hydrographie

Abbildung A2-5: Links: Signifikante Wellenhöhe in m (farbig) und mittlere Wellenrichtung (Pfeile); Rechts: Tm02 Periode in s (farbig) und mittlere Wellenrichtung (Pfeile); Oben: Gesamte Nordsee; Unten: Deutsche Bucht, Zustand jeweils nach einem 5 Tage andauernden Sturm mit homogenen Windfeldern von 30m/s aus Nordwest und heutiger Bathymetrie.

**Seegangs-
Szenarien
Nordsee**

Helmholtz-
Zentrum
Geesthacht

Bundesamt für
Seeschifffahrt und
Hydrographie

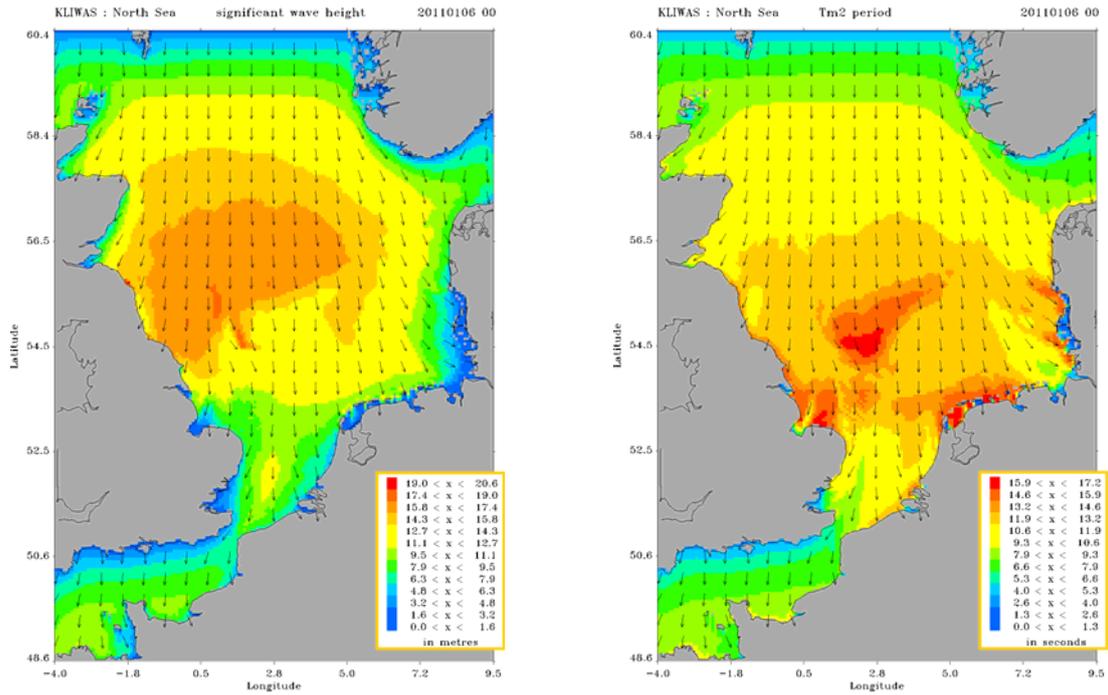


Abbildung A2-6: Links: Signifikante Wellenhöhe in m (farbig) und mittlere Wellenrichtung (Pfeile); Rechts: Tm02 Periode in s (farbig) und mittlere Wellenrichtung (Pfeile), Zustand jeweils nach einem 5 Tage andauernden Sturm mit homogenen Windfeldern von 30m/s aus Norden und heutiger Bathymetrie.

7.3 Voll entwickelte Seegangszustände mit heutiger Bathymetrie und einem Meeresspiegelanstieg von einem Meter

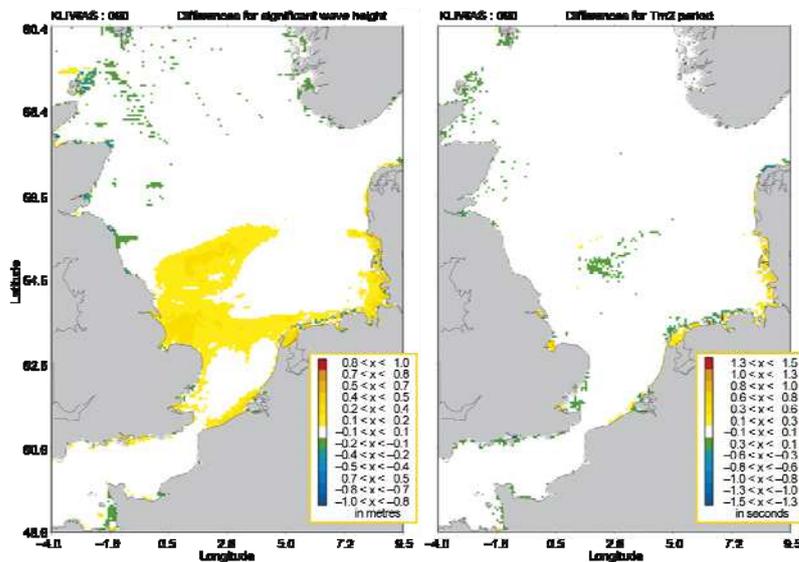


Abbildung A3-1: Links: Differenzen der signifikante Wellenhöhe in m; Rechts: Differenzen der Tm02 Periode in s (farbig) jeweils zwischen dem Zustand nach einem 5 Tage andauernden Sturm mit homogenen Windfeldern von 30m/s aus Osten und bei einem Meeresspiegelanstieg um einen Meter und heutiger Bathymetrie.

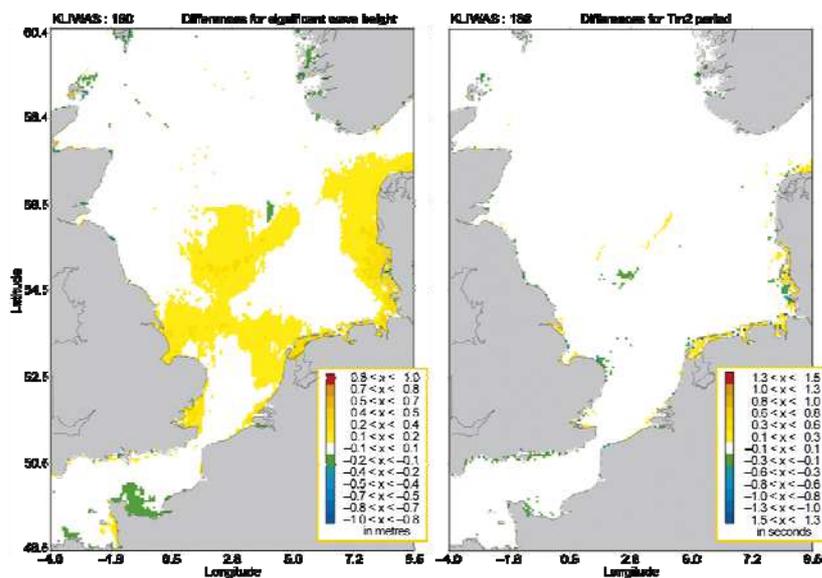


Abbildung A3-2: Links: Differenzen der signifikante Wellenhöhe in m; Rechts: Differenzen der Tm02 Periode in s (farbig) jeweils zwischen dem Zustand nach einem 5 Tage andauernden Sturm mit homogenen Windfeldern von 30m/s aus Süden und bei einem Meeresspiegelanstieg um einen Meter und heutiger Bathymetrie.

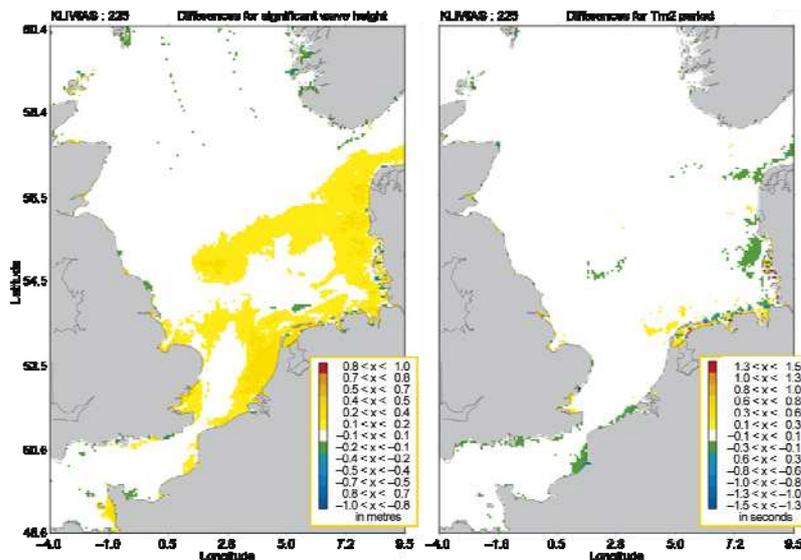


Abbildung A3-3: Links: Differenzen der signifikante Wellenhöhe in m; Rechts: Differenzen der Tm02 Periode in s (farbig) jeweils zwischen dem Zustand nach einem 5 Tage andauernden Sturm mit homogenen Windfeldern von 30m/s aus Südwest und bei einem Meeresspiegelanstieg um einen Meter und heutiger Bathymetrie.

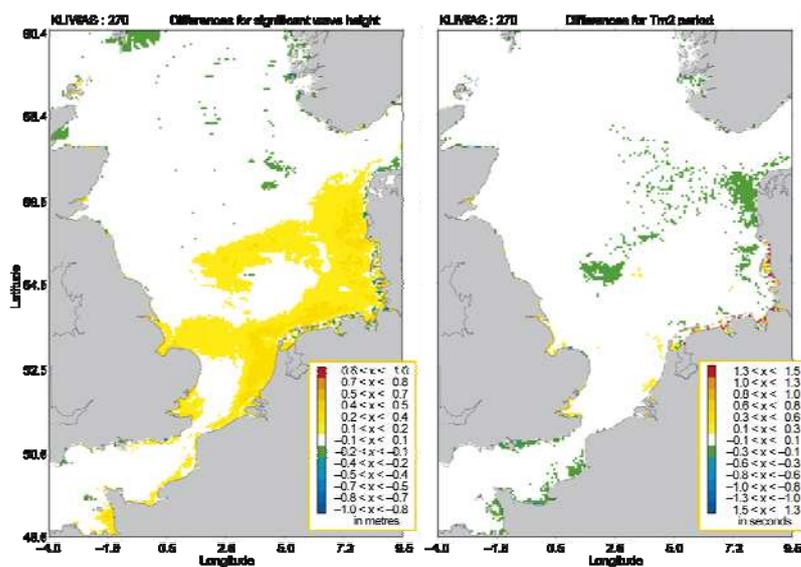


Abbildung A3-4: Links: Differenzen der signifikante Wellenhöhe in m; Rechts: Differenzen der Tm02 Periode in s (farbig) jeweils zwischen dem Zustand nach einem 5 Tage andauernden Sturm mit homogenen Windfeldern von 30m/s aus Westen und bei einem Meeresspiegelanstieg um einen Meter und heutiger Bathymetrie.

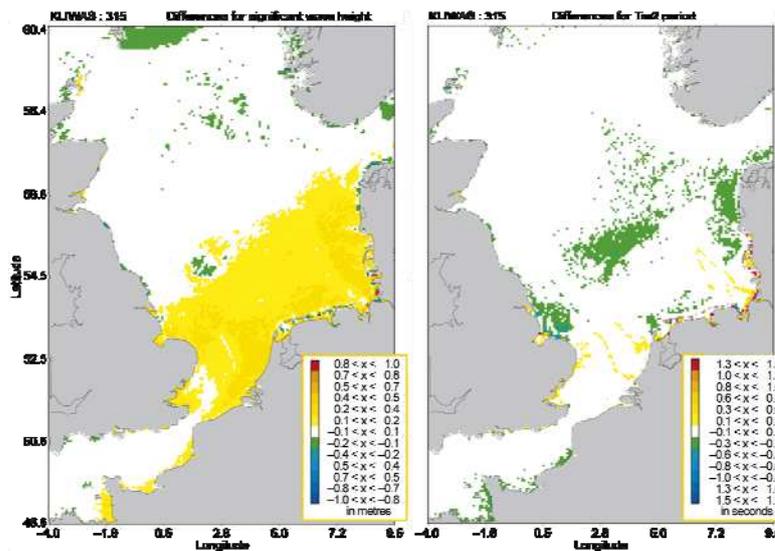


Abbildung A3-5: Links: Differenzen der signifikante Wellenhöhe in m; Rechts: Differenzen der Tm02 Periode in s (farbig) jeweils zwischen dem Zustand nach einem 5 Tage andauernden Sturm mit homogenen Windfeldern von 30m/s aus Nordwest und bei einem Meeresspiegelanstieg um einen Meter und heutiger Bathymetrie; Oben: Gesamte Nordsee; Unten: Deutsche Bucht.

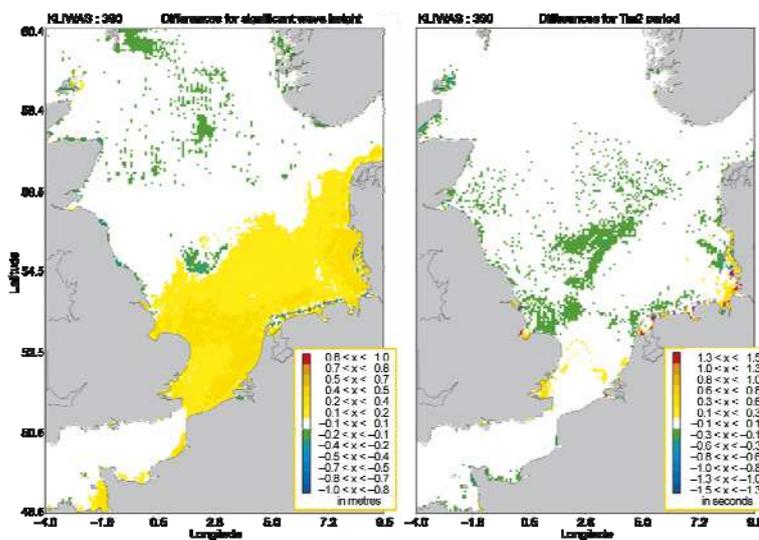


Abbildung A3-6: Links: Differenzen der signifikante Wellenhöhe in m; Rechts: Differenzen der Tm02 Periode in s (farbig) jeweils zwischen dem Zustand nach einem 5 Tage andauernden Sturm mit homogenen Windfeldern von 30m/s aus Norden und bei einem Meeresspiegelanstieg um einen Meter und heutiger Bathymetrie.



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: N. Groll (HZG)
R. Weisse (HZG)
A. Behrens (HZG)
H. Günther (HZG)
J. Möller (BSH)

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

Druck: Bundesanstalt für Gewässerkunde

DOI: 10.5675/Kliwas_64/2014_Seegangsszenarien