

nordwest2050

Perspektiven für klimaangepasste Innovationsprozesse
in der Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten

2. WERKSTATTBERICHT

Juni 2010

Klimaszenarien für ‚nordwest2050‘ Teil 1: Grundlagen

Bastian Schuchardt, Stefan Wittig & Jan Spiekermann

Impressum

Herausgeber des Werkstattberichts:

BioConsult Schuchardt & Scholle GbR
Reeder-Bischoff-Straße 54
28757 Bremen
www.bioconsult.de

Kontakt:

Dr. Bastian Schuchardt:

Tel.: (0421) 6392798 11, E-Mail: schuchardt@bioconsult.de

Dipl.-Biol. Stefan Wittig:

Tel.: (0421) 694981 28, E-Mail: wittig@bioconsult.de

Die vorliegende Publikation wurde im Rahmen des Forschungsverbundes ‚nordwest2050 – Perspektiven für klimaangepasste Innovationsprozesse in der Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten‘ erstellt. Für den Inhalt sind die genannten Autorinnen und Autoren verantwortlich.

Diese Publikation ist im Internet als pdf-Datei abrufbar unter: www.nordwest2050.de.

Bremen, Juni 2010

Inhaltsverzeichnis

1. Anlass und Ziel	5
2. Klimamodelle und -projektionen	6
Exkurs 1: Die SRES-Szenarien	8
3. Globale und regionale Beobachtungen des Klimawandels	12
4. Globale Klimamodellierung	13
4.1 Globale Klimaprojektionen	14
4.1.1 Temperatur	15
4.1.2 Meeresspiegel	16
5. Regionale Klimamodellierung	17
5.1 Regionale Klimaprojektionen und -annahmen	19
5.1.1 Temperatur	19
5.1.2 Meeresspiegel	20
5.1.3 Gezeiten und Sturmfluten	22
5.1.4 Niederschlag und Abfluss	23
5.1.5 Extremereignisse	24
6. Klimaszenarien für ‚nordwest2050‘	25
6.1 Exkurs 2: Das KLIMU-Klimaszenario	26
6.2 Abstimmung der Anforderungen an die ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien	28
Literatur	30
Anhang	34

Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Vergrößerung der statistischen Unsicherheit bei der Übertragung globaler Emissionsszenarien in regionale Klimafolgen und -maßnahmen	7
Abb. 2: Darstellung der vier SRES-Szenariofamilien des IPCC	10

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Projizierte CO ₂ -Konzentrationen für die SRES-Emissionsszenarien	11
Tab. 2: Projizierte mittlere globale Erwärmung an der Erdoberfläche und Meeresspiegelanstieg am Ende des 21. Jahrhunderts	16
Tab. 3: Basis- und Nutzerinformationen der Modelle REMO, WETTREG und CLM18	
Tab. 4: Das KLIMU-Klimaszenario für das Jahr 2050	27
Tab. 5: „Wunschliste“ der benötigten Klimaparameter, die mit den an der Vulnerabilitätsanalyse beteiligten Teilprojekten bzw. Arbeitspaketen abgestimmt worden ist	34
Tab. 6: Mit der Service Gruppe Anpassung (SGA) abgestimmte Anforderungsliste bezüglich der verfügbaren Klimaparameter aus der CERA-Datenbank	36
Tab. 7: Mit der Service Gruppe Anpassung (SGA) abgestimmte Anforderungsliste bezüglich der lieferbaren Klimaparameter aus der CERA-Datenbank	37

1. Anlass und Ziel

Die Klima- und Anpassungsforschung in Deutschland, Europa und global ist in den vergangenen Jahren deutlich intensiviert worden; aktuell wird sie unter dem Eindruck des 4. Sachstandsberichts des IPCC aus dem Jahr 2007 weiter massiv verstärkt. Die Regionalisierung (downscaling) der Ergebnisse der globalen Klimamodelle hat als besonders relevante Schnittstelle zur Anpassungsforschung und zunehmend auch zur Planung von Anpassungsmaßnahmen große Fortschritte gemacht. Unterschiedliche Methoden und Vorgehensweisen werden dabei angewendet und weiterentwickelt. Durch diese Methodenvielfalt müssen für das Verbundvorhaben für alle Arbeitsbereiche und für die Kommunikation mit Dritten verbindliche Klimaszenarien erarbeitet werden. Damit hat die Erstellung der Klimaszenarien auch eine integrative Funktion innerhalb des Forschungsverbundes. Die Szenarioentwicklung von BioConsult für das KLIMZUG-Projekt ‚nordwest2050‘ gliedert sich in zwei Teile:

1. Kommunikation und Verbreitung der aktuellen Erkenntnisse und Ergebnisse der globalen und regionalen Klimamodellierungen sowie der resultierenden Klimaprojektionen innerhalb des Verbundes kommuniziert, so dass die ‚nordwest2050‘-Projektbeteiligten insgesamt einen einführenden Überblick über den aktuellen Stand des Wissens bekommen. Die weitere Konkretisierung der Klimaszenarien erfolgt dann auf der Basis dieses Vorwissens in enger Zusammenarbeit und Abstimmung mit den Projektbeteiligten und mit dem fachlichen Input der „Service Gruppe Anpassung“ (SGA) (vorliegender Teil 1 „Grundlagen“).
2. Festlegung und Bereitstellung von zwei projektbezogen aufbereiteten ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien auf der Basis der im 1. Teil zusammengestellten aktuellen Ergebnisse der Regionalisierung. Diese Szenarien bilden die Grundlage für die weiteren Analysen innerhalb von ‚nordwest2050‘ v.a. für die Arbeiten im Bereich der Vulnerabilitätsanalyse, da sie hier die Expositionsdimension determinieren. Sie werden im Teil 2 „Randbedingungen und Beschreibung“ mit den nicht aus den regionalen Klimamodellierungen ableitbaren Parametern zu den zwei ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien zusammengeführt.

Der vorliegende 1. Teil fasst als erstes die Hintergründe von Klimamodellen und -projektionen und ihre Unsicherheiten zusammen, stellt anschließend heutige Beobachtungen des Klimawandels dar, um dann die globale Klimamodellierung und die daraus resultierenden globalen Klimaprojektionen zu erläutern. Zusätzlich werden als Exkurs die Emissionsszenarien des IPCC vorgestellt, um die globalen „Zukunftsbilder“, die die mögliche sozioökonomische Entwicklung der Menschheit beschreiben und als Grundlage für die Klimamodellierung dienen, darzustellen. Darauf basierend werden die aktuellen regionalen Klimamodelle mit den daraus resultierenden regionalen Klimaprojektionen dargestellt. Da aus den drei in ‚nordwest2050‘ betrachteten Wirtschaftsklustern Anforderungen hinsichtlich der benötigten Klimaparameter sowie ihrer Auflösung bestehen, wird abschließend auf die verfügbaren Parameter und den Abstimmungsprozess hingewiesen.

2. Klimamodelle und -projektionen

Neben der Frage nach den Ursachen der beobachteten globalen Erwärmung (und ihrer Begrenzung) sind die Abschätzungsversuche über das zukünftige Klima durch die Klimaforschung für die Klimafolgen- und Anpassungsforschung von hoher Relevanz (s.a. Teil 2). Zur Abschätzung und Bewertung künftiger möglicher Klimaentwicklungen benutzen Wissenschaft und Politik Klimamodelle. Die Ergebnisse der Modelle stellen mögliche Entwicklungskorridore des künftigen Klimas dar und werden Klimaprojektionen genannt. Sie beschreiben statistische Durchschnittswerte über größere Räume und Zeitabschnitte und bilden eine wichtige Grundlage für die Bewertung der Risiken und Chancen künftiger Klimaänderungen sowie notwendiger Anpassungsmaßnahmen in verschiedenen Sektoren (KomPass: <http://www.anpassung.net>).

Im Gegensatz zu einer Wettervorhersage beanspruchen Klimaprojektionen nicht, einen bestimmten Zustand der Atmosphäre an einem beliebigen Ort der Erde vorherzusagen, z.B. die Temperatur am 4. Januar 2058 in Berlin. Sie zielen vielmehr auf statistische Durchschnittswerte über größere Räume und Zeitabschnitte, z.B. die globale Durchschnittstemperatur oder den mittleren Niederschlag einer ganzen Klimazone über ein oder mehrere Jahrzehnte. Szenarien der Klimaänderung entwerfen also mögliche, plausible Klimaentwicklungen der Zukunft, sie sind jedoch nicht als exakte Vorhersagen oder gar als Wetterprognosen zu verstehen.

Da die globalen Einschätzungen über die zukünftige Entwicklung des globalen Klimas nach wie vor differieren, ist die Unsicherheit über Intensität und Geschwindigkeit des Klimawandels ein generelles Problem der Klimafolgenforschung (Schirmer 2005, Schirmer et al. 2007). Der Grund dafür liegt v.a. in den verschiedenen Annahmen über die technische, ökonomische und politische Entwicklung von Gesellschaften und den daraus resultierenden Veränderungen der Atmosphärenchemie insbesondere der klimarelevanten Treibhausgaskonzentrationen (s. Kap. 2.1). Wegen der prinzipiellen Unmöglichkeit, in die weitere technische, gesellschaftliche oder ökonomische Zukunft zu sehen, gibt es grundsätzliche Grenzen der Prognostizierbarkeit der Klimaentwicklung (ausführlich diskutiert in IPCC 2001). Verstärkt wird diese Unsicherheit durch die naturwissenschaftlichen Kenntnis- und Datenlücken bezüglich des globalen Klimasystems sowie durch die notwendige Reduktion der globalen und regionalen Klimamodelle. Eine zusätzliche Vergrößerung der Unsicherheiten erfolgt anschließend durch die Klimawirkungsmodelle, die von den zur Verfügung stehenden Klimadaten gespeist werden (s. Abb.1).

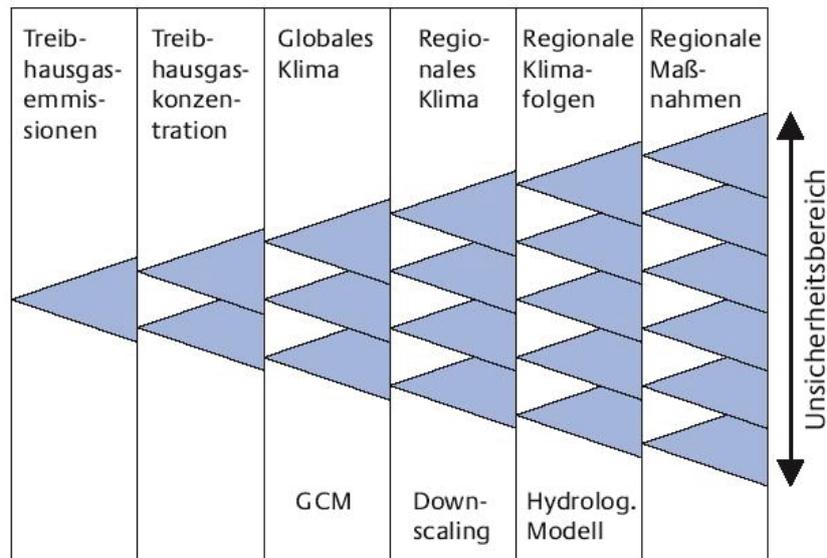


Abbildung 1: Vergrößerung der statistischen Unsicherheit bei der Übertragung globaler Emissionsszenarien in regionale Klimafolgen und -maßnahmen (aus BMVBS 2007)

Die Kombination aller Unsicherheiten führt zu einer hohen Anzahl von möglichen Zukünften mit einer großen Spanne an möglichen Klimazuständen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts und darüber hinaus. Wichtige Fragen lauten in diesem Zusammenhang:

- Wie wird sich die Menschheit weiter entwickeln und welche Emissionen sowie sonstigen Einflüsse hat das zur Folge?
- Wie werden sich die Emissionen auf die Konzentrationen von Treibhausgasen auswirken, d.h. wie viel wird durch die Senken im Kohlenstoffkreislauf (z.B. Landbiosphäre und Ozean) wieder aufgenommen und wie viel verbleibt in der Atmosphäre?
- Wie wird sich eine bestimmte Konzentration auf das Klima der Zukunft auswirken (Klimasensitivität)?

Bezüglich der Treibhausgasemissionen und der Folgen für das globale und regionale Klima bis zum Jahr 2050 muss z.B. betont werden, dass die für die unterschiedlichen Emissionsszenarien modellierten Klimaveränderungen nur der Größe entsprechen, wie sie für die natürliche Klimavariabilität von ca. 0,5°C eingeschätzt wird (mündl. Mitteilung des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg). Das bedeutet, dass natürliche und anthropogene Variabilität innerhalb dieses Zeitraums noch nicht statistisch sicher zu differenzieren sind (s.a. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum 4. Sachstandsbericht des IPCC, Abb. SPM 5 auf Seite 14). Die „geringen“ Temperaturdifferenzen von weniger als 0,5°C beim Vergleich der Ergebnisse für unterschiedliche Emissionsszenarien bis zum Jahr 2050 können also auf der natürlichen Klimavariabilität beruhen und müssen nicht Ausdruck der Emissionsveränderungen (wie in den Emissionsszenarien gesetzt) sein. Erst bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zeigen sich in den Modellierungsergebnissen deutliche emissionsbedingte Unterschiede. Für die ersten Jahrzehnte des 21. Jahrhunderts (2011-2030 im Vergleich zu 1980-1999) zeigen die Modellrechnungen eine von den Emissionsszenarien fast unabhängige Erwärmung um 0,64 bis 0,69°C (IPCC 2007).

Auch wenn in der Zwischenzeit die globalen Klimamodelle und die erforderliche Rechnerkapazität deutliche Fortschritte gemacht haben, besteht nach wie vor das Dilemma, dass insbesondere für langfristige Planungen und Entscheidungen (z.B. im Küstenschutz) belastbare, also i.d.R. quantitative Aussagen benötigt werden. Bei der regionalen Klimamodellierung, dem sog. downscaling, ist zu beachten, dass die Regionalmodelle in die Globalmodelle eingebettet sind (die regionalen Modelle CLM, REMO und WETTREG haben das globale Modell ECHAM5/MPI-OM als Randbedingung). Dementsprechend sind zwar räumlich feiner aufgelöste Klimaaussagen möglich, die modellbedingten Unsicherheiten damit aber nicht kleiner. Zusätzlich liegen die Unsicherheiten in den Aussagen bis zum Jahr 2050 im Wesentlichen in der Methode der Regionalisierung und nicht in den zugrunde liegenden globalen Emissionsszenarien. Die Forschung wird auf absehbare Zeit nicht in der Lage sein, die erwünschten eindeutigen Klimavorhersagen zu liefern.

Weitere Unsicherheitsvergrößerungen ergeben sich anschließend durch die Klimawirkungs- bzw. Klimafolgenmodelle. Die in den ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien festgelegten Veränderungen werden in verschiedene Wirk- bzw. Folgenmodelle eingespeist und sind Grundlage der Analysen zur regionalen und clusterspezifischen Vulnerabilität, um schließlich daraus regionale Anpassungsmaßnahmen und -strategien vorschlagen oder entwickeln zu können. Für die Klimafolgen- und Klimaanpassungsforschung sind insbesondere die Fragen und Probleme, wie aus dem großen Unsicherheitsbereich Anpassungsstrategien abgeleitet werden können, entscheidend. Dieses ist Bestandteil der weiteren Untersuchungen und Analysen des Projekts und soll in der sog. „Roadmap of Change“ abschließend umgesetzt werden.

Bei der Erstellung bzw. Definition von Klimaszenarien für die weitere Abschätzung von Klimafolgen und Anpassungserfordernissen insbesondere auf regionaler Ebene ist also zu beachten, dass Unsicherheiten in Klimaprojektionen inhärent sind und die Gründe für die Fokussierung von Maßnahmen auf einen bestimmten Bereich der Ergebnisspanne von Zukunftsszenarien im Zuge von Anpassungsstrategien oder -prozessen explizit kommuniziert werden sollten (Mahrenholz 2007, Jacob et al. 2008). Es wird daher empfohlen, neben den mittleren Änderungen für ein ausgewähltes Emissionsszenario für die Analysen der Klimafolgen und der Vulnerabilität zusätzlich immer auch die emissions- und modellbedingten Spannweiten der Änderungen mit zu betrachten (s.a. Teil 2).

Exkurs 1: Die SRES-Szenarien

SRES-Szenarien sind Emissionsszenarien des IPCC, die er seit seinem im Jahr 2000 veröffentlichten Bericht „Special Report on Emission Scenarios“ (SRES) als Basis für die Klimaprojektionen verwendet. Klimaprojektionen versuchen vorherzusagen, wie sich das Klima verändert, wenn unterschiedliche Mengen und Arten von Treibhausgasen emittiert werden. Klimaprognosen schätzen dagegen ein, wie sich das Klima wahrscheinlich entwickeln wird (vgl. a. Glossar im Teil 2). Folgende Begriffe sind wichtig, um Struktur und Gebrauch der SRES-Szenarien zu verstehen:

- **Szenarienfamilie:** Szenarien, die von einer ähnlichen demographischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und den technologischen Wandel betreffenden Modellgeschichte ausgehen. Das SRES-Szenarienset umfasst die vier Szenarienfamilien A1, A2, B1 und B2.
- **Szenariengruppe:** Szenarien innerhalb einer Familie, die eine konsistente Variation der Modellgeschichte reflektieren. Die A1-Szenarienfamilie umfasst vier Gruppen, bezeichnet mit A1T, A1C, A1G und A1B, die verschiedene mögliche Strukturen künftiger Energiesysteme untersuchen. In der „Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger“ (IPCC 2007) wurden die Gruppen A1C und A1G zur Gruppe A1FI („fossilintensiv“) zusammengefasst. Die anderen drei Szenarienfamilien enthalten je eine Gruppe. Das SRES-Szenarienset besteht damit aus sechs verschiedenen Szenariengruppen, von denen jede gleich stichhaltig ist und die zusammengenommen den Bereich der Unsicherheiten abdecken, die im Zusammenhang mit Einflussfaktoren und resultierenden Emissionen herrschen.
- **Illustratives Szenario:** Ein illustratives Szenario veranschaulicht, wie man sich die sechs Szenariengruppen jeweils vorzustellen hat. Der Weltklimarat hat dafür neben den vier überarbeiteten Szenarienfamilien (sie heißen jetzt A1B, A2, B1 und B2) noch zwei weitere Szenarien konstruiert: A1FI und A1T.
- **Musterszenarien:** Musterszenarien sollen berechnen, wie sich die eine oder andere Szenarienfamilie bzw. -gruppe unter bestimmten Bedingungen entwickelt.
- **Modellgeschichte:** Eine Modellgeschichte erzählt die Haupteigenschaften einer Szenariogruppe und beschreibt ihre Entwicklungsdynamik.

Die Szenarienfamilien werden nach IPCC (2000, 2007) folgendermaßen beschrieben (s.a. Abbildung 2: Darstellung der vier SRES-Szenariofamilien des IPCC):

A1: Die A1-Modellgeschichte bzw. -Szenario-Familie beschreibt eine zukünftige Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum, einer in der Mitte des 21. Jahrhunderts den Höchststand erreichenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung und rascher Einführung neuer und effizienterer Technologien. Wichtige grundlegende Themen sind die Annäherung von Regionen, die Entwicklung von Handlungskompetenz sowie die zunehmende kulturelle und soziale Interaktion bei gleichzeitiger substanzieller Verringerung regionaler Unterschiede der Pro-Kopf-Einkommen.

Die A1-Szenario-Familie teilt sich in drei Gruppen auf, die unterschiedliche Ausrichtungen technologischer Änderungen im Energiesystem beschreiben. Die drei A1-Gruppen unterscheiden sich durch ihren technologischen Schwerpunkt: fossilintensiv (A1FI), nicht-fossile Energieträger (A1T) oder ausgewogene Nutzung aller Quellen (A1B) (wobei ausgewogene Nutzung hier definiert ist als eine nicht allzu große Abhängigkeit von einer bestimmten Energiequelle und durch die Annahme eines ähnlichen Verbesserungspotentials für alle Energieversorgungs- und Energieverbrauchstechnologien).

A2: Die A2-Modellgeschichte bzw. -Szenario-Familie beschreibt eine sehr heterogene Welt. Das Grundthema ist Autarkie und Bewahrung lokaler Identitäten. Regionale Fruchtbarkeitsmuster konvergieren nur sehr langsam, was eine stetig zunehmende Bevölkerung zur Folge hat. Die wirtschaftliche Entwicklung ist vorwiegend regional orientiert, und das Pro-Kopf-Wirtschaftswachstum sowie technologische Veränderungen verlaufen fragmentierter und langsamer als in anderen Modellgeschichten.

B1: Die B1-Modellgeschichte bzw. -Szenario-Familie beschreibt eine sich näher kommende Welt mit der gleichen Weltbevölkerung wie in der A1-Modellgeschichte, die Mitte des 21. Jahrhunderts ihren Höchststand erreicht und sich danach rückläufig entwickelt, jedoch mit raschen Änderungen der wirtschaftlichen Strukturen in Richtung einer Dienstleistungs- und Informationswirtschaft, bei gleichzeitigem Rückgang des Materialverbrauchs und Einführung von saubereren und ressourceneffizienten Technologien. Der Schwerpunkt liegt auf globalen Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit, einschließlich erhöhter sozialer Gerechtigkeit, aber ohne zusätzliche Klimainitiativen.

B2 Die B2-Modellgeschichte bzw. -Szenario-Familie beschreibt eine Welt mit Schwerpunkt auf lokalen Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit. Es ist eine Welt mit einer stetig, jedoch langsamer als in der A2-Modellgeschichte ansteigender Weltbevölkerung, einer wirtschaftlichen Entwicklung auf mittlerem Niveau und einem weniger raschen, dafür vielfältigeren technologischen Fortschritt als in den B1- und A1-Modellgeschichten. Obwohl das Szenario auch auf Umweltschutz und soziale Gerechtigkeit ausgerichtet ist, liegt der Schwerpunkt auf der lokalen und regionalen Ebene.

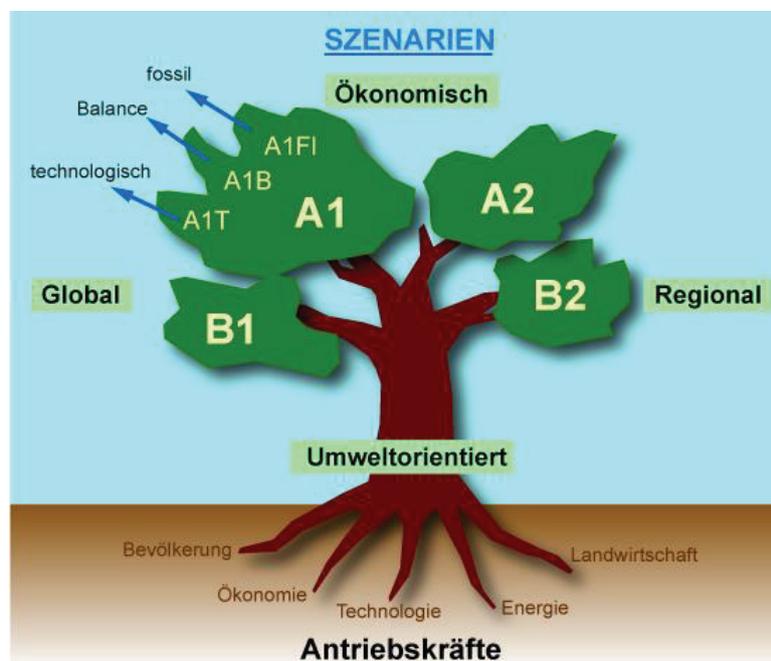


Abbildung 2: Darstellung der vier SRES-Szenariofamilien des IPCC. Vier qualitative Storylines beschreiben vier Szenariofamilien: A1, A2, B1 und B2. Insgesamt wurden 40 SRES-Szenarien entwickelt. Alle sind ohne zugewiesene Eintrittswahrscheinlichkeit gleichmäßig gültig bzw. stichhaltig. Aus den Szenariofamilien sind sechs Szenariogruppen abgeleitet: eine Gruppe in A2, B1, B2 und drei Gruppen in der A1-Familie (nach IPCC 2001).

Die SRES-Szenarien beinhalten keine zusätzlichen Klimaschutzanstrengungen oder -initiativen, d.h. es sind keine Emissionsszenarien berücksichtigt, die ausdrücklich eine Umsetzung des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) oder der Emissionsziele des Kyoto-Protokolls annehmen. Die aus den Szenarienfamilien resultierenden Kohlendioxidemissionen sind in Tab. 1 dargestellt.

Tabelle 1: Projizierte CO₂-Konzentrationen für die SRES-Emissionsszenarien (CO₂-Emissionen sind vorgegeben, atmosphärische Konzentrationen sind Modellergebnisse. Es sind sowohl die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe als auch von Landnutzungsänderung berücksichtigt) (verändert nach IPCC 2000)

SRES-Emissions-szenarien	CO ₂ -Emissionen (GtC pro Jahr)		Kumulierte CO ₂ -Emissionen 2001 bis 2100 (GtC)	Atmosphärische Konzentrationen (ppm)	
	2050	2100		2050	2100
A1B	16,4	13,5	1415	490-600	615-920
A1T	12,3	4,3	985	465-560	505-735
A1FI	23,9	28,2	2105	520-640	825-1250
A2	17,4	19,1	1780	490-600	735-1080
B1	11,3	4,2	900	455-545	485-680
B2	11,0	13,3	1080	445-530	544-770

Für die Berechnung des künftigen Klimas werden sechs beispielhafte Szenarien berücksichtigt: B1, B2, A1B, A1T, A2 und A1FI. Dabei ist B1 das Szenario mit den geringsten, A1B mit mittleren und A1FI mit den höchsten Treibhausgasemissionen bis 2100 (s. Tab. 1). Während z.B. im B1- und A1T-Szenario ab 2050 mit sinkenden Klimagasemissionsraten gerechnet wird, steigen im A2- und A1FI-Szenario die Raten bis 2100 nahezu stetig an. Die meisten Modellrechnungen auch der regionalen Klimamodelle (vgl. Kap) werden mit den Vorgaben der Szenarien B1, A1B und A2 durchgeführt. Zusätzlich ist auch berechnet worden, wie sich das Klima ändern würde, wenn man (rein theoretisch) die Konzentration der Treibhausgase und Aerosole auf dem Niveau des Jahres 2000 stabil gehalten hätte (s. 4. IPCC-Sachstandsbericht, Arbeitsgruppe I, Abb. SPM 5 auf Seite 14).

3. Globale und regionale Beobachtungen des Klimawandels

Nach IPCC (2007) ist die Erwärmung des Klimasystems eindeutig: Der größte Teil des beobachteten Anstiegs der mittleren globalen Temperatur seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist sehr wahrscheinlich durch den messbaren Anstieg der durch menschliche Aktivitäten erhöhten Treibhausgaskonzentrationen verursacht. Dieses wird eindeutig durch Beobachtungen des Anstiegs der mittleren globalen Luft- und Meerestemperaturen, des ausgedehnten Abschmelzens von Schnee und Eis und des Anstiegs des mittleren globalen Meeresspiegels gezeigt. Der 4. Sachstandsbericht des IPCC zeigt noch deutlicher als der dritte, dass auf der Skala von Kontinenten, Regionen und Ozeanbecken zahlreiche langfristige Änderungen des Klimas beobachtet werden können. Zu diesen gehören Änderungen der Temperaturen und der Eisausdehnung in der Arktis sowie Änderungen in den Niederschlagsmengen, im Salzgehalt der Ozeane, in Windmustern und bei Aspekten von extremen Wetterereignissen wie Trockenheit, Starkniederschlägen, Hitzewellen und der Intensität von tropischen Wirbelstürmen (weitere Details in IPCC 2007: <http://www.ipcc.ch>).

Hinsichtlich der bisherigen Klimaentwicklung in Deutschland kann auf langjährige Messwerte der Klima- und Niederschlagsmessstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD: www.dwd.de) zurückgegriffen werden. Hier werden Analysen des rezenten Klimas und über bereits nachweisbare Trends auch für Niedersachsen und Bremen durchgeführt. Diese Daten werden zusätzlich z.B. von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe zusammen mit dem niedersächsischen Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie ausgewertet. Weitere Analysen und Zahlen stammen von dem niedersächsischen Projekt „Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung – Decision Support System Wald und Klimawandel“ (DSS-WUK: <http://www.dss-wuk.de/>). Zusammengefasst sind die beobachtbaren Klimaänderungen in Niedersachsen im Strukturpapier des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt und Klimaschutz aus dem Jahr 2008 (vgl. Nds. MUK 2009).

Demnach lag die **Jahresmitteltemperatur** in Niedersachsen im Zeitraum von ca. 1950-2000 mit 8,7°C um 0,4°C höher als der Mittelwert für ganz Deutschland und über diesen Zeitraum ist ein Anstieg von insgesamt etwa 1,4°C zu verzeichnen. Die Temperaturen im Winter und Frühjahr weisen einen überproportional starken Anstieg auf und eine auffällige Häufung überdurchschnittlich warmer Jahre ist seit Ende der 1980er Jahre zu beobachten. Durch den Einfluss der von der Nordsee beeinflussten Luftmassen ist im Bereich des niedersächsischen Flachlandes die räumliche Differenzierung bei der Verteilung der Lufttemperatur relativ gering, während im Bergland und im Harz starke höhenabhängige Unterschiede auftreten (Nds. MUK 2009).

Zusätzlich hat sich bei den **Temperaturen** nicht nur der Mittelwert verändert, sondern auch die saisonale Verteilung, die wesentlich für die Steuerung von Wachstumsvorgängen ist. So konnte beobachtet werden, dass der letzte Spätfrost in Niedersachsen in der Periode 1961-1991

durchschnittlich am 22. April und der erste Frühfrost am 30. Oktober auftritt. Damit liegt die frostfreie Zeit mit 191 Tagen über der Gesamtdeutschlands (184 Tage) und sie hat sich seit 1961 im Mittel um 9,9 Tage verlängert. Auch die mittlere thermische Vegetationsperiode, die dauerhafte Überschreitung der Tagesmitteltemperatur von 5°C, liegt in Niedersachsen mit einem Wert von 311 Tagen etwas über dem Bundesdurchschnitt (305 Tage) und sie hat sich durch rezente Klimaerwärmung seit 1961 um 21 Tage verlängert (Nds. MUK 2009).

Hinsichtlich des **Niederschlags** liegt die langjährige mittlere jährliche Niederschlagshöhe in Niedersachsen mit 736 mm um 43 mm unter der von Deutschland. In den niedersächsischen Niederschlagsmessungen ist eine deutliche Abnahme der Niederschlagshöhen von den westlichen zu den östlichen Landesteilen erkennbar; dies spiegelt den abnehmenden Einfluss der Nordsee wider. So liegt im kontinental geprägten Klima des Wendlandes der mittlere Niederschlag unter 600 mm, wodurch bereits heute in trockenen Sommern keine optimale Wasserversorgung für z.B. die landwirtschaftlichen Pflanzenbestände gewährleistet ist und auch die Grundwasserspenden minimal sind. Das Osnabrücker Hügelland, Teile des Weser-Leine-Berglands und der Harz sind dagegen durch höhere jährliche Niederschläge gekennzeichnet (mehr als 800 mm). Für den Herbst und Winter sind in den letzten Jahren leichte Anstiege der Niederschläge zu verzeichnen, die regional jedoch unterschiedlich ausgeprägt ausfielen (Nds. MUK 2009).

Wie die Niederschläge weisen auch die **Windgeschwindigkeiten** deutliche Gradienten innerhalb Niedersachsens auf. Die mittlere Windgeschwindigkeit nimmt von der Nordseeküste nach Osten und ins Landesinnere um den Faktor 2-3 ab. In den Mittelgebirgen steigen die Windgeschwindigkeiten mit zunehmender Höhe an, was sich besonders in den Kammlagen des Berglandes und im Harz bemerkbar macht.

4. Globale Klimamodellierung

Auch wenn in der Zwischenzeit die globalen Klimamodelle und die erforderliche Rechnerkapazität deutliche Fortschritte gemacht haben, besteht nach wie vor das Dilemma, dass insbesondere für langfristige Planungen und Entscheidungen (z.B. im Küstenschutz) belastbare, also i.d.R. quantitative Aussagen benötigt werden, obwohl die Forschung auf absehbare Zeit nicht in der Lage sein wird, die erwünschten eindeutigen Klimavorhersagen zu liefern. Während jedoch begründete Hoffnung besteht, in Zukunft über bessere globale Klimamodelle zu verfügen, wird sich das Problem der geringen Prognostizierbarkeit zukünftiger Emissionsraten nicht beheben lassen. Die Berichte des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 1996, 2001, 2007) bewältigten diese Unsicherheiten aktiv durch die Formulierung unterschiedlicher Szenarien der gesellschaftlichen und technischen Entwicklung der Welt als Grundlage für sich z.T. sehr deutlich voneinander unterscheidende Emissionsszenarien (s. Kap. 2.1).

Der Beitrag der Arbeitsgruppe I zum 4. Sachstandsbericht des IPCC beschreibt die Fortschritte im Verständnis der anthropogenen und natürlichen Antriebskräfte der Klimaänderung, der beobachteten Änderung des Klimas, von Klimaprozessen und deren Zuordnung und der Abschätzung der projizierten zukünftigen Klimaänderung. Er baut auf vergangenen IPCC-Sachstandsberichten auf und integriert neue Erkenntnisse aus der Forschung der vergangenen sechs Jahre.

Im 2. Sachstandsbericht des IPCC (1996) wurden die Annahmen über den zeitlichen Verlauf und die Intensität der zukünftigen Treibhausgasemissionen sowie die resultierenden Konzentrationen in der Atmosphäre in dem Szenarien-Ensemble IS92a bis IS92e zusammengefasst, das von optimistischen bis zu „worst case“-Annahmen reicht. Häufig benutzt und zitiert wird das IS92a-Szenario, in welchem von „business as usual“-CO₂-Emissionen ausgegangen wird, die bis 2100 zu einer Verdoppelung der Konzentration in der Atmosphäre führen, welches wiederum zu einem global gemittelten Temperaturanstieg um 2°C und einem Meeresspiegelanstieg um 48 cm führt (vgl. Kap. 6.1). Diese Szenarien wurden im 3. Sachstandsbericht (IPCC 2001) in Form von 4 verschiedenen „Storylines“ der möglichen Zukünfte im IPCC Special Report on Emission Scenarios (SRES: IPCC 2000; s. Kap. 2.1) neu formuliert. Ergebnis ist eine Vielzahl von Hochrechnungen („projections“) der zukünftigen Emissionen von Klimagasen, ihrer Akkumulation in der Atmosphäre und der resultierenden Veränderungen des globalen Energiehaushalts.

Die vom IPCC berücksichtigten globalen Klimamodelle (ca. 20) sind überwiegend gekoppelte Atmosphären-Ozean-Meereis-Kontinental-Modelle (GCM), die von den großen Klima-Rechenzentren der Welt betrieben werden. In Deutschland sind das z.B. das Deutsche Klimarechenzentrum (DKRZ) und das Max-Planck-Institut für Meteorologie, in Großbritannien das Hadley Centre. Ausgabegrößen sind v.a. die Atmosphärentemperatur, aber auch Niederschlag, Wind, Wassertemperatur der Ozeane und, als daraus abgeleitete globale Größe, der Anstieg des Meeresspiegels.

4.1 Globale Klimaprojektionen

Die weitere Entwicklung des Klimas ist abhängig von der Entwicklung der globalen Treibhausgasemissionen und -konzentrationen in der Atmosphäre. Da die Emissionen von der Entwicklung der menschlichen Gesellschaft im 21. Jahrhundert abhängen und daher nicht eindeutig bestimmt werden können, werden vom IPCC verschiedene Emissionsszenarien aufgestellt, die mögliche Emissionspfade der Zukunft aufzeigen (s. Kap. 2.1). Aus diesen Emissionspfaden werden die zukünftigen Konzentrationen der Treibhausgase und daraus die Parameter (Temperatur, Niederschlag etc.) möglicher Klimaverhältnisse abgeleitet.

Eine zentrale Aussage des 4. IPCC-Sachstandsberichts aus dem Jahr 2007 lautet: „Für die nächsten zwei Jahrzehnte wird für eine Reihe von SRES-Szenarien eine Erwärmung von 0,2°C pro Jahrzehnt projiziert. Selbst wenn die Konzentrationen aller Treibhausgase und Aerosole auf dem Niveau des Jahres 2000 konstant gehalten würden, wäre eine weitere Erwärmung von 0,1°C pro Jahrzehnt zu erwarten.“ Weiterhin heißt es dort, dass „andauernd gleich hohe oder höhere Treibhausgasemissionen als heute eine weitere Erwärmung verursachen würden und im

21. Jahrhundert viele Änderungen im globalen Klimasystem bewirken, die sehr wahrscheinlich größer wären als die im 20. Jahrhundert beobachteten.“ Dabei ist „das Vertrauen in projizierte Erwärmungsmuster und andere regionale Besonderheiten, einschließlich Veränderungen der Windmuster, Niederschläge und einige Aspekte von Extremereignissen und Eis, [...] nun höher“ als im 3. Sachstandsbericht aus dem Jahr 2001. Zusätzlich wird darauf hingewiesen, dass die anthropogene Erwärmung und insbesondere auch der Meeresspiegelanstieg aufgrund der langen Zeitskalen, die mit Klimaprozessen und Rückkopplungen innerhalb des Klimasystems verbunden sind, über Jahrhunderte andauern würden, selbst wenn die Treibhausgaskonzentrationen stabilisiert würden.

Der Grund für die langfristig anhaltende Klimaänderung liegt hauptsächlich in der langsamen Reaktion und Anpassung der Ozeane und Eisschilde bis zu einem Gleichgewichtszustand mit der Atmosphäre. Die untere Atmosphäre reagiert auf einen externen Antrieb, z.B. die Erhöhung der Treibhausgase oder der Solarstrahlung, in Zeitskalen, die kürzer als ein Monat sind. Der obere Ozean reagiert z.B. auf eine Erwärmung über die Atmosphäre auf einer Zeitskala zwischen einigen Jahren und Jahrzehnten. Der tiefe Ozean und die Eisschilde passen sich erst in Zeiträumen zwischen Jahrhunderten und Jahrtausenden neuen Bedingungen an.

4.1.1 Temperatur

Für die ersten Jahrzehnte des 21. Jahrhunderts (2011-2030 im Vergleich zu 1980-1999) zeigen die Modellrechnungen eine von den Emissionsszenarien fast unabhängige Erwärmung um 0,64 bis 0,69°C (IPCC 2007). In der 2. Hälfte des Jahrhunderts ist die globale Erwärmung bei den einzelnen Szenarien erkennbar verschieden. Für die Zeit 2090-2099 im Vergleich zu 1980-1999 prognostizieren die Modelle die in Tab. 2 dargestellte Zunahme der globalen Mitteltemperatur.

Wie in Tab. 2 dargestellt, berechnen die Modelle des IPCC für die aus den SRES-Szenarien abgeleiteten Emissionsraten für das Ende dieses Jahrhunderts globale Mitteltemperaturanstiege zwischen etwa 1,1 und 6,4°C gegenüber der Periode 1980 bis 1999. Nach IPCC (2007) wird der Zusammenhang zwischen dem CO₂-Gehalt der Atmosphäre und ihrer Temperatur folgendermaßen charakterisiert: Eine Verdoppelung der atmosphärischen CO₂-Konzentration führt in den Modellen zu einer mittleren globalen Temperaturerhöhung um 2 bis 4,5°C mit 3°C als wahrscheinlichstem Wert (vgl. a. Schuchardt et al. 2008).

Tabelle 2: Projizierte mittlere globale Erwärmung an der Erdoberfläche und Meeresspiegelanstieg am Ende des 21. Jahrhunderts (IPCC 2007).

SRES-Emissions-szenarien	Temperaturänderung (in °C; 2090-2099 verglichen mit 1980-1999)		Meeresspiegelanstieg (in cm; 2090-2099 verglichen mit 1980-1999)
	Beste Schätzung	Wahrscheinliche Bandbreite	Modellbasierte Bandbreite ohne zukünftige rapide Änderungen des Eisflusses
A1B	2,8	1,7 – 4,4	21 – 48
A1T	2,4	1,4 – 3,8	20 – 45
A1FI	4,0	2,4 – 6,4	26 – 59
A2	3,4	2,0 – 5,4	23 – 51
B1	1,8	1,1 – 2,9	18 – 38
B2	2,4	1,4 – 3,8	20 – 43

Die modellierte globale Klimaerwärmung fällt regional sehr unterschiedlich aus; es lassen sich allerdings gewisse Muster erkennen. So ist zum einen die Temperaturerhöhung über dem Land größer als über den Ozeanen, da sie sich langsamer erwärmen. Allerdings ergibt sich in den hohen nördlichen Breiten eine deutliche Abweichung von diesem Muster: Die Atmosphäre über dem arktischen Ozean erwärmt sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts in dem A1B-Szenario um fast 7°C (mit einer Spannweite von 4 bis 11°C) und damit um 1°C mehr als die angrenzenden Landmassen (IPCC 2007). Ursache hierfür ist das starke Abschmelzen des arktischen Meereises, wodurch ein selbstverstärkender Rückkopplungseffekt angestoßen wird: Die vom Eis reflektierte Sonnenstrahlung wird nach dem Schmelzen des Eises vom Meerwasser absorbiert und in Wärmestrahlen umgewandelt, die die untere Atmosphäre zusätzlich zum Treibhauseffekt erwärmen. Solche Rückkopplungsprozesse innerhalb des Klimasystems, die sich selbst verstärken, werden als sog. Kipp-Elemente („tipping points“) bezeichnet und sind z.B. in UBA (2008) weiter erläutert (weitere Details auch im Teil 2).

Weiterhin zeigt sich global die stärkste Erwärmung über den Landgebieten in den hohen nördlichen Breiten über Sibirien, Kanada und Alaska. Hier wird der Temperaturanstieg nach dem A1B-Szenario ca. 6°C betragen (mit einer Bandbreite von 3 bis 11°C). Auch hierfür sind Rückkopplungseffekte verantwortlich: Die heute von großen Eis- und winterlichem Schnee bedeckten Areale werden durch die Erwärmung immer weiter zurückgehen. Dadurch wird über die Albedo-Rückkopplung die Erwärmung weiter erhöht, was wiederum die Eis- und Schneeflächen noch schneller schrumpfen lässt. Auf der Südhalbkugel wirkt sich dieser Effekt weniger aus. Hier ist nur die Antarktis nennenswert mit Eis- und Schnee bedeckt, woran die globale Erwärmung wahrscheinlich wenig ändern wird (Ausnahme stellt hier der westantarktische Eisbereich dar). Eine weitere Auffälligkeit ist die stärkere Temperaturzunahme im Innern der Kontinente im Vergleich zu den küstennahen Gebieten, wo sich der dämpfende Einfluss der angrenzenden Meere auswirkt.

4.1.2 Meeresspiegel

Die Veränderungen der Strahlungseigenschaften der Atmosphäre durch veränderte Gaskonzentrationen bewirken zunächst einen Anstieg der Lufttemperatur in der Troposphäre, die

ihrerseits u.a. die Temperatur der Meeresoberflächen ansteigen lässt und zum Abschmelzen terrestrischer und mariner Eismassen führt. Die langsam in die Tiefe der Ozeane fortschreitende Erwärmung und dadurch ausgelöste Ausdehnung der ozeanischen Wassermassen und der Zufluss von Schmelzwasser tragen gegenwärtig je zur Hälfte zum aktuellen globalen Meeresspiegelanstieg von etwa 3 mm pro Jahr bei (s. Kap. 2.1). Mittelfristig wird der Beitrag der thermischen Ausdehnung deutlich steigen, der Netto-Abfluss von den Kontinenten dagegen abnehmen, während die Schmelze der grönländischen Eismassen an Bedeutung gewinnen wird (IPCC 2007, Schuchardt et al. 2008).

In der Tab. 2 sind auch die Modellierungen des IPCC bezüglich des Meeresspiegelanstiegs zusammengestellt. Sie zeigen die große Spannweite der möglichen zukünftigen Entwicklungen des mittleren globalen Meeresspiegels, die sich aus der Abhängigkeit von den zukünftigen Treibhausgasemissionen und den noch immer großen wissenschaftlichen Defiziten ergeben. Vom IPCC wird bis Ende dieses Jahrhunderts ein globaler Anstieg des mittleren Meeresspiegels um minimal 18 bis zu maximal 59 cm errechnet, jeweils zuzüglich der noch unbekanntenen Folgen von Gletscherschmelzen (IPCC 2007; s.a. Kap. 5.1.2). Rahmstorf & Richardson (2007) gehen abweichend von der Einschätzung des IPCC von einem Anstieg des Meeresspiegels um etwa 3,4 mm pro Jahr pro 1°C Temperaturerhöhung der Atmosphäre aus, was für das A1B-Szenario mit ca. 3°C Temperaturerhöhung bis 2100 schon über 1 m, für das A1FI-Szenario mit bis zu 6°C Temperaturanstieg sogar über 2 m bedeuten würde.

In Zeiträumen von Jahrhunderten wird überdies das postglaziale Absinken der deutschen Nordseeküste von ca. 10 cm pro Jahrhundert relevant, was zu den jeweiligen globalen Schätzungen addiert werden muss. Weiterhin muss beachtet werden, dass in den globalen Aussagen zum Meeresspiegelanstieg lokale Effekte wie veränderte Tidekennwerte (insbesondere ein Anstieg des MThw) und anthropogene Veränderungen der Bathymetrie und Topografie des Weserästuars nicht enthalten sind (Schirmer 2005, Schuchardt et al. 2008; s.a. Kap. 5.1.2).

5. Regionale Klimamodellierung

Da die globalen Klimamodelle mit ihren globalen Klimaprojektionen für Folgenuntersuchungen und Anpassungsforschung auf regionaler Ebene nicht ausreichend aufgelöst sind, sind Regionalisierungsverfahren entwickelt worden. Regionale Klimamodelle für Deutschland bis zum Jahr 2100 sind vom Umweltbundesamt (UBA) im Rahmen eines Forschungsprojektes erstellt worden. Die globalen Klimasimulationen, auf denen die regionalen Klimamodelle aufbauen, wurden mit dem am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg vorhandenen Globalmodell ECHAM5 gerechnet. Für die Regionalisierung im UBA kommen zwei verschiedene Modellansätze zur Anwendung: Einerseits das dynamische Regionalmodell REMO des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg (MPI-M: <http://www.mpimet.mpg.de>) und andererseits das statistische Modell WETTREG der Firma Climate & Environment Consulting

GmbH in Potsdam (CEC Potsdam: <http://www.cec-potsdam.de>). Das Modell REMO bildet die dynamischen Vorgänge in der Atmosphäre ab, während das Modell WETTREG die statistischen Wechselbeziehungen bisheriger Klimabeobachtungen, v.a. den Einfluss der Großwetterlagen auf das Lokalklima, nutzt (s. Tab. 3). Die Klimaszenariendaten des WETTREG-Modells beschreiben somit den mittleren, typischen Verlauf des Klimas in einer Region, repräsentiert durch eine bestimmte Gruppe von Messstationen. Die Daten sind ein Indiz für den jeweiligen Zustand des großräumigen Klimas; Aussagen zum künftigen Wettergeschehen an einer Station zu einem beliebigen Tag in der Zukunft sind jedoch nicht möglich.

Tabelle 3: Basis- und Nutzerinformationen der Modelle REMO, WETTREG und CLM.

Modell	REMO	WETTREG	CLM
Modelltyp	Dynamisches Modell, Antrieb: Globalmodell ECHAM5/MPI-OM	Statistisches Regionalisierungsverfahren, basierend auf dem Globalmodell ECHAM5/MPI-OM	Dynamisches Modell; Antrieb: ECHAM5, nicht-hydrostatisch
Entwicklung	MPI für Meteorologie, Hamburg	CEC Potsdam GmbH	Gruppe Modelle und Daten (M&D) am MPI für Meteorologie, Hamburg
Modellgebiet	Deutschland plus Alpenraum	Deutschland	Europa
Zeitraum	1950 bis 2100	1961 bis 2100	1961 bis 2100
IPCC-Emissions-szenarien	A1B, B1, A2	A1B, B1, A2	A1B, B1 (ab 2001)
Räumliche Auflösung	0,088° (ca. 10 x 10 km)	Bezogen auf meteorologische Stationen (basierend auf Wetterlagen, die jeweils fokussiert sind auf Nord-, Mittel- und Süddeutschland)	0,165° (Datenstrom 2), 0,2° (Datenstrom 3); ca. 20 x 20 km
Zeitliche Auflösung	Stundenwerte (parameterabhängig)	Tageswerte	Stundenwerte (parameterabhängig)
Struktur	Gitterpunkte: Rotiertes Modellgitter (Datenstrom 2) sowie Reguläres lat/lon-Gitter (Datenstrom 3)	Diskrete Stationswerte, ergänzt um Metadaten für die Station wie geographische Koordinaten und Höhe über NN	Rotiertes Modellgitter (Datenstrom 2) oder Reguläres lat/lon-Gitter (Datenstrom 3); kleinräumige Ausschnitte möglich
Datenformat	netCDF	ASCII-Code	netCDF
Datenmenge (Beispiel)	rund 138 Gigabyte pro Parameter (alle 3 Szenarien A1B, A2 und B1, alle Dekaden von 1960-2100)	rund 65 Gigabyte (pro Szenario für alle Dekaden von 1960-2100)	stündl. Werte für 1 Parameter und 100 Jahre ca. 165 Gigabyte (Datenstrom 3)
Zugang zu den Daten		CERA-Datenbank des WDCC	
CERA-Kennung	REMO-UBA	WETTREG-UBA	CLM_SGA

Da das UBA die Forschung im Bereich der Klimawirkung aktiv unterstützen möchte, stellt das

Kompetenzzentrum „Klimafolgen und Anpassung“ (KomPass: <http://www.anpassung.net>) die Rohdaten der Modellläufe interessierten Anwendern zur Verfügung. Die Klimaszenarien stehen in der Klimadatenbank „Climate and Environmental Data Retrieval and Archive“ (CERA: <http://cera-www.dkrz.de/>) des „World Data Center for Climate“ (WDCC: <http://www.mad.zmaw.de>) zur Verfügung. Informationen über die zur Verfügung stehenden Daten (Metadaten) sowie die Datensätze selber sind nach Registrierung kostenfrei nutzbar. Die Daten liegen in der Datenbank nicht in Form regionaler Muster (Karten) oder als Darstellung zeitlicher Verläufe von Klimaparametern vor, sondern werden in Form von ASCII-Daten bzw. im Format netCDF bereitgestellt (s. Tab. 3).

Von der Gruppe Modelle und Daten (M&D: <http://www.mad.zmaw.de/>; Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg), wurden und werden ebenfalls regionale Klimamodellierungen durchgeführt, die ebenfalls über die CERA-Datenbank des WDCC bereitgestellt werden. Die Simulationen erfolgten im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und in Abstimmung mit der Gruppe der deutschen Regionalklima-Modellierer. Auch hier sollen mit der unentgeltlichen Bereitstellung der Modelldaten die Durchführung von Projekten zur Klimafolgenforschung ermöglicht und die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel angeregt und unterstützt werden. Diese Daten wurden am Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) in Hamburg mit dem Regionalmodell CLM (Climate mode of the Local Model of the DWD) berechnet (s. Tab. 3). Die Durchführung der Simulationen wurde unterstützt durch die CLM-Entwickler (BTU Cottbus, Forschungszentrum GKSS, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung), den Wissenschaftlichen Lenkungsausschuss von M&D, die Anteilseigner des DKRZ und das BMBF.

5.1 Regionale Klimaprojektionen und -annahmen

Für regionale Klimaprojektionen ist zu beachten, dass die Regionalmodelle nicht für alle relevante Klimaparameter Modellierungsergebnisse liefern. Daher müssen für die Parameter mittlerer Meeresspiegelanstieg, Gezeiten (Tidehub, mittleres Tidehochwasser und mittleres Tideniedrigwasser) und Sturmflutwasserstände sowie über die Abflussänderungen regionale Annahmen über klimawandelbedingte Veränderungen aus anderen Quellen abgeleitet werden.

5.1.1 Temperatur

Das Modell REMO liefert nach Jahreszeiten differenzierte Ergebnisse zur künftigen Entwicklung der Temperatur in Deutschland. Die Ergebnisse, die es bislang noch nicht in dieser Detailliertheit gab, lassen sich auf folgende Aussage verdichten: Je nach Anstieg der Treibhausgase könnten bis zum Ende des Jahrhunderts die Temperaturen in Deutschland – vor allem im Süden und Südosten – um mehr als 4°C im Vergleich zu den letzten 50 Jahren steigen (UBA 2006).

Die WETTREG-Modellrechnungen ergeben für den Zeitraum 2071 bis 2100 gegenüber den Jahren 1961 bis 1990 einen Anstieg der Temperaturen zwischen 1,8 und 2,3°C für Deutschland. Die stärkste Erwärmung könnte es hiernach im Norden Deutschlands (außerhalb des Küstenbereichs) sowie in den Voralpen geben (UBA 2007).

Beide Modelle zeigen für die zukünftige Temperaturentwicklung ein konsistentes Bild: In Deutschland ist eine rasche Erwärmung sehr wahrscheinlich. Abhängig von der Höhe des künftigen globalen Treibhausgasausstoßes ist eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur bis zum Jahr 2100, im Vergleich zum Zeitraum 1961 bis 1990, um 1,5 bis 3,7°C zu erwarten. Diese Erwärmung würde sich saisonal unterschiedlich stark ausprägen. Der größte Temperaturanstieg wäre im Winter zu erwarten.

Nach den Modellrechnungen des Regionalmodells CLM wäre in Niedersachsen ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur um ca. 3°C bis zum Jahr 2100 für das A1B-Szenario zu erwarten. Etwas weniger betroffen von dem Temperaturanstieg wären die Regionen der Lüneburger Heide, des Weser-Leine-Berglandes und des Harzes. An der Nordseeküste wird die Erwärmung mit im Mittel 2,5°C etwas schwächer ausfallen. Weiterhin ist der Temperaturanstieg nicht gleichmäßig über das Jahr verteilt: Am stärksten ist er im Winter und Herbst (3 bis 4°C), während er im Frühling mit 1,8°C relativ moderat ausfällt (Nds. MUK 2009).

Die Unterschiede im Anstieg der mittleren saisonalen Lufttemperatur zeigen sich nach Nds. MUK (2009) auch in einer Verlängerung der frostfreien Zeit. Sie würde sich bis zum Ende des Jahrhunderts um weitere 50-55 Tage verlängern, was sowohl aus einem Rückgang der Spätfröste (21 Tage früher) als auch aus späterem Auftreten der Frühfröste (32 Tage) resultiert. Auch würde sich die mittlere Dauer der thermischen Vegetationsperiode um weitere 70-80 Tage erhöhen. Die Änderung im Küstenbereich und im westlichen und mittleren Teil Niedersachsens könnte sogar 80-90 Tage betragen.

5.1.2 Meeresspiegel

Hinsichtlich des Meeresspiegelanstiegs machen die regionalen Klimamodelle keine Aussage. Die globalen Klimamodelle des IPCC (2007) gehen von einem Meeresspiegelanstieg von bis zu 38 cm (niedriges Emissionsszenario) und 59 cm (hohes Emissionsszenario) bis 2100 aus (Tab. 4, s.a. Kap. 4.1.2). Einige Wissenschaftler gehen davon aus, dass die Höhe und Geschwindigkeit eher unterschätzt wird (z.B. Rahmstorf 2007). Der Meeresspiegelanstieg im KLIMU-Klimaszenario von +55 cm bis 2050 (inkl. säkularen Anteils) stellt ein eher kräftiges Signal dar, das die Sensitivitäten der Region verdeutlichen sollte (Schirmer 2005, Schirmer et al. 2007; vgl. Kap. 6.1).

Eine Übersetzung der globalen Meeresspiegeländerungen auf die regionale Ebene muss die spezifischen Bedingungen an der deutschen Nordseeküste berücksichtigen (Schirmer 2005, Schuchardt et al. 2008, Storch et al. 2005). Dies betrifft v.a. die Besonderheit der Nordsee als Randmeer des Nordatlantiks, die relative Senkung der Schleswig-Holsteinischen und der Niedersächsischen Küste und die Veränderung des Tidehubs, insbesondere den Anstieg des Tidehochwassers (weitere Details im Teil 2).

In der Tab. 4 sind neben den Modellierungen des IPCC auch Extrapolationen aus regionalen Zeitreihen zusammen gestellt. Der IPCC (2007) gibt für den bisherigen mittleren globalen Anstieg des Meeresspiegels für den Zeitraum 1961 bis 2003 $1,8 \pm 0,5$ mm/Jahr an, mithin etwa 18

cm/Jahrhundert, mit einer deutlichen Beschleunigung im Zeitraum 1990 bis 2003 auf etwa 3 mm/Jahr, entsprechend 30 cm/Jahrhundert. Vom IPCC wird weiterhin bis 2100 ein globaler Anstieg des mittleren Meeresspiegels zwischen 18 und 59 cm errechnet, jeweils zuzüglich der noch unbekanntem Folgen von Gletscherschmelzen. Für den Zeitraum bis zum Jahr 2050 kann von etwa der Hälfte der genannten Werte ausgegangen werden, so dass im Emissionsszenario B1 mindestens +9 cm, im Emissionsszenario A1FI mindestens +30 cm Meeresspiegelanstieg eintreten werden. Die Szenarien des „United Kingdom Climate Impacts Programme“ (UKCIP 2008) kommen zu ähnlichen Größenordnungen für den Meeresspiegelanstieg bis 2050: Er wird für die Südhälfte der britischen Insel auf 30 bis 50 cm bis zum Jahr 2050 geschätzt (Schuchardt et al. 2008; Tab. 4).

Tab. 1: Zusammenstellung errechneter Werte (szenariobasiert) und extrapolierter Trends für den zukünftigen Anstieg des mittleren Meeresspiegels (MW) und des mittleren Tidehochwassers (MThw) bis 2050 und 2100 (* x = unbekannter Zuschlag für Gletscherschmelze)(Schuchardt et al. 2008).

Quelle	Szenario / Datensatz	Kenngröße	Anstieg bis 2050 (in cm)	Anstieg bis 2100 (in cm)
IPCC 2007	Extrapolation aus 1990 - 2003	MW	15	30
IPCC 2007	B1 (global)	MW	9 – 19 + x*	18 – 38 + x*
IPCC 2007	A1B (global)	MW	11 – 24 + x*	21 – 48 + x*
IPCC 2007	A1FI (global)	MW	13 – 30 + x*	26 – 59 + x*
UKCIP 2008	Regionalszenario (Süd-England)	MW	30 – 50	-
Jensen & Mudersbach 2007	Zeitreihe dt. Küstenpegel Nordsee (Extrapolation, Basis 1950-2005)	MW	7 – 10	14 – 19

Die Nordsee folgt dem Anstieg des mittleren globalen Wasserstandes (MW) mit Verzögerung. Jensen & Mudersbach (2007) geben den Trend des Anstiegs des MThw 1950 bis 2005 für ausgewählte Küsten- bzw. Inselpegel mit 14,4 bzw. 18,5 cm/Jahrhundert an. Eine Beschleunigung des Anstiegs seit den 90er Jahren lässt sich statistisch nicht belegen (Schuchardt et al. 2008). Unsicher erscheint auch der Beitrag durch die Ausbauten der Ästuar an diesen Daten.

Tab. 4 zeigt die Unsicherheiten über den mittel- und längerfristigen Fortgang des Meeresspiegelanstiegs sowie seine Auswirkungen auf das Tidehochwasser im Bereich der Deutschen Bucht. Es zeigt sich deutlich, dass es zu einer bereits beobachteten und/oder zu einer sehr wahrscheinlich zu erwartenden Beschleunigung des im vergangenen Jahrhundert beobachteten säkularen Anstiegs von 25 cm pro Jahrhundert gekommen ist. Verstärkt wird diese Beschleunigung durch die sich deutlich abzeichnende Erhöhung der Beiträge der globalen Gletscherschmelze zum Meeresspiegelanstieg. So weist auch das IPCC (2007) ausdrücklich auf die verbleibenden Unsicherheiten in der Kenntnis des zukünftigen Meeresspiegelanstiegs hin und benennt diesbezüglich insbesondere das zukünftige Verhalten der Eis- und Gletschermassen, so dass die von ihnen angegebenen Werte keinesfalls als Obergrenzen des Meeresspiegelanstiegs zu verstehen sind.

5.1.3 Gezeiten und Sturmfluten

Von großer Bedeutung für ästuarine Prozesse ist außer der Lage des (rechnerischen) mittleren Meeresspiegels die bisherige und zukünftige Veränderung der Gezeiten, da sie Strömungen und Wasseraustausch an der Küste, im Wattenmeer und insbesondere in den Ästuaren bedingen. IPCC macht hierzu nur sehr allgemeine, die Regionalmodelle keine Aussagen. Grundsätzlich muss davon ausgegangen werden, dass die küstennahe Tidewelle mit zunehmender Wassertiefe weniger Energie durch Bodenreibung verliert, also mit größerer Energie in die Flachwasserzonen und Ästuare eindringt und dort einen größeren **Tidehub** erzeugt. Dieser Prozess ist z.B. bei allen neueren Vertiefungen von Unterelbe und Unterweser vorhergesagt worden und auch eingetreten (Schuchardt et al. 2008). Die Auswertungen von Jensen & Mudersbach (2007) belegen, dass sich der Trend der Zunahme des Tidehubs an der Deutschen Nordseeküste (6 Pegel) seit den 1960er Jahren erheblich beschleunigt hat: von 18,1 cm/Jahrhundert (1857-2005) auf 57,1 cm/Jahrhundert (1950-2005). Diese Zunahme beruht vor allem auf dem Anstieg des MThw um 22 cm seit 1950, während das MTnw in der gleichen Zeit um 9 cm abgesunken ist. Diesen Trend zeigt auch der außerhalb des unmittelbaren Küstenumfeldes liegende Helgoländer Pegel: Nach Jensen & Mudersbach (2004) stieg der MThb-Trend von 19,8 cm/Jahrhundert (1925-2001) auf 34,3 cm/Jahrhundert (1965-2001), wobei allerdings der Beitrag des Ausbaus der Ästuare an diesen Veränderungen unklar bleibt.

Die bereits seit mehr als 50 Jahren ablaufenden Veränderungen der hydrodynamischen Eigenschaften der Nordsee verdeutlichen die Analysen der Zeitreihen des mittleren **Tidehochwassers**. Jensen & Mudersbach (2007) konnten auch hier zeigen, dass der langfristige Trend des MThw-Anstiegs im Bereich der deutschen Küstenlinie 23,5 cm/Jahrhundert betrug und damit dem globalen Trend von 14 cm (IPCC 2007) zuzüglich 10 cm als Folge des regionalen Absinkens der Deutschen Küste folgt. Global wie auch in den Statistiken von der Deutschen Küste setzt Mitte des 20. Jahrhunderts eine signifikante Trendbeschleunigung ein, die global ab den 1990er Jahren 31 cm/Jahrhundert und in den 1950er Jahren an der Küste 40 cm/Jahrhundert erreichte. Diesen Trend zeigt auch die küstenfernere Nordsee am Pegel Helgoland mit einer Trendbeschleunigung für das MThw von 18,4 cm/Jahrhundert (1925-2001) auf 23,7 cm/Jahrhundert (1965-2001)(Jensen & Mudersbach 2004).

Die Nordsee weist jedoch durch die Anregung vom Nordatlantik und 2 bis 3 eigene Schwingungssysteme ein sehr komplexes Tideverhalten auf, so dass die beobachteten Phänomene noch nicht vollständig befriedigend erklärt werden können und z.T. kontrovers diskutiert werden. Infolge des geringen Gefälles im Weserästuar setzt sich ein weiterer Anstieg des küstennahen Meeresspiegels nach Grabemann et al. (2007) in den Flussunterläufen nahezu unverändert fort.

Die zukünftige Entwicklung der **Sturmfluten** bezüglich der Häufigkeit bestimmter Wasserstände und der Höhe von Extremwerten ist nur sehr eingeschränkt abzuschätzen. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass ein gleich großer Sturmflut erzeugender Impuls bei höherem Tidehochwasser (s.o.) entsprechend höhere Sturmflutwasserstände bewirkt. Wittig et al. (2007) errechnen für das KLIMU-Klimaszenario (s. Kap. 6.1), dass eine Sturmflut, die das MThw um

2,5m übersteigt, in Bremerhaven um den Faktor 2,6 bis 3,0 häufiger eintritt als heute, wobei diese Entwicklung abhängig von der zukünftigen Topografie im Küstenvorfeld ist. Der Anstieg des MThw an der Küste wird durch die Ästuarbauten stromaufwärts verstärkt; die Schließung der Sturmflutsperrwerke an den Nebenflüssen und die Verluste von Überschwemmungsflächen erhöhen die Sturmflutwasserstände bei gleichen Randbedingungen zusätzlich (Schirmer 2005). Es ist allerdings festzuhalten, dass es gegenwärtig zwar eine Tendenz zur Zunahme, aber noch keine statistisch abgesicherten Befunde im Bereich der Nordseeküste gibt. Grossmann et al. (2007) erwarten erst ab Mitte dieses Jahrhunderts einen relevanten, die Sturmfluten erhöhenden Klimaeffekt. Auf Basis der A2- und B2-Szenarien errechnen sie für 2030 eine Erhöhung der Sturmflutspitze in Hamburg-St. Pauli um 18 ± 5 cm und für 2080 um 63 cm (48 bis 82 cm). Es zeigt sich hier die weitere Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs und die ab Mitte des Jahrhunderts zu erwartende Erhöhung der Windgeschwindigkeiten.

Bisher herrscht allerdings noch große wissenschaftliche Unsicherheit darüber, wie sich der Klimawandel auf die Windgeschwindigkeiten und auf die Häufigkeit von Stürmen in Europa auswirken wird (Schirmer & Wittig 2007). Eine Zunahme der Anzahl der Winterstürme und von Tagen mit extrem hohen Windgeschwindigkeiten sowie höheren maximalen Windgeschwindigkeiten erscheinen jedoch wahrscheinlich (Nds. MUK 2009).

5.1.4 Niederschlag und Abfluss

Nach den REMO-Modellergebnissen wird es im Sommer in weiten Teilen Deutschlands weniger Niederschläge geben. Im Winter werden im Süden und Südosten mehr Niederschläge fallen – allerdings wegen der gestiegenen Temperaturen weniger Schnee (UBA 2006).

In den Berechnungen der WETTREG-Modells ergibt sich bei den Niederschlägen ein weniger einheitliches Bild mit deutlichen regionalen Unterschieden: Beispielsweise werden für das ohnehin schon trockene norddeutsche Tiefland bis zu 50% weniger Niederschläge berechnet. In den Gebirgsregionen dürften dagegen vor allem im Winter die Niederschläge im Mittel zunehmen (UBA 2007).

Die mittlere jährliche Niederschlagssumme in Niedersachsen und die räumliche Verteilung der Niederschlagshöhen würden sich unter Berücksichtigung des A1B-Emissionszenarios im regionalen Klimamodell CLM beim Vergleich der Perioden 1961-1990 mit 2071-2100 nicht besonders stark verändern. Lediglich im Küstenbereich, im Bergland und im Harz ist mit einem Anstieg zwischen 5 bis 10% zu rechnen. Viel wichtiger aber sind die Veränderungen der saisonalen Verteilung des Niederschlags. Während im Sommer – und damit in der Vegetationszeit – ausgeprägte Rückgänge zu verzeichnen sind, würde es im Winter zu erhöhten Niederschlägen kommen, so dass die jährlichen Niederschlagssummen trotz zunehmender sommerlicher Trockenheit steigen könnten. Mit der Zunahme der winterlichen Niederschläge könnte sich auch das Hochwasser- und Überschwemmungsrisiko erhöhen (Nds. MUK 2009; s.u.).

Aufgrund steigender Temperaturen, die zu einer Minderung des Schneefallanteils am

Gesamtniederschlag und zu einem schnelleren Abschmelzen führen, wird sich bundesweit bis zum Ende des 21. Jahrhunderts die Schneebedeckungsperiode um 20-40 Tage verkürzen. Im niedersächsischen Flachland kann daher nach Nds. MUK (2009) die mittlere Zahl der Schneetage auf Null sinken. Ein verändertes Abschmelzverhalten kann zusätzlich das Hochwasserrisiko erhöhen.

Die Zahl der Tage mit Niederschlägen von mehr als 20 mm liegt in der Periode 1961 bis 1990 in Niedersachsen durchschnittlich bei 5-10, im Harz jedoch deutlich höher. Im Küstenbereich, im Bereich der westlichen Geestgebiete, im Osnabrücker Hügelland, im Weser-Leine-Bergland und im Harz kommt es zu leichten Anstiegen um 2-3 Tage im Jahr. Davon sind überwiegend die Wintermonate betroffen. Im Sommer könnten bis zu 25% weniger Niederschläge fallen.

Das Weserästuar unterliegt neben den Klimafolgen durch Meeresspiegelanstieg und Tidehuberhöhung auch den landseitigen Folgen des Klimawandels. Hier ist vor allem die Veränderung der Abflüsse aus dem Wesereinzugsgebiet zu betrachten, die ihrerseits von den zukünftigen Niederschlags-/Abflussbedingungen abhängen. Hierzu prognostizieren sowohl die globalen Modelle für die gemäßigten nördlichen Breiten als auch die regionalisierten Modellrechnungen für Norddeutschland übereinstimmend einen Anstieg der mittleren Sommertemperaturen um 2,5 bis 3,5°C sowie einen Anstieg der mittleren Wintertemperaturen um 3 bis 4°C für das A1B-Szenario bis 2100 (s. Kap. 5.1.1) sowie eine Veränderung der mittleren Sommerniederschläge um +5 bis -30% sowie der mittleren Winterniederschläge um -5 bis +30% für das A1B-Szenario (MPI-M 2007). Bis 2050 kann mit der Hälfte der Veränderungen gerechnet werden. Für die Süßwasserzufuhr in die norddeutschen Ästuare (Oberwasser) bedeutet dies für das Sommerhalbjahr infolge der Zunahme der Evapotranspiration eine u.U. deutliche Abnahme, während im Winterhalbjahr eine Zunahme mit längeren Hochwasserphasen sicher zu erwarten ist. Zu gleichen Tendenzen kommen Maniak et al. (2005) für das KLIMU-Klimaszenario (s. Kap. 6.1), für das sie eine Abnahme des Abflusses um etwa 10% im Spätsommer errechnen und eine Zunahme der Jahressumme des Oberwasserzuflusses um 8% für ein trockenes und 11% für ein feuchtes Jahr. Daraus wiederum resultiert im Prinzip im Sommer eine Verlagerung der Brackwasserzone stromauf mit einer Zunahme der Flut- und Ebbwege, im Winter dagegen eine seewärtige Verlagerung, die dem Meeresspiegelanstieg entgegenwirkt, mit einer Verringerung der Tidewege (Schuchardt & Schirmer 2005, Schuchardt et al. 2008).

5.1.5 Extremereignisse

Extremwetterereignisse zeichnen sich durch eine kurzzeitige, aber sehr starke Abweichung der Werte von den klimatischen Mittelwerten in einer Region aus. Dieses sind z.B. auch für Niedersachsen und die Metropolregion Hitzewellen, Trockenperioden, Starkniederschläge und Stürme. Im Vergleich zu den schleichenden Veränderungen verursachen sie schon heute häufig große Schäden und können gravierende Folgen für Menschen und Umwelt haben. Da es sich um Ereignisse handelt, die aus einer Kombination von globalen und lokalen Faktoren resultieren, ist eine Abschätzung der zukünftigen Häufigkeit und Stärke noch vergleichsweise unsicher (Nds. MUK 2009, Jonas et al. 2005).

Allerdings wird sich nach IPCC (2007) der Klimawandel auch auf die Intensität von Extremereignissen auswirken. Vergleiche verschiedener regionaler Klimamodellrechnungen bestätigen, dass schon geringe Änderungen des mittleren Klimas oder der Klimavariabilität große Veränderungen in der Häufigkeit von Extremereignissen verursachen können (Schönwiese & Janoschitz 2008). So lassen die zukünftig erhöhten mittleren Sommertemperaturen in Verbindung mit reduzierten sommerlichen Niederschlägen das häufigere Auftreten von Hitzewellen und Dürren wahrscheinlich erscheinen, die zusätzlich auch länger dauern könnten. Dabei kann es im Jahresmittel weniger Frosttage sowie mehr heiße Tage und mehr Tropennächte geben (UBA 2007). Letztendlich kann eine mögliche erhöhte Variabilität im Wetter- und Klimageschehen mit z.B. weiterhin vorkommenden Spät- und Frühfrösten sowie Temperaturstürzen zu nachteiligen Auswirkungen auf Ökosysteme und Gesellschaft führen (Schuchardt et al. 2008).

Mit zunehmender und regional unterschiedlicher atmosphärischer Erwärmung der Luft, die dann mehr Wasserdampf aufnehmen kann, kommt es zu einer Intensivierung des Wasserkreislaufs (Jacob 1998). Für die sommerlichen Niederschläge wird daher projiziert, dass einerseits die mittleren Niederschläge bis zu 30% abnehmen (s. Kap. 5.1.4), andererseits aber die Intensität von Starkregenereignissen zunimmt. Das bedeutet, dass die vergleichsweise geringeren Niederschlagsmengen in sehr kurzer Zeit fallen könnten und gleichzeitig die Zahl der Regentage abnimmt (UBA 2006).

Für Norddeutschland wird es als wahrscheinlich erachtet, dass insbesondere die Stärke der nördlichen und westlichen Winterstürme zunimmt (Meinke 2007). Die Windgeschwindigkeiten könnten sich im Winter um ca. 10% erhöhen, während sie im Sommer eher abnehmen könnten. Beim Wind sind die Erkenntnisse jedoch noch recht uneinheitlich, so dass hier eine allgemeine Charakterisierung nur unter Vorbehalt zu treffen ist. Tendenziell nehmen nach Jonas et al. (2005) die Häufigkeiten extremer täglicher Windmaxima im Winter zu und im Sommer ab. Dies gilt jedoch nicht für küstennahe Stationen, wo auch im Winter oft negative Trends extremer Tagesmaxima beobachtet wurden. Insgesamt zeigen die regionalen Klimaprojektionen für die Sturmintensität und für die Veränderungen des Winds noch keine belastbaren Ergebnisse und ob diese Entwicklungen heute schon nachweisbar sind, wird noch kontrovers diskutiert (Storch et al. 1997, 2005). Nach Nds. MUK (2009) kann künftig mit einem Anstieg der Anzahl der Tage mit hohen Windgeschwindigkeiten um 50% gerechnet werden und bei der Anzahl von Sturmfluten sogar von 50-100%.

6. Klimaszenarien für ‚nordwest2050‘

Die in den regionalen Klimaprojektionen (s. Kap. 5.1) formulierten Veränderungen der klimatischen Parameter werden im 2. Teil „Randbedingungen und Beschreibung“ zu zwei ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien verdichtet. Im Folgenden werden einige Anmerkungen zum Umgang mit Klimaszenarien in der Klimafolgenforschung gegeben und dafür die Erstellung und

die Annahmen des sog. „KLIMU-Klimaszenarios“ dargestellt. Anschließend wird der Abstimmungsprozess für die ‚nordwest2050‘ -Szenarien erläutert.

Die vom IPCC berücksichtigten globalen Klimamodelle und die darin eingebetteten Regionalmodelle entsprechen alle dem sich ständig weiter entwickelnden Stand der Wissenschaft und die resultierenden Projektionen können noch nicht als „falsch“ oder „richtig“ klassifiziert werden. Dieses gilt noch viel stärker für die Prognosen über die zukünftigen Emissionen von Treibhausgasen und führt insgesamt dazu, dass die daraus generierten Klimaprojektionen nahezu „gleich wahrscheinlich“ sind und es keine wissenschaftliche Grundlage dafür gibt, z.B. einen mittleren Wert der Temperaturzunahme oder des Meeresspiegelanstiegs für den wahrscheinlichsten oder sogar richtigen zu halten (Schirmer 2005). Als Konsequenz bedeutet das, dass die Klimafolgen- und Anpassungsforschung nicht auf eindeutige Klimavorhersagen warten darf (die es voraussichtlich auch nicht geben wird), sondern aus der Spannweite der aus heutiger Sicht als möglich erachteten Entwicklungen für die Analysen der Klimafolgen und Anpassungsbedarfe eine Auswahl treffen muss.

Die „Übersetzung“ der globalen Klimaprojektionen mit ihren noch immer erheblichen Unsicherheiten in regional bezogene und saisonal differenzierte Aussagen erfordert neben dem Verständnis der grundlegenden klimatischen Prozesse also auch zum Teil eine Festlegung auf eine bestimmte Projektion aus einem ausgewählten Emissionsszenario oder Regionalmodell. Ohne diesen ist Klimafolgenforschung nicht durchführbar, insbesondere dann nicht, wenn mehrere Klimaparameter samt ihren prognostischen Unsicherheiten miteinander in Wechselwirkung stehen, wie es z.B. für Temperatur und Niederschlag bezüglich Grundwasserneubildung oder Bodenfeuchte gilt. Die stetige Verbesserung der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Projektionen erlaubt jedoch zunehmend „härtere“ und komplexere Aussagen über die Folgen des Klimawandels.

6.1 Exkurs 2: Das KLIMU-Klimaszenario

In den beiden Klimafolgenforschungsprojekten „Klimaänderung und Unterweserregion“ (KLIMU: <http://www.klimu.uni-bremen.de>; s.a. Schuchardt & Schirmer 2005) und „Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste“ (KRIM: <http://www.krim.uni-bremen.de>; s.a. Schuchardt & Schirmer 2007) ist für die Analysen der Klimafolgen ein Klimaszenario definiert und verwendet worden: das sog. KLIMU-Klimaszenario.

Die Definition eines zukünftigen Klimazustandes im Rahmen des KLIMU-Projekts musste einerseits der wissenschaftlichen Unsicherheit über Ausmaß und Geschwindigkeit des sich abzeichnenden Klimawandels Rechnung tragen und andererseits ausreichend prägnant sein, um die klimawandelbedingte Sensitivität der zu untersuchenden Unterweserregion zu indizieren (Schirmer 2005). Mangels geeigneter Regionalprognosen wurde im Projektantrag von 1996 zunächst ein als pessimistisch einzustufendes Klimaszenario für das Jahr 2050 beschrieben, welches als Grundlage den im 2. Sachstandsbericht des IPCC (1996) dargestellten für möglich erachteten „worst case“-Klimawandel und seine Folgen für den Meeresspiegelanstieg hatte.

Im Jahr 1998 konnte dieses Szenario durch die Arbeitsgruppe v. Storch im Rahmen des BMBF-Vorhabens „Szenarien & Beratung: Anwenderorientierte Szenarien für den norddeutschen Küstenbereich“ für die beiden genannten Projekte weitgehend bestätigt und bezüglich Atmosphärentemperaturen, Niederschlägen und Windstärken saisonal differenziert werden (Storch et al. 1998). Im Rahmen dieses Vorhabens wurden mit dem Klimamodell ECHAM4/OPYC3 des MPI für Meteorologie, basierend auf dem Bezugszeitraum 1961 bis 1990, Modellrechnungen bis 2100 durchgeführt, wobei das IPCC-Szenario IS92a mit einer Verdoppelung der atmosphärischen CO₂-Konzentration (s. Kap. 4) zugrunde gelegt wurde. Für die Regionalisierung (Downscaling) der Modellierungsergebnisse auf Bremen und Bremerhaven wurden die monatlichen Modellergebnisse des Luftdrucks auf Meereshöhe und der bodennahen Lufttemperatur herausgezogen und als Eingangsgrößen für die Ableitung des regionalen Klimas verwendet. Dieses wiederum ergab sich aus der statistischen Analyse der regionalen Wetterverhältnisse im Zeitraum 1961 bis 1990 und ihrer Abhängigkeiten von Lufttemperatur und Luftdruck.

In der Tab. 5 sind die Änderungen verschiedener Klimaparameter des regionalisierten KLIMU-Klimaszenarios für 2050 zusammengestellt. Da der Schwerpunkt der Klimafolgenanalyse auf der Auswertung einer möglichen kräftigen Klimaänderung lag, wurden die von Storch et al. (1998) errechneten Änderungen von Temperatur, Niederschlag, Wind und sturmbedingten Wasserstandsanomalien (= Sturmfluten) übernommen und mit den Annahmen des ursprünglichen KLIMU-Szenarios von 1996 über den Meeresspiegelanstieg und eine Zunahme des Tidehubs kombiniert.

Der für das Jahr 2050 angenommene Anstieg des Meeresspiegels setzt sich zusammen aus einer regionalen Komponente von +15 cm und einer globalen Komponente von +40 cm (verstärkte thermische Ausdehnung der Ozeane und beschleunigte Gletscherschmelzen: s. Kap. 4.1.2). Die regionale Komponente entspricht der Hälfte des in den vergangenen Jahrhunderten an der niedersächsischen Nordseeküste beobachteten nacheiszeitlichen säkularen Meeresspiegelanstiegs von gegenwärtig etwa 30 cm pro 100 Jahren (Pegel Norderney Riffgat 1895 bis 1995; Schirmer 2005, Jensen & Mudersbach 2007), der sich aus einer tektonischen Landsenkung um 12 bis 15 cm und einem Meeresspiegelanstieg von global 15 bis 18 cm zusammensetzt. Die im KLIMU-Klimaszenario zusätzlich angenommene Vergrößerung des Tidehubs um 30 cm ist eine Folge der geringeren Reibungsverluste in der durch den Meeresspiegelanstieg tiefer gewordenen Nordsee; nach Hofstede (1994) ein bereits heute zu beobachtender Effekt.

Tabelle 4: Das KLIMU-Klimaszenario für das Jahr 2050 (* = Werte liegen nach Quartalen differenziert vor) (Schirmer 2005).

Parameter	Veränderung gegenüber 1961-1990
Meeresspiegel	+ 55 cm (15 säkular; 40 Klimawandel)
Mittlerer Tidehub	+ 30 cm (MThw + 15 cm; MTnw - 15 cm)
Wind (Dez/Jan/Feb)*	+ 7% (verstärkt aus NW bis N)
Temperatur atmosphärisch*	+ 2,7°C
Niederschlag*	+ 10%

Die nach Quartalen differenzierten Parameter Temperatur und Niederschlag zeigten, dass es insbesondere in den Quartalen Dezember/Januar/Februar und März/April/Mai zu relativ stärkeren Temperaturerhöhungen kommt. Es muss also zukünftig v.a. mit wärmeren Wintern und Frühjahren gerechnet werden. Im Jahresmittel könnte sich die bodennahe Lufttemperatur um 2,7°C erhöhen (s. Tab. 5). Die aus der regionalen Klimaberechnung abgeleitete jährliche Niederschlagsverteilung zeigte, dass es im Quartal März/April/Mai zu deutlich erhöhten Niederschlägen kommt, während im Quartal Juni/Juli/August die Niederschlagsmengen wahrscheinlich abnehmen. Das bedeutet, dass in Zukunft mit feuchteren Wintern und trockeneren Sommern zu rechnen ist. In der Jahressumme erhöht sich die Niederschlagssumme um ca. 10% (s. Tab. 5; im Teil 2 werden die Klimaszenarien aus KLIMU und ‚nordwest2050‘ verglichen).

6.2 Abstimmung der Anforderungen an die ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien

Die für die Analysen im Projekt notwendige weitere Konkretisierung der Anforderungen an die ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien erfolgte in enger Abstimmung mit allen an den Vulnerabilitätsanalysen (VA) beteiligten Arbeitsgruppen auf der Basis der im Juni 2009 in einem Arbeitspapier von BioConsult zusammengestellten Informationen (der vorliegende Bericht ist eine überarbeitete und aktualisierte Version des Arbeitspapiers vom 29. Juni 2009: s. Basecamp). Hierzu ist als erster Schritt zusammengestellt worden, welche Parameter aus den regionalen Klimamodellen in welcher zeitlichen und räumlichen Auflösung zur Analyse der klimabezogenen Vulnerabilitäten vorhanden sind. Auf der Basis dieser Zusammenstellung sind dann von den Clustern „Wünsche“ bezüglich der benötigten Parameter und ihres Detaillierungsgrads geäußert worden (die sog. „Wunschliste“: s. Tab. 6 in Kap. 8).

Anschließend ist diese „Wunschliste“ hinsichtlich Verfügbarkeit und Bearbeitbarkeit mit der Service Gruppe Anpassung (SGA) gemeinsam geprüft worden. Die daraus resultierenden Klimaparameterlisten sind die Grundlage für die lieferbaren bzw. zu liefernden Klimarohdatensätze aus der CERA-Datenbank, die anschließend statistisch ausgewertet werden und Inputdaten für die Klimawirkmodelle sind (s. Tab. 7 und Tab. 8 in Kap. 8). Folgende Informationen über die Regionalmodelle sind Grundlage der gemeinsamen Abstimmung gewesen:

CLM (Datenstrom (DS) 2 und 3): horizontale Auflösung 0,165° (~ 18 km, DS 2) und 0,2° (~ 20 km, DS 3); Ausgabeintervalle 1h, 3h und 24h (abhängig vom Parameter); zweidimensionale bodennahe Felder, dreidimensionale Boden- und Atmosphärenfelder; 6 Drucklevel (200, 500, 700, 850, 925 und 1000 hPa); 10 Bodenschichten (weitere Informationen auch unter: <http://www.mad.zmaw.de> s.a. Tab. 3).

REMO (DS 2 und 3): horizontale Auflösung 0,088° (~ 8 km, DS 2) und 0,1° (~ 10 km, DS 3); Ausgabeintervall 1h und 24h (abhängig vom Parameter); zweidimensionale bodennahe Felder, dreidimensionale Boden- und Atmosphärenfelder; 3 Drucklevel (200, 500 und 850 hPa); 5 Bodenschichten (max. 10 m Tiefe) (weitere Informationen auch unter: <http://www.mpimet.mpg.de>; s.a. Tab. 3).

Verfügbare **Parameter** der beiden dynamischen Modelle CLM und REMO sind z.B. (s.a. Kap. 8): Temperatur (2m, Min, Max), Wind (u- und v-Komponente, max. Böenwindgeschwindigkeit), Gesamtniederschlag, Schneefall, Bedeckungsgrad, Strahlung (kurzwellig, langwellig, photosynthetisch aktiv), Sonnenscheindauer; Datenstrom 3 zusätzlich: Mittelwerte verschiedener Parameter (täglich, monatlich, jährlich), akkumulierte Summen (täglich, monatlich, jährlich), Klimakennzahlen bzw. -tage (Frosttage, Sommertage, tropische Nächte, Eistage, Tage mit geringem, mäßigem, starkem Niederschlag, Tage mit gefrorenem Boden, Tage mit Schneefall, Tage mit Schneedecke).

Verfügbare **Parameter** für das Regionalmodell WETTREG sind: Maximum der Temperatur, Tagesmittel der Temperatur, Minimum der Temperatur, Tagessumme des Niederschlages, Tagesmittel der relativen Feuchte, Tagesmittel des Luftdrucks, Tagesmittel des Dampfdrucks, Tagessumme der Sonnenscheindauer, Tagesmittel des Bedeckungsgrades, Tagesmittel der Windstärke. Die Modellergebnisse liegen für Stationen, an denen Messreihen zur Verfügung stehen, vor. Eingangsdaten sind meteorologische Daten von 282 Klimastationen und 1695 Niederschlagsstationen; an jeder Station werden pro Dekade 10 Zeitreihen zu 7300 Tagen Länge erzeugt (weitere Informationen auch unter: <http://www.cec-potsdam.de>; s.a. Tab. 3)

Da die Klimarohdaten am Projektbeginn noch nicht zur Verfügung standen, die Workshops mit den Praxispartnern und ein Teil der Analysen aber schon Angaben bezüglich der möglichen Klimaveränderungen benötigten, sind zusätzlich in einer weiteren Liste Internetquellen mit schon verfügbaren Klimadatenauswertungen wie v.a. Karten aufgeführt (siehe Anhang im Teil 2).

Neben den in den regionalen Klimamodellen berechneten Parametern Temperatur, Niederschlag usw. müssen in den ‚nordwest2050‘-Szenarien auch solche Parameter bearbeitet werden, für die die Downscaling-Modelle (bisher) keine Ergebnisse liefern, die aber für die Region relevant sind. Dieses sind u.a. der regionaler Meeresspiegelanstieg oder Veränderung des Tidehubs, steigende Wassertemperaturen usw. (weitere Details in Teil 2). Hier bestand auch weiterer Konkretisierungsbedarf für die Anforderungen aus den in den Clustern betriebenen Modellen. Im Bereich der regionalen Vulnerabilitätsanalyse wird ein Niederschlagsabflussmodell betrieben, in dem anhand veränderter meteorologischer Eingangsgrößen wasserwirtschaftliche Aspekte modelliert werden sollen.

Literatur

- Grossmann, I., K. Woth & H. von Storch (2007): Localization of global climate change: Storm surge scenarios for Hamburg in 2030 and 2085. *Die Küste* 71, S. 169-182
- Hofstede, J. (1994): Meeresspiegelanstieg und Auswirkungen im Bereich des Wattenmeeres. In: J. L. Losán, E. Rachor, K. Reise, H. v. Westernhagen & W. Lenz (Hrsg.): Warnsignale aus dem Wattenmeer. Blackwell, Berlin, S. 17-23
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (1996) *Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Houghton JT, Meira Filho LG, Callander BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell K (eds) Cambridge University Press
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2000): *Special Report on Emissions Scenarios (SRES).* Nakicenovic, N., Swart, R. (eds): Cambridge University Press [<http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.htm>, 03.06.2009]
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2001): *Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguera M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA (eds). Cambridge University Press
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): *Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger.* In: *Klimaänderung 2007 - Auswirkungen, Anpassung, Verwundbarkeiten. Beitrag der Arbeitsgruppe II zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC),* M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, C.E. Hanson and P.J. van der Linden, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 22 S. [<http://www.de-ipcc.de>, 03.06.2009]
- Jacob, D. (1998): Intensivierung des Wasserkreislaufs? In: J. L. Lozán, H. Graßl & P. Hupfer (Hrsg.): *Warnsignale Klima. Wissenschaftliche Auswertungen,* Hamburg, S. 177-178
- Jacob, D., H. Göttel, S. Kotlarski, P. Lorenz & K. Sieck (2008): *Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 204 41 138,* *Climate Change* 11/08, Umweltbundesamt, 159 S.
- Jensen, J. & C. Mudersbach (2004): Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. In: Gönner, G., H. Graßl, D. Kellert, H. Kunz, B. Probst, H. von Storch & J. Sündermann (Hrsg.): *Klimaänderung und Küstenschutz. Tagungsband der Tagung „Klimaänderung und Küstenschutz,* 29./30.11.2004, Hamburg, S. 115-128

- Jensen, J. & C. Mudersbach (2007): Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. Ber. z. dt. Landeskunde Bd. 81, Heft 2, S. 99-112
- Jonas, M., T. Staeger & C.-D. Schönwiese (2005): Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen - Schwerpunkt Deutschland. Climate Change, 07/05, Forschungsbericht 201 41 254, Umweltbundesamt, 251 S.
- Mahrenholz, P. (2007): Regionale Klimaszenarien und der Umgang mit ihnen inhärenten Unsicherheiten. KLIWA - Fachgespräch Regionale Klimaszenarien, Präsentation, 26. Februar 2007 [www.kliwa.de/download/fg2007/Mahrenholz_0207.pdf, 19.06.2009]
- Maniak, U., A. Weirauch & G. Riedel (2005): Die wasserwirtschaftliche Situation in der Unterwesermarsch unter der Einwirkung einer Klimaänderung. In: Schuchardt, B. & M. Schirmer (Hrsg.): Klimawandel und Küste. Die Zukunft der Unterweserregion. Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, S. 79-102
- Meinke, I. (2007): Klimawandel in Norddeutschland – ein Überblick. Vortrag im Rahmen einer Klimaveranstaltung der Insel- und Hallig Konferenz, Dagebüll, 13. Juni 2007. [<http://www.norddeutsches-klimabuero.de/aktuelles.html>, 04.04.2008]
- MPI-M – Max-Planck-Institut für Meteorologie (2007): The Regional Model - REMO. [http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/staff/pfeifersusanne/REMO_UBA/aktualisiert/gross/A1B_2071-2100-1961-1990_seask_167_30_Jahre_1_gross.jpg, 11.03.2008]
- Nds. MUK – Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz (2009): Der Klimawandel als Herausforderung für Staat und Gesellschaft - Struktur für eine Anpassungsstrategie. 2. Auflage, März 2009, 21 S. [<http://www.umwelt.niedersachsen.de>, 10.06.2009]
- Rahmstorf, S. & K. Richardson (2007): Wie bedroht sind die Ozeane? Fischer Verlag: 224 S.
- Rahmstorf, S. (2007): A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise. Science, Vol. 315, S. 368-370
- Schirmer, M. & S. Wittig (2007): Auswirkungen des Klimawandels auf Natur und Gesellschaft in der Unterweserregion. Sustainability Center Bremen (SCB), Werkstattberichte, Nr. 1, Oktober 2007, im Rahmen des Projekts „KlimaWandel Unterweser“, 68 S. [<http://www.klimawandel-unterweser.ecolo-bremen.de/>, 03.06.2009]
- Schirmer, M. (2005): Das Klimaszenario der Fallstudie „Klimaänderung und Unterweserregion“ (KLIMU). In: Schuchardt, B. & M. Schirmer (Hrsg.): Klimawandel und Küste. Die Zukunft der Unterweserregion. Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, S. 50-56

- Schirmer, M., W. Elsner, S. Mai & S. Wittig (2007): Szenarien als methodischer Ansatz im Verbund-vorhaben KRIM. In: Schuchardt, B. & M. Schirmer (Hrsg.): Land unter? Klimawandel, Küstenschutz und Risikomanagement in Nordwestdeutschland: die Perspektive 2050. oekom-Verlag, München, S 59-73
- Schönwiese, C.-D. & R. Janoschitz (2008): Klima-Trendatlas Europa 1901-2000. Berichte des Instituts für Atmosphäre und Umwelt der Universität Frankfurt/Main, Nr. 7, 82 S.
- Schuchardt, B. & M. Schirmer (2005, Hrsg.): Klimawandel und Küste. Die Zukunft der Unterweserregion. Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 341 S.
- Schuchardt, B. & M. Schirmer (2007, Hrsg.): Land unter? Klimawandel, Küstenschutz und Risikomanagement in Nordwestdeutschland: die Perspektive 2050. oekom-Verlag, München, 243 S.
- Schuchardt, B., S. Wittig, M. Schirmer (2008): Klimawandel und Ästuar - Perspektiven für den Naturschutz. Studie für den WWF Deutschland, Frankfurt am Main, 70 S.
- Storch, H. von, H. Reichardt & A. Pfizenmayer (1997): Auswirkungen von Klimaänderungen auf Sturmentwicklung und Extremwasserstände in der Nordsee. BMBF-Projekt, Förderkennzeichen 03F0141B [<http://w3g.gkss.de/G/Mitarbeiter/storch/storm.surges.html>, 20.08.2001]
- Storch, H. von, M. Montoya, F. J. González-Rouco & K. Woth (2005): Projektionen für Meere und Küsten. Beitrag in Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft: Wetterkatastrophen und Klimawandel. Sind wir noch zu retten? Eigenverlag Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, S. 107-113
- Storch, H. von, R. Schnur & E. Zorita (1998): Szenarien & Beratung. Anwenderorientierte Szenarien für den norddeutschen Küstenbereich. Abschlussbericht. BMBF-Förderkennzeichen 01 LK 9510/0
- UBA – Umweltbundesamt (2006): Künftige Klimaänderungen in Deutschland – Regionale Projektionen für das 21. Jahrhundert. Hintergrundpapier in Zusammenarbeit mit Max-Planck-Institut für Meteorologie, April 2006, aktualisiert im September 2006, 7 S. [<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Klimaaenderungsworkshop.pdf>, 17.06.2009]
- UBA – Umweltbundesamt (2007): Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen. Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG. Hintergrundpapier, Januar 2007, 27 S. [<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Regionale-Klimaaenderungen.pdf>, 17.06.2009]

- UBA – Umweltbundesamt (2008): Kipp-Punkte im Klimasystem. Welche Gefahren drohen? Hintergrundpapier, Fachgebiet I 2.1, Juli 2008, 27 S. [<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/kipp-punkte.pdf>, 17.06.2009]
- UKCIP – United Kingdom Climate Impacts Programme (2008): The climate of the UK. [http://www.ukcip.org.uk/scenarios/ukcip02_extras/images/UKCIP02Extras_SLC_map_final.gif, 11.03.2008]
- Wittig, S., A. Elsner, W. Elsner, D.P. Eppel, I. Grabemann, H.-J. Grabemann, D. Kraft, S. Mai, V. Meyer, C. Otte, M. Schirmer, B. Schuchardt, I. Yu & C. Zimmermann (2007): Der beschleunigte Meeresspiegelanstieg und die Küstenschutzsysteme: Ergebnisse der erweiterten Risikoanalyse. In: Schuchardt, B. & M. Schirmer (Hrsg.): Land unter? Klimawandel, Küstenschutz und Risikomanagement in Nordwestdeutschland: die Perspektive 2050. oekom Verlag, S. 93-113

Anhang

Tabelle 5: „Wunschliste“ der benötigten Klimaparameter, die mit den an der Vulnerabilitätsanalyse beteiligten Teilprojekten bzw. Arbeitspaketen abgestimmt worden ist (1: Menschliche Gesundheit, 2: Bauwesen, 3: Wasserwirtschaft, Hochwasserschutz, 4: Küstenschutz, 5: Bodenschutz, 6: Biodiversität und Naturschutz, 7: Landwirtschaft, 8: Forstwirtschaft, 9: Fischerei, 10: Energiewirtschaft, 11: Finanzwirtschaft, Versicherungswirtschaft, 12: Verkehr, Verkehrsinfrastruktur, 13: Industrie und Gewerbe, 14: Tourismuswirtschaft, 15: Raum- und Regionalplanung, 16: Bevölkerungsschutz inkl. Katastrophenschutz)

Parametergruppe	Parameter	Region: Sektoren bzw. Handlungsbereiche	Energiewirtschaft	Ernährungswirtschaft	Wertschöpfungsketten	Hafenwirtschaft & Logistik
Temperatur	mittlere, max. und min. 2m-Temperatur (auch absolutes Minimum und Maximum)	1, 3, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 15	stündlich	5, 13	Mittel, min., max.	monatlich, jährlich
	Zahl der Tage mit Minimumtemperatur unter 0°C (Frosttage)	1, 6, 7, 12, 15		5, 13	ja	monatlich, jährlich
	Zahl der Tage mit Maximumtemperatur unter 0°C (Eistage)	1, 6, 7, 10, 12, 14, 15	monatlich	5, 13	ja	monatlich, jährlich
	Zahl der Tage mit Maximumtemperatur über 25°C (Sommertage)	1, 10, 14, 15, 16	monatlich	3, 5, 6, 7, 13	ja	monatlich, jährlich
	Zahl der Tage/Nächte mit Minimumtemperatur über 20°C (Tropennächte)	1, 8, 10, 12, 15, 16	monatlich	3, 5, 6, 7	ja	monatlich, jährlich
	Zahl der Tage mit Maximumtemperatur über 30°C (heißer Tag)	1, 8, 10, 12, 15, 16	monatlich	3, 5, 6, 7	ja	
	Hitzeperioden bzw. -wellen	1, 8, 10, 12, 15, 16	ja	3, 5, 6, 7		
	gefühlte Temperatur / thermisches Empfinden / thermophysiologische Beanspruchung	1, 14				
	Wassertemperatur (Flüsse, Seen, Nordsee)	6, 9, 10, 14	stündlich für Flüsse	5, 7		ja
Strahlung	Wolkenbedeckung	10, 14	stündlich	5, 6, 7		
	Sonnenscheindauer	10, 14	täglich	1, 3, 5, 6, 7		
Niederschlag	Gesamtniederschlag	3, 5, 6, 7, 8, 10	täglich		Tagessumme	
	Schneemenge	3, 10, 12	täglich	7		monatlich
	Zahl der Tage mit Schneefall (Schneetage)	10, 12, 14	ja	5, 6, 7	ja	ja
	Zahl der Tage mit Schneebedeckung	3, 10, 12, 14	ja	5, 6, 7, 12, 13		ja
	relative Luftfeuchtigkeit	1, 8, 10, 12	täglich	3, 7	Tagesmitte	ja

Parametergruppe	Parameter	Region: Sektoren bzw. Handlungsbereiche	Energiewirtschaft	Ernährungswirtschaft	Wertschöpfungsketten	Hafenwirtschaft & Logistik
	Trockenperioden	3, 6, 7, 8, 10, 15	ja	1, 3, 5, 6, 7, 13	ja	monatlich, jährlich
	Starkregenereignisse/-tage (Zahl der Tage mit Niederschlag mind. 20 mm/Tag)	1, 3, 5, 7, 10, 15, 16	ja	6	ja	monatlich, jährlich
	Trockentage (Zahl der Tage mit Niederschlag höchstens 1 mm/Tag)	3			ja	
	nasse Tage (Zahl der Tage mit Niederschlag mind. 10 mm/Tag)	3		5, 6, 7, 13	ja	
Wind	Windgeschwindigkeit	1, 10, 11, 12, 14, 15	stündlich		Tagesmittel	ja
	windstille Tage				ja	
	Sturmtage				ja	
	Sturmintensität: max. Windgeschwindigkeit	1, 4, 8, 10, 11, 12, 16	täglich		ja	ja
	mittlere Windrichtung	4				

Tabelle 6: Mit der Service Gruppe Anpassung (SGA) abgestimmte Anforderungsliste bezüglich der verfügbaren Klimaparameter aus der CERA-Datenbank (Climate and Environmental Retrieval and Archive) des World Data Center for Climate (WDCC): Parameter aus den regionalen Klimamodellen **CLM** und **REMO** für Emissionsszenario A1B, Lauf 1, DS 3; für die Metropolregion Bremen/Oldenburg mit folgenden räumlichen Koordinaten: CLM - longitudinal 7,8 bis 9 und latitudinal 52,6 bis 54; REMO - longitudinal 7,85 bis 8,95 und latitudinal 52,65 bis 53,95; Zeitraum von 1961 bis 2100.

Parameter	CLM	REMO
2m-Temperatur	3-stündl., täglich, monatl. und jährl.	stündl., täglich, monatl. und jährl.
2m-max. Temperatur	täglich	stündl., täglich, monatl.
2m-min. Temperatur	täglich	stündl., täglich, monatl.
Zahl der Tage mit Minimumtemperatur unter 0°C (Frosttage)	monatl. und jährl.	monatl. und jährl.
Zahl der Tage mit Maximumtemperatur unter 0°C (Eistage)	monatl. und jährl.	monatl. und jährl.
Zahl der Tage mit Maximumtemperatur über 25°C (Sommertage)	monatl. und jährl.	monatl. und jährl.
Zahl der Tage/Nächte mit Minimumtemperatur über 20°C (Tropennächte)	monatl. und jährl.	monatl. und jährl.
Wolkenbedeckung	3-stündl., täglich, monatl.	stündl., täglich, monatl.
Sonnenscheindauer	tägl., monatl., jährl.	-
photosynthetischaktive Strahlung	täglich und monatl.	-
Gesamtniederschlag	tägl., monatl. und jährl.	tägl., monatl. und jährl.
Schneemenge (Gesamtschnee)	tägl., monatl. und jährl.	-
Zahl der Tage mit Schneefall	monatl. und jährl.	monatl. und jährl.
Zahl der Tage mit Schneebedeckung	monatl. und jährl.	monatl. und jährl.
relative Luftfeuchtigkeit	3-stündl.	stündl., täglich
Verdunstung (Evaporation)	tägl., monatl. und jährl.	tägl., monatl. und jährl.
Zahl der Tage mit Niederschlag höchstens 1 kg/m ² (1 mm/Tag)	monatl. und jährl.	monatl. und jährl.
Zahl der Tage mit Niederschlag mindestens 10 kg/m ² (10 mm/Tag)	monatl. und jährl.	monatl. und jährl.
Zahl der Tage mit Niederschlag mindestens 20 kg/m ² (20 mm/Tag)	monatl. und jährl.	monatl. und jährl.
Windgeschwindigkeit (m/s)	stündl., tägl., monatl. und jährl.	stündl., tägl., monatl. und jährl.
Windrichtung	stündl.	stündl.

Tabelle 7: Mit der Service Gruppe Anpassung (SGA) abgestimmte Anforderungsliste bezüglich der lieferbaren Klimaparameter aus der CERA-Datenbank (Climate and Environmental Retrieval and Archive) des World Data Center for Climate (WDCC): Parameter aus dem regionalen Klimamodell WETTREG für Emissionsszenario A1B, alle niedersächsischen Klimastationen, für alle Parameter die Datensätze 1 und 2, Niederschlagswerte für Klimastationen (RR), alle Dekaden für den Zeitraum von 1961 bis 2100

Parameter	WETTREG
Temperatur	Tagesmittel
Minimum der Temperatur	Tagesminimum
Maximum der Temperatur	Tagesmaximum
Bedeckungsgrad	Tagesmittel
Sonnenscheindauer	Tagessumme
Niederschlag	Tagessumme
Luftdruck	Tagesmittel
relative Feuchte	Tagesmittel
Windstärke	Tagesmittel