

nordwest2050

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

3. WERKSTATTBERICHT

Juni 2010

Klimaszenarien für ‚nordwest2050‘ Teil 2: Randbedingungen und Beschreibung

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	1
2. Vorgehensweise	3
2.1 Randbedingungen der Szenarienentwicklung	3
2.2 Das Emissionsszenario A1B	6
2.3 Regionale Klimamodelle	7
2.4 Spannweiten	9
3. Die ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien	10
3.1 Das ‚nordwest2050‘-Klimaszenario für 2050	10
3.2 Das ‚nordwest2050‘-Klimaszenario für 2085	14
3.3 Klimaparameter der regionalen Klimamodelle	17
3.3.1 Temperatur und Temperaturkenntage	17
3.3.2 Niederschlag	23
3.3.3 Wind	28
3.3.4 Sonnenscheindauer, Bewölkung, Luftfeuchte und Wasserdampf	29
3.3.5 Extremereignisse aus den regionalen Klimamodellen	32
3.4 Klimaparameter ohne regionale Klimamodellierung	37
3.4.1 Wassertemperaturen	37
3.4.2 Meeresspiegel	40
3.4.3 Gezeiten und mittleres Tidehochwasser (MThw)	42
3.4.4 Windstau und Sturmfluten	44
4. Vergleich mit dem KLIMU-Klimaszenario	46
5. Ausblick: Ist mit extremerer Klimaentwicklung zu rechnen?	49

Glossar	54
Definitionen der Klimaparameter	57
Literatur	60
Anhang	65

Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Darstellung der Grenzen der Metropolregion Bremen-Oldenburg (MPR HB-OL), der für die Klimaszenariodarstellung ausgewählten DWD-Klimastationen und des vom Regionalmodell CLM abgedeckten Gebiets (Gitterzellen).	2
Abb. 2: Temperaturdifferenzen der durchschnittlichen Jahresmittel aus den Regionalmodellen CLM und REMO im Vergleich mit der Referenzperiode 1971-2000	18
Abb. 3: Mittlere Anzahl der Sommertage pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO)	19
Abb. 4: Mittlere Anzahl der tropischen Nächte pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO)	20
Abb. 5: Mittlere Anzahl der Frosttage pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO)	21
Abb. 6: Mittlere Anzahl der Eistage pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO)	22
Abb. 7: Saisonale Verteilung der Niederschlagsmengen für die Referenzperiode sowie die Szenarien 2050 und 2085 für CLM	23
Abb. 8: Saisonale Verteilung der Niederschlagsmengen für die Referenzperiode sowie die Szenarien 2050 und 2085 für WETTREG (keine Spannweitenbetrachtung)	24
Abb. 9: Mittlere Anzahl der Regentage pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO, Spannweiten nicht vorhanden)	25
Abb. 10: Mittlere Anzahl der Tage mit Schneedecke pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (CLM)	26
Abb. 11: Mittlere Anzahl der Schneetage pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO)	27

Abb. 12: Mittlere jährliche Windgeschwindigkeit für drei Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (CLM)	29
Abb. 13: Mittlere jährliche Sonnenscheindauer für drei Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (CLM oben, WETTREG unten und ohne Spannweiten)	30
Abb. 14: Mittlerer Bewölkungsgrad pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO)	31
Abb. 15: Mittlerer Bewölkungsgrad pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (WETTREG)	32
Abb. 16: Maximale Windgeschwindigkeiten (Sturmintensitäten) für drei Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO; Spannweiten sind nicht verfügbar)	34
Abb. 17: Mittlere Anzahl der Starkregentage pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO)	36
Abb. 18: Temperaturanomalien in den Wassertemperaturen der Nordsee für das Jahr 2009. Die Anomalien der raumzeitlichen Temperaturfelder sind vom BSH aus den wöchentlichen Oberflächentemperaturfeldern für den Zeitraum 1971-1993 anhand einer monatlichen Klimatologie berechnet worden (http://www.bsh.de/)	39
Abb. 19: Normierte Zeitreihe für das MThw gemittelt für Nordsee-Küstenpegel (aus Jensen & Mudersbach 2007)	43
Abb. 20: Angenommener Verlauf der CO ₂ -Entwicklung nach IPCC-Emissionsszenarien und tatsächlicher Verlauf der Emissionen (nach GCP 2009; s.a. Raupach et al. 2007)	50
Abb. 21: Veränderungen des mittleren globalen Meeresspiegels zwischen 1970 und 2008 im Vergleich mit 1990. Die durchgezogene dicke Linie basiert auf Messungen, die zur Entfernung interannueller Variabilität geglättet worden ist (Linie mit Datenpunkten) sowie die Projektionen des IPCC mit ihren Unsicherheitsbereichen (aus University of Copenhagen 2009)	50
Abb. 22: Temperaturanomalien der Monate Juni, Juli und August im Vergleich zur Periode 1961-1990 in Europa. Die gemessene Temperatur im Jahr 2003 ist als Sternchen dargestellt. Die schwarzen Linien stellen beobachtete bzw. gemittelte Temperaturen dar, die bunten Linien sind Modellierungsergebnisse des globalen Modells HadCM3 unter Berücksichtigung des A2 Szenarios (aus Lemke 2009)	51

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Projizierte CO ₂ -Konzentrationen für die A1 Szenariofamilie (CO ₂ -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)	7
Tab. 2: Zusammenstellung der verfügbaren und ausgewerteten Informationen der Klimaparameter vom DWD, aus den regionalen Klimamodellen und der Spannweiten (Stand März 2010; x = vorhanden, - = nicht vorhanden, * = saisonale Auswertung)	8
Tab. 3: Das ‚nordwest2050‘-Klimaszenario 2050 : 1. Änderungen der Jahresmittelwerte der Klimaparameter für das Emissionsszenario A1B gemittelt	

aus den Regionalmodellen **REMO** und **CLM**; alle Werte für die Periode 2036-2065 im Vergleich mit der Periode 1971-2000 und für die MPR HB-OL. 2. Spannweiten der Änderungen der Jahresmittelwerte: zusätzliche Berücksichtigung des regionalen Klimamodells RCAO und der Emissionsszenarien B1, B2 und A2 aus dem Norddeutschen Klimaatlas sowie Literaturrecherchen zu den nicht aus den regionalen Klimamodellen abzuleitenden Parametern; alle Werte für die Periode 2036-2065 im Vergleich mit der Periode 1961-1990 und für die MPR HB-OL (Definitionen der Klimaparameter s. Kap. 7). 11

Tab. 4: Das ‚nordwest2050‘-Klimaszenario **2050**: Änderungen der Jahresmittelwerte der Klimaparameter für das Emissionsszenario A1B aus dem Regionalmodell **WETTREG**; alle Werte für die Periode 2041-2070 im Vergleich mit der Periode 1971-2000 und für die MPR HB-OL (die WETTREG-Ergebnisse fließen nicht in die Spannweiten der Jahresmittelwertänderungen ein: s. Kap. 2.4)11

Tab. 5: Das ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien **2085**: 1. Änderungen der Jahresmittelwerte der Klimaparameter für das Emissionsszenario A1B aus den Regionalmodellen **REMO** und **CLM**; alle Werte für die Periode 2071-2100 im Vergleich mit der Periode 1971-2000 und für die MPR HB-OL. 2. Spannweiten der Änderungen der Jahresmittelwerte: zusätzliche Berücksichtigung des regionalen Klimamodells RCAO und der Emissionsszenarien B1, B2 und A2 aus dem Norddeutschen Klimaatlas sowie Literaturrecherchen zu den nicht aus den regionalen Klimamodellen abzuleitenden Parametern; alle Werte für die Periode 2071-2100 im Vergleich mit der Periode 1961-1990 und für die MPR HB-OL (Definitionen der Klimaparameter s. Kap. 7) 14

Tab. 6: Das ‚nordwest2050‘-Klimaszenario **2085**: Änderungen der Jahresmittelwerte der Klimaparameter für das Emissionsszenario A1B aus dem Regionalmodell **WETTREG**; alle Werte für die Periode 2071-2100 im Vergleich mit der Periode 1971-2000 und für die MPR HB-OL (die WETTREG-Ergebnisse fließen nicht in die Spannweiten der Jahresmittelwertänderungen ein: s. Kap. 2.4)15

Tab. 7: Vergleich des KLIMU-Klimaszenarios (Referenzperiode 1961-1990) mit dem ‚nordwest2050‘-Klimaszenario 2050 und 2085 (Referenzperiode 1971-2000; Regionalmodelle CLM und REMO) 47

Tab. 8: Liste der für die relevanten Klimaparameter verfügbaren Karten aus den jeweiligen regionalen Klimamodellen CLM (Model & Data und SGA: <http://www.mad.zmaw.de/>) und REMO (MPI-M 2007: <http://www.mpimet.mpg.de/>), dem Norddeutschen Klimaatlas (Norddeutsches Klimabüro: <http://www.norddeutscher-klimaatlas.de>) und dem Projekt ZWEK (DWD: <http://www.dwd.de/>) für verschiedene Zeitperioden 65

1. Anlass und Ziel

Eine entscheidende Frage der regionalen Klimafolgen- und Klimaanpassungsforschung ist die nach den zukünftigen regionalen Klimaveränderungen. 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. In Deutschland sind mehrere regionale Klimamodelle entwickelt worden, die mit unterschiedlichen Randbedingungen und Methoden bzw. Verfahren regionale Klimaprojektionen berechnet haben. Somit wird es erstmals möglich, für die Metropolregion Bremen-Oldenburg (MPR HB-OL, s.a. Abbildung 1) räumlich fein differenzierte und auf Klimamodellen basierende Szenarien der zukünftigen Klimaveränderungen für eine Vielzahl von Klimaparametern festzulegen. Diese werden dem Verbundvorhaben ‚nordwest2050‘ für alle Arbeitsbereiche und für die Kommunikation mit Dritten zur Verfügung gestellt.

Die Szenarioentwicklung von BioConsult für das KLIMZUG-Projekt ‚nordwest2050‘ gliedert sich in zwei Teile:

1. Die aktuellen Erkenntnisse und Ergebnisse der globalen und regionalen Klimamodellierungen mit der resultierenden Klimaprojektion werden innerhalb des Verbundes kommuniziert, so dass die ‚nordwest2050‘-Projektbeteiligten insgesamt einen einführenden Überblick über den aktuellen Stand des Wissens bekommen. Die weitere Definition und 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) (siehe Teil 1 „Grundlagen“).
2. Die Festlegung und Bereitstellung der zwei projektbezogen aufbereiteten ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien auf der Basis der aktuellen Ergebnisse der Regionalisierung ist die Grundlage für alle weiteren Arbeiten innerhalb von ‚nordwest2050‘. Die Szenarien bilden v.a. die gemeinsamen Randbedingungen für die Arbeiten im Bereich der Vulnerabilitätsanalyse, da sie hier das Ausmaß der Exposition determinieren. Dazu sind die Anforderungen an die Klimaszenarien mit den Wirtschaftsklustern konkretisiert worden, um sektorspezifische Sensitivitäten und Anfälligkeiten analysieren zu können. Die Anforderungen sind bezüglich ihrer Umsetzbarkeit und Datenverfügbarkeit mit der SGA abgestimmt und werden im vorliegenden 2. Teil „Randbedingungen und Beschreibung“ mit den nicht aus den regionalen Klimamodellierungen ableitbaren Parametern zu den zwei ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien zusammengeführt.

Im Teil 1 zu den ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien werden die vorliegenden Erkenntnisse über mögliche Klimaänderungen für die MPR HB-OL zusammengestellt. Hierzu werden als erstes einige Informationen über Klimamodelle und -projektionen bereitgestellt, anschließend heutige Beobachtungen des Klimawandels dargestellt und dann die globale Klimamodellierung und die

daraus resultierenden globalen Klimaprojektionen erläutert. Zusätzlich werden als Exkurs die Emissionsszenarien des IPCC vorgestellt, die als globale „Zukunftsbilder“ die mögliche sozioökonomische Entwicklung der Menschheit beschreiben und als Grundlage für die Klimamodellierung dienen. Darauf basierend werden die aktuellen regionalen Klimamodelle mit den regionalen Klimaprojektionen dargestellt.

Der vorliegende 2. Teil beschreibt die Vorgehensweise für die Erstellung der zwei ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien und die dafür zu beachtenden spezifischen Randbedingungen, um dann die möglichen Klimaveränderungen für die Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten (MPR HB-OL) mit den möglichen Spannweiten darzustellen (s. Kap. 3). Es wird abweichend vom 1. Arbeitspapier vom Juni 2009 ein neuer Ansatz der Szenarioerstellung verfolgt, der die Diskussionen und Abstimmungen innerhalb des Projekts aufgreift und berücksichtigt.

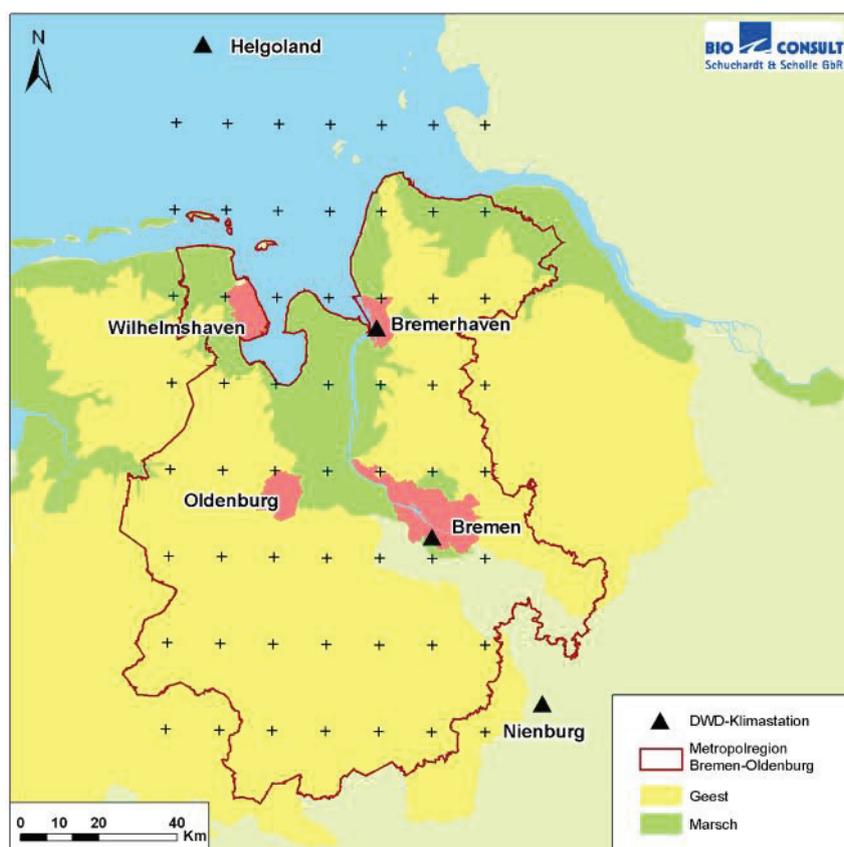


Abbildung 1: Darstellung der Grenzen der Metropolregion Bremen-Oldenburg (MPR HB-OL), der für die Klimaszenariodarstellung ausgewählten DWD-Klimastationen und des vom Regionalmodell CLM abgedeckten Gebiets (Gitterzellen).

Berichtsstand für die im Folgenden vorgestellte Szenarioentwicklung ist der März 2010. Das bedeutet, dass sowohl die Klimadatenlieferung als auch die anschließende Auswertung und Bearbeitung noch nicht vollständig abgeschlossen ist. Zusätzlich sind auch innerhalb der KLIMZUG-Förderaktivität noch verschiedene Details bei der Verwendung der Modellergebnisse

zu klären (z.B. Biaskorrektur) und hinsichtlich eines vergleichbaren Vorgehens abzustimmen (z.B. räumliche Verfeinerung der regionalen Klimamodelldaten, Erhöhung der zeitlichen Auflösung in den Regionalmodellen, hydrologische Modellierungen und Simulationsdaten). Die Erkenntnisse dieser Absprachen sollen soweit möglich auch in ‚nordwest2050‘ Berücksichtigung finden und werden daher im weiteren Verlauf der Vulnerabilitätsanalyse aufgenommen und bearbeitet.

2. Vorgehensweise

Aus den Ergebnissen der aktuellen regionalen Klimamodellierungen werden für das Projekt zwei Szenarien erstellt: dieses sind die ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien für die aus einer 30-jährigen Periode gemittelten Jahre 2050 und 2085 (s. Kap. 3). Sie stellen die für das Projekt verbindliche Festlegung der für den jeweiligen Betrachtungszeitraum möglichen mittleren klimatischen Randbedingungen inklusive ihrer Spannweiten für die MPR HB-OL dar (Abbildung 1). Somit werden in ihnen die Eingangsbedingungen für die Analysen der regionalen und clusterspezifischen Vulnerabilität beschrieben.

Für diese Vorgehensweise konnte auf die Zusammenarbeit mit zwei Institutionen zurückgegriffen werden: Erstens konnten und sollten innerhalb der KLIMZUG-Förderaktivität die aktuellen Klimadaten der regionalen Klimamodelle genutzt werden, die über die Service Gruppe Anpassung (SGA; seit 1. Januar 2010 Climate Service Center - CSC) aus der CERA-Datenbank des World Data Center for Climate bereitgestellt und z.T. aufbereitet worden sind. Zweitens wurde bezüglich der vorläufigen Bereitstellung von Werten für den möglichen Klimawandel, die innerhalb von ‚nordwest2050‘ für die Beteiligung der Praxispartner und die ersten Interviews benötigt wurden, mit dem vom Norddeutschen Klimabüro erstellten und veröffentlichten Norddeutschen Klimaatlas kooperiert. Dieses duale Vorgehen spiegelt sich in den zwei Bestandteilen der ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien wider und wird im folgenden Kapitel weiter erläutert.

2.1 Randbedingungen der Szenarientwicklung

Für die Entwicklung und Festlegung der in den Klimaszenarien beschriebenen mittleren Veränderungen mit ihren Spannweiten mussten verschiedene Randbedingungen festgelegt werden. Diese sind für die Interpretation und Einordnung der in den Szenarien beschriebenen Veränderungen relevant und werden im Folgenden beschrieben.

Referenzperiode und Zeithorizonte

Der Betrachtungszeitraum von ‚nordwest2050‘ ist das Jahr 2050. Sowohl die Analysen der Vulnerabilität, als auch die zu entwickelnden Anpassungsmaßnahmen und -strategien fokussieren auf den Zeitraum bis bzw. für das Jahr 2050. Dementsprechend muss ein erstes

Klimaszenario die klimawandelbedingten Veränderungen für das mittlere Jahr 2050 beschreiben. Da jedoch der Klimawandel über das Jahr 2050 hinaus voraussichtlich weiter voranschreiten wird, wird in einem zweiten Szenario für das mittlere Jahr 2085 beschrieben, mit welchen Klimaveränderungen die Untersuchungsregion bis zum Ende des 21. Jahrhunderts rechnen muss. Insbesondere für frühzeitig zu entwickelnde und/oder langfristig wirkende Strategien oder Entscheidungen ist dieser Blick über das Jahr 2050 hinaus relevant. Zusätzlich werden bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auch die Einflüsse der verschiedenen Emissionsszenarien auf die modellierten Ergebnisse möglicher Klimaveränderungen deutlicher (vgl. IPCC 2007).

Es werden somit zwei Szenarien erstellt: eins für ein mittleres Jahr 2050, welches die 30-jährige Zukunftsperiode 2036-2065 mittelt (sog. 2050-Szenario) und ein weiteres für ein mittleres Jahr 2085, welches die 30-jährige Zukunftsperiode 2071-2100 mittelt (sog. 2085-Szenario). Der Vergleichszeitraum bzw. die Referenzperiode sind die Jahre 1971-2000, sowohl für die Messdaten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) als auch für die Gegenwärtsläufe der Regionalmodelle (sog. C20-Läufe). Die Messdaten der Klimastationen des DWD in der MPR HB-OL sind über den DWD-Datenservice bezogen worden (s.a. Tabelle 2).

Für die Spannweiten (s.a. Kapitel 2.4) weichen die betrachteten Zeiträume zum Teil ab: für sie werden als Referenzperiode die Jahre 1961-1990 herangezogen. Weiterhin ist bezüglich des 2050-Szenarios der Zukunftszeitraum für die WETTREG-Datenauswertung abweichend 2041 bis 2070. Hintergrund hierfür ist, dass die aus dem Regionalmodell WETTREG berechneten mittleren Veränderungen für das A1B-Szenario ausschließlich als 200 Jahre umfassende Simulation für jede Dekade zwischen 1961 und 2100 vorliegen. Eine Auswertung einzelner Jahre bzw. eines 5 Jahre umfassenden Ausschnitts ist daher nicht zulässig (weitere Details in Spekat et al. 2007).

Abstimmung innerhalb der KLIMZUG-Förderaktivität

Die Betrachtung unterschiedlicher Zeiträume ist einerseits die Konsequenz des oben genannten dualen Vorgehens, also sowohl der Nutzung vorhandener Informationen aus dem Norddeutschen Klimaatlas als auch der Klimadaten von der SGA/CSC. Andererseits ist sie eine Konsequenz aus Abstimmungsprozessen innerhalb der KLIMZUG-Förderaktivität, für die es sinnvoll erscheint, dass insbesondere die norddeutschen KLIMZUG-Projekte ‚nordwest2050‘, KLIMZUG-Nord und RADOST mit vergleichbaren Klimaszenarien arbeiten. Um also die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, ist auf mehreren Datennutzertreffen unter Beteiligung der genannten Projekte eine sog. „Minimalanforderung“ mit folgenden Punkten vereinbart worden, die auch für ‚nordwest2050‘ als sinnvoll erachtet und daher so verfolgt wird:

- Referenzperiode: 1971 bis 2000;
- Zukunftszeitraum: 2036 bis 2065; Klimawandel über das Jahr 2050 hinaus betrachten;
- Emissionsszenario: A1B;
- Regionalmodelle REMO und CLM; 1. Realisierungslauf des A1B-Szenarios (A1B_1);
- für die Betrachtung des Klimawandels über das Jahr 2050 hinaus werden die Berücksichtigung weiterer Emissionsszenarien, Szenarioläufe und die Darstellung von Spannweiten empfohlen.

Somit sind für die Klimaszenarien in ‚nordwest2050‘ zwei Bestandteile festzulegen, damit sie den genannten Anforderungen genügen: der erste Teil beschreibt die möglichen klimatischen Veränderungen der Mittelwerte für das Jahr 2050 und 2085 (bzw. das mittlere Jahr der entsprechenden Zeitperiode: s.o.) für das A1B-Emissionsszenario. Hierfür werden die Klimarohdaten der CERA-Datenbank benutzt, die von der Service Gruppe Anpassung (SGA) bezogen werden (zur Liste der Anforderungen und verfügbaren Daten s. Kap. 9). Im zweite Teil werden dann die möglichen Spannweiten für die ausgewählten Klimaparameter, die aus den verschiedenen regionalen Klimamodellen mit ihren unterschiedlichen Läufen und den berücksichtigten Emissionsszenarien resultieren, beschrieben (s. Kap. 2.4). Die Darstellung der Spannweiten soll – entsprechen der „Minimalanforderung“ – insbesondere dazu dienen, bestehende Unsicherheiten in den Aussagen insbesondere der langfristigen regionalen Klimamodellierungen zu verdeutlichen. Sie sind im Norddeutschen Klima atlas (<http://www.norddeutscher-klima atlas.de>) dargestellt. Dieser basiert ebenfalls auf den Klimadaten der CERA-Datenbank; in ‚nordwest2050‘ werden hierfür keine zusätzlichen Rohdaten verwendet bzw. ausgewertet.

Das A1B-Emissionsszenario wird dem 1. Teil der ‚nordwest2050‘-Szenarien auch deshalb zugrunde gelegt, da nur hierfür in den drei Regionalmodellen REMO, CLM und WETTREG Berechnungen durchgeführt worden sind. Die Berücksichtigung des regionalen Klimamodells WETTREG geht über die Minimalanforderung hinaus und wird deshalb zusätzlich herangezogen, da die Ergebnisse eines statistischen Modells denen der dynamischen Modelle gegenüber gestellt werden sollen (zu den Annahmen des Emissionsszenario A1B s. Kap. 2.2). Das kräftigere A2-Szenario ist im CLM-Modell nicht benutzt worden. Das optimistischere B1-Szenario ist zwar ebenfalls in alle drei Modelle eingeflossen, wird aber aufgrund des vergleichsweise schwachen Klimasignals für die Folgenanalysen als nicht zielführend erachtet.

Biaskorrekturen

Die in den Kapiteln 3.1 und 3.2 aufgeführten Werte beschreiben, wie in der Darstellung möglicher Werte für den Klimawandel üblich, Differenzen (in Prozent, Tagen, Stunden usw.) bezogen auf die Referenzperiode. Diese Differenzen sind nicht unmittelbar aus den Regionalmodellen zu entnehmen, sondern müssen berechnet werden. Diesen Schritt nennt man Biaskorrektur, der als Anpassungsmethode der Klimasimulationen an meteorologische Beobachtungen verstanden werden kann. Hierfür gibt es unterschiedliche Methoden, die zusätzliche Unsicherheiten nach sich ziehen können (die Größe dieser Unsicherheiten wird Forschungsthema neuer EU-Projekte werden).

Hintergrund dieser Korrekturen ist die Erkenntnis, dass die regionalen Klimamodelle mit ihren Gegenwartsläufen bzw. -modellierungen (C20-Läufe) die gemessenen Klimadaten nicht exakt reproduzieren. Es kommt in den einzelnen Regionalmodellen zu unterschiedlichen Abweichungen: So sind z.B. die Modellierungsergebnisse bezüglich des Niederschlags von REMO durchgehend zu feucht und die Gegenwartsläufe der beiden Modelle CLM und REMO geben die Parameter Schneemenge, -bedeckung und -tage nicht richtig wieder (weitere Details bezüglich des Vorgehens für die Biaskorrekturen sowie die Prüfung der Modell- und

Parametergröße sind Bestandteil aktueller Aktivitäten des CSC).

In ‚nordwest2050‘ erfolgt die Biaskorrektur anhand folgender Schritte: von den Modellierungsergebnissen der Zukunftszeiträume werden die Modellierungsergebnisse der Gegenwartsläufe abgezogen. Hieraus ergeben sich die Differenzen zwischen jeweiliger Zukunftsperiode und dem Vergleichszeitraum. Um das „Bild“ des Klimawandels deutlicher zu zeichnen, d.h. eine Einordnung der Größenordnung der Differenzen bezogen auf die Beobachtungsdaten zu ermöglichen, werden dann in einem nächsten Schritt die Differenzen mit den Messwerten (vom DWD) der Referenzperiode verrechnet. Resultat sind dann einerseits die zu erwartenden Differenzen zwischen Referenzperiode und den beiden Zukunftszeiträumen, andererseits auch absolute Werte für die beiden Zukunftszeiträume für alle relevanten Parameter inklusive der Spannweiten – soweit vorhanden.

2.2 Das Emissionsszenario A1B

Trotz der Hoffnung, 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 durch die Formulierung unterschiedlicher Szenarien der gesellschaftlichen und technischen Entwicklung der Welt als Grundlage für sich z.T. sehr deutlich voneinander unterscheidende Emissionsszenarien (s. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum 4. Sachstandsbericht des IPCC; weitere Details zu den SRES-Szenarien befinden sich auch im Teil 1 „Grundlagen“).

Im Folgenden soll das Emissionsszenario A1B mit den dahinterstehenden Annahmen noch einmal kurz dargestellt werden, da die meisten Modellrechnungen auch der regionalen Klimamodelle mit den hier formulierten Vorgaben bezüglich der Emissionen durchgeführt werden. Im nächsten IPCC-Bericht, der voraussichtlich in den Jahren 2013/2014 erscheinen wird, werden wahrscheinlich auch stärkere Emissionsszenarien in der Klimamodellierung berücksichtigt (mündl. MPI-M).

Innerhalb der Szenariofamilie A1 werden drei Szenariengruppen unterschieden, die von einer ähnlichen demographischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und den technologischen Wandel betreffenden Modellgeschichte ausgehen. Diese reflektieren eine konsistente Variation der Modellgeschichte. Die A1-Szenariofamilie umfasst die drei Gruppen A1T, A1FI und A1B. 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).

Die Szenariofamilie A1 beschreibt eine zukünftige Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum, einer in der Mitte des 21. Jahrhunderts den Höchststand erreichenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung sowie 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.

Das Szenario A1B ist somit charakterisiert durch:

- schnelle wirtschaftliche Entwicklung;
- Bevölkerungswachstum bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts;
- Entwicklung und Einsatz von effizienten Technologien;
- Nutzung fossiler und nicht-fossiler Energieträger;
- Globalisierung auch in kultureller und sozialer Hinsicht.

Wichtig ist an dieser Stelle der Hinweis, dass die SRES-Szenarien keine zusätzlichen Klimaschutzanstrengungen oder -initiativen beinhalten, 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. Zudem kann keines der SRES-Szenarien als besonders wahrscheinlich betrachtet werden; alle Szenarien sind gleich stichhaltig. Die Szenarien wurden und werden kontinuierlich im Rahmen der IPCC-Sachstandsberichte weiterentwickelt. Sie werden an die aktuellen Emissionen sowie an neue Erkenntnisse über die künftige Entwicklung von Wirtschaft, Bevölkerung und Treibhausgasemissionen angepasst. Die jeweiligen Kohlendioxidemissionen sind in Tab. 1 dargestellt.

Tabelle 1: Projizierte CO₂-Konzentrationen für die A1 Szenariofamilie (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

Die daraus mit Hilfe der globalen Klimamodelle abgeleiteten globalen Klimaprojektionen für Temperaturen und den Meeresspiegel sind im Teil 1 aufgeführt.

2.3 Regionale Klimamodelle

Da die globalen Klimamodelle mit ihren globalen Klimaprojektionen für Folgenuntersuchungen und Anpassungsforschung auf regionaler Ebene nicht ausreichend aufgelöst sind, wurden Regionalisierungsverfahren entwickelt. Die drei aktuellen Regionalmodelle sind: CLM (dynamisches „Climate Limited area“-Modell der Gruppe Modelle und Daten (M&D) am MPI-M, Hamburg: <http://clm.gkss.de>), REMO (dynamisches Regionalmodell des MPI-M: <http://www.mpimet.mpg.de/>) und WETTREG (statistisches Modell der Firma Climate &

Environment Consulting GmbH in Potsdam (CEC): <http://www.cec-potsdam.de>) (Basis- und Nutzerinformationen der Modelle sind im 1. Teil des Berichts in der Tabelle 3 aufgeführt). Die Rohdaten der Modellläufe stehen Anwendern 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. Folgende Tab. 2 stellt die vom DWD und die aus den regionalen Klimamodellen verfügbaren und ausgewerteten Klimaparameter zusammen.

*Tabelle 2: Zusammenstellung der verfügbaren und ausgewerteten Informationen der Klimaparameter vom DWD, aus den regionalen Klimamodellen und der Spannweiten (Stand März 2010; x = vorhanden, - = nicht vorhanden, * = saisonale Auswertung).*

Parameter	DWD	CLM	REMO	WETTREG	Spannweiten
mittlere Temperatur	x*	x*	x*	x*	x*
Temperaturminimum	x	x	x	x	-
Temperaturmaximum	x	x	x	x	-
Sommertage	x*	x	x	-	x*
heiße Tage	x	-	-	-	x*
tropische Nächte	x	x	x	-	x*
Frosttage	x	x	x	-	x*
Eistage	x	x	x	-	x*
Gesamtniederschlag	x*	x*	x*	x*	x*
Trockentage	x*	x*	x*	-	-
Regentage	x*	x*	x*	x	-
nasse Tage	x*	x	x	-	-
Starkregentage	x*	x*	x*	x	x*
Schneemenge	x*	x	-	-	x*
Schneebedeckung	x	x	-	-	x*
Schneetage	x*	x	x	-	x*
relative Luftfeuchte	x*	-	-	x	x*
Dampfdruck	x*	-	-	-	x*
mittlere Windgeschwindigkeit	x*	x*	x*	x	x*
maximale Windgeschwindigkeit	x*	x	x	-	-
Sturmtage	x*	x*	x*	-	x*
windstille Tage	x*	x*	x*	-	x*
Windrichtung	-	x	x	-	-
Sonnenscheindauer	x*	x	-	x	x*
Klimatische Wasserbilanz	-	x*	x*	-	-
Bewölkungsgrad	x*	x	x	x	x*
schwüle Tage	x	-	-	x	-
sonnige Tage	x	-	-	x	-
nebelige Tage	x	-	-	x	-

Die deutschlandweiten Klimaprojektionen für Temperatur, Meeresspiegel, Gezeiten und Sturmfluten, Niederschlag und Abfluss sowie zu Veränderungen der Intensität von Extremereignissen sind dem 1. Teil zu entnehmen und werden in den folgenden Kapiteln 3.1 und 3.2 zu den regionalen ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien zusammengeführt.

2.4 Spannweiten

Entsprechend der oben genannten „Minimalanforderung“ (deren Umsetzung allerdings alles andere als einen minimalen Arbeitsaufwand bedeutet) werden im zweiten Bestandteil der beiden ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien Spannweiten möglicher Klimaveränderungen dargestellt. Die für die beiden mittleren Jahre 2050 und 2085 ergänzend angegebenen Spannweiten sind Resultat der Zusammenarbeit und Kooperation mit den Klimaforschern am MPI-M und der SGA sowie des Norddeutschen Klimabüros, welches für den Norddeutschen Klimaatlas (<http://www.norddeutscher-klimaatlas.de/>) verantwortlich ist. Erkenntnis und Empfehlung ist, im Sinne eines Ensemble-Ansatzes nicht nur Daten verschiedener Regionalmodelle zu nutzen (wie im ersten Bestandteil der ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien vorgesehen), sondern auch verschiedene Läufe der jeweiligen Regionalmodelle und mehrere Emissionsszenarien zu nutzen. Ein solches Vorgehen ist im Norddeutschen Klimaatlas umgesetzt und daher wird er von uns genutzt, insbesondere auch deshalb, da die räumliche Abgrenzung der MPR HB-OL im Klimaatlas implementiert ist und ausgewählt werden kann.

Bisher sind in den Klimaatlas insgesamt elf verschiedene Klimarechnungen bzw. -läufe eingegangen: Vier Klimarechnungen mit dem regionalen Klimarechenmodell CLM (Hollweg et al. 2008), 3 Klimarechnungen durch das Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg mit dem regionalen Klimarechenmodell REMO (Jacob et al. 2008) und 4 Klimarechnungen mit dem regionalen Klimamodell RCAO des schwedischen Wetterdienstes SMHI im Rahmen des EU Projektes PRUDENCE (<http://prudence.dmi.dk/>). Somit lassen sich die modellbedingten Bandbreiten bzw. Spannweiten der möglichen Klimaentwicklung darstellen und resultierende Unsicherheiten bezüglich der Aussagen der regionalen Klimamodellierung einschätzen.

Zusätzlich sind jedoch auch die emissionsbedingten Spannweiten zu berücksichtigen, die insbesondere bis zum Ende des 21. Jahrhunderts größere Relevanz für die Folgenbetrachtung bekommen. Im Norddeutschen Klimaatlas sind neben dem Emissionsszenario A1B auch die Emissionsszenarien B1, B2 und A2 für die Projektionen der Klimaveränderungen berücksichtigt. Abweichend von den mittleren Werten für die Veränderungen der betrachteten Klimaparameter unter Berücksichtigung des A1B-Szenarios werden hier als Referenzperiode die Jahre von 1961 bis 1990 herangezogen (s. Kap. 2.1).

Die berechneten und dargestellten Kombinationen sind im Einzelnen (Emissionsszenario - antreibendes Globalmodell - regionales Klimamodell): A1B - ECHAM5 (Lauf 1) - CLM, A1B - ECHAM5 (Lauf 1) - REMO, A1B - ECHAM5 (Lauf 2) - CLM, A1B - ECHAM5 (Lauf 2) - REMO, A2 - ECHAM4 - RCAO, A2 - ECHAM5 (Lauf 1) - REMO, A2 - Hadley - RCAO, B1 - ECHAM5 (Lauf 1) - CLM, B1 - ECHAM5 (Lauf 1) - REMO, B1 - ECHAM5 (Lauf 2) - CLM, B2 - ECHAM4 - RCAO und B2 - Hadley - RCAO.

Einschränkend muss erwähnt werden, dass in die Spannweiten die Modellergebnisse des Regionalmodells WETTREG nicht einfließen. Dieses beruht einerseits darauf, dass in den Spannweitendarstellungen des Norddeutschen Klimaatlas die Ergebnisse von WETTREG nicht berücksichtigt werden und andererseits zurzeit das WETTREG-Modell überarbeitet bzw.

zusätzliche Modellläufe durchgeführt werden, die potenziell neue Spannweitenbetrachtungen erforderlich machen könnten. Die neuen Daten aus WETTREG liegen noch nicht vor und können daher nicht in die Spannweiten einfließen. Die Auswertungsergebnisse der verfügbaren WETTREG-Daten sind im Kap. 3 dargestellt (s.a. Tab. 2).

Insgesamt sind also klimamodell-, klimamodelllauf-, emissionsszenario- und räumlich bedingte Spannweiten in den 2. Bestandteil der ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien eingeflossen, die bei der Interpretation des Klimawandels und seiner Folgewirkungen zu beachten sind (auf europäischer Ebene hat sich das Projekt ENSEMBLES intensiv mit den Möglichkeiten solcher Ansätze der Klimaszenarioentwicklung auseinandergesetzt: s. <http://www.ensembles-eu.org/>). Die räumlichen Spannweiten z.B. zwischen Küste und Binnenland werden im Rahmen der sektor- bzw. handlungsbereichsspezifischen Vulnerabilitätsanalyse aufgegriffen und weiter differenziert.

3. Die ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien

Im Folgenden werden als erstes die Ergebnisse der Klimarohdatenauswertung und die Zusammenstellung der Spannweiten für die beiden nordwest2050-Klimaszenarien dargestellt. Es wird dabei auch beschrieben, mit welchen klimawandelbedingten Trends für die MPR HB-OL zu rechnen ist, welche räumlichen Unterschiede sich zwischen Küste und Binnenland daraus ergeben und wie sich die Veränderungen aus dem A1B-Szenario in die Spannweitenangaben einordnen lassen. Anschließend wird dann auf die einzelnen Klimaparameter bzw. Klimaparametergruppen differenziert eingegangen und die berechneten Ergebnisse angeführt.

3.1 *Das ‚nordwest2050‘-Klimaszenario für 2050*

Für das ‚nordwest2050‘-Klimaszenario 2050, welches das mittlere Jahr der 30-jährigen Zeitperiode 2036-2065 betrachtet, sind die Veränderungen der verfügbaren Klimaparameter für CLM und REMO in Tab. 3 und für WETTREG in Tab. 4 dargestellt.

Für alle in Tab. 3 und Tab. 4 aufgeführten Klimaparameter sind saisonal differenzierte Angaben der Veränderungen berechnet bzw. zusammengestellt worden, also für den meteorologischen Sommer (Monate Juni, Juli und August), den meteorologischen Herbst (Monate September, Oktober und November), den meteorologischen Winter (Monate Dezember, Januar und Februar) und den meteorologischen Frühling (Monate März, April und Mai; weitere Details in den Kapiteln 3.3.1 bis 3.3.5).

Tabelle 3: Das ‚nordwest2050‘-Klimaszenario 2050: 1. Änderungen der Jahresmittelwerte der Klimaparameter für das Emissionsszenario A1B gemittelt aus den Regionalmodellen **REMO** und **CLM**; alle Werte für die Periode 2036-2065 im Vergleich mit der Periode 1971-2000 und für die MPR HB-OL. 2. Spannweiten der Änderungen der Jahresmittelwerte: zusätzliche Berücksichtigung des regionalen Klimamodells **RCAO** und der Emissionsszenarien **B1**, **B2** und **A2** aus dem Norddeutschen Klimaatlas sowie Literaturrecherchen zu den nicht aus den regionalen Klimamodellen abzuleitenden Parametern; alle Werte für die Periode 2036-2065 im Vergleich mit der Periode 1961-1990 und für die MPR HB-OL (Definitionen der Klimaparameter s. Kap. 7).

Parameter	Änderung der Jahresmittelwerte (2036-2065 im Vergleich mit 1971-2000)	Spannweiten der Jahresmittelwerte (2036-2065 im Vergleich mit 1961-1990)
CO ₂ -Konzentration (absolute Werte)	550 ppm	490 bis 600 ppm
durchschnittliche Temperatur (in 2 m Höhe)	+1,5°C	+1 bis +2°C
Sommertage (Tmax. ≥ 25°C)	+8,3 Tage	+2 bis +9,6 Tage
tropische Nächte (Tmin. ≥ 20°C)	+1,7 Nächte	+0,3 bis +1,7 Nächte
Frosttage (Tmin. ≤ 0°C)	-22,3 Tage	-33 bis -10,8 Tage
Eistage (Tmax. ≤ 0°C)	-6,1 Tage	-16 bis -3,7 Tage
Gesamtniederschlag	+8,2%	+3 bis +9%
Regentage (Niederschlag > 1 mm)	-4 Tage	n. v.
Starkregentage (Niederschlag ≥ 20 mm)	+1 Tage	0 bis +1 Tage**
Schneemenge	-57% (CLM)	-92 bis -38%
Schneebedeckung	-2,4 Tage (CLM)	-10 bis 0 Tage**
Schneetage (Tage mit Schneefall)	-0,9 Tage	-2,5 bis +0,1 Tage
mittlere Windgeschwindigkeit (in 10 m Höhe)	+1,8%	0 bis +2%
maximale Windgeschwindigkeit (in 10 m Höhe)	+3,8%	n. v.
Sonnenscheindauer	-2,8% (CLM)	-5 bis -2%
Bewölkungsgrad	+0,1%	-1 bis +1%
Wassertemperatur*	+1,5°C	+1 bis +2°C
mittlerer Meeresspiegel* (Vergleich zu 1980-1999)	+17,5 cm	+9 bis +70 cm
mittleres Tidehochwasser* (MThw, Extrapolation)	+15,5 cm	+10 bis +21 cm
Wasserstände durch Windstau*	+10 cm	+0 bis +20 cm
Sturmflutwasserstände*: <u>Summe</u> aus mittlerer Meeresspiegel, MThw und Windstau	+43 cm	+19 bis +111 cm

* = nicht aus den regionalen Klimamodellen abzuleiten; ** = Zukunftsperiode 2041-2070; n. v. = nicht vorhanden

Tabelle 4: Das ‚nordwest2050‘-Klimaszenario 2050: Änderungen der Jahresmittelwerte der Klimaparameter für das Emissionsszenario A1B aus dem Regionalmodell **WETTREG**; alle Werte für die Periode 2041-2070 im Vergleich mit der Periode 1971-2000 und für die MPR HB-OL (die WETTREG-Ergebnisse fließen nicht in die Spannweiten der Jahresmittelwertänderungen ein: s. Kap. 2.4).

Parameter	Änderung der Jahresmittelwerte (2041-2070 im Vergleich mit 1971-2000)
CO ₂ -Konzentration (absoluter Wert)	550 ppm
durchschnittliche Temperatur (in 2 m Höhe)	+1,4°C
Gesamtniederschlag	-1%
Regentage (Niederschlag > 1 mm)	-5,9 Tage
Starkregentage (Niederschlag ≥ 20 mm)	+0,1 Tag
relative Luftfeuchte	-1,3%
mittlere Windgeschwindigkeit	-2%
Sonnenscheindauer	+9,5% / +149 Stunden
Bewölkungsgrad	-5,9%

Für die MPR HB-OL insgesamt können bis 2050 folgende klimawandelbedingte Trends aus dem 2050-Szenario abgeleitet werden:

- Zunahme der Jahresmitteltemperatur (auch für die Gewässer), der Zahl der Sommertage und der tropischen Nächte;
- Abnahme der Zahl der Frost- und Eistage;
- Zunahme der Jahresregenmenge (in WETTREG: leichte Abnahme) mit Abnahme im Sommer und deutlicher Zunahme im Winter (auch in WETTREG);
- leichte Zunahme der Zahl der Starkregentage;
- Abnahme der Schneemenge, der Schneebedeckung sowie der Schneetage;
- Zunahme der mittleren und deutlichere Zunahme der maximalen Windgeschwindigkeiten;
- Abnahme der Sonnenscheindauer (in WETTREG: Zunahme) bei nahezu unveränderter prozentualer Bedeckung (in WETTREG: geringe Abnahme);
- Anstieg des mittleren Meeresspiegels, des mittleren Tidehochwassers, des Windstaus und damit der Sturmflutwasserstände.

Die räumlichen Unterschiede der klimatischen Veränderungen in der Untersuchungsregion können dem umfangreichen vorhandenen Kartenmaterial des Norddeutschen Klimaatlas und weiteren Quellen entnommen werden (eine Zusammenstellung des vorhandenen Kartenmaterials ist in Tab. 8 im Kap. 9 angeführt; zu beachten ist hier, dass sich die betrachteten zukünftigen Zeiträume in den einzelnen Modelle z.T. unterscheiden). Der räumliche Vergleich der Klimaveränderungen zwischen der Küstenregion und dem Binnenland für das mittlere Jahr 2050 – wobei es sich bei dieser Gebietsabgrenzung nicht um starr definierte Bereiche handelt, sondern aufgrund der Modellauflösung um grobe Abschätzungen der 10 x 10 km (REMO) bzw. 20 x 20 km (CLM) Gittergrößen – ergibt folgende Trends:

- **Küste:** in der Küstenregion leicht größere Zunahme des Jahresniederschlags und des Winterniederschlags bei schon heute höheren Niederschlagsmengen; etwas stärkere Abnahme der Sommerniederschläge; etwas stärkere Zunahme der Windgeschwindigkeiten und Sturmintensitäten
- **Binnenland:** im Binnenland stärkere Temperaturzunahme im Winter bei schon heute niedrigeren winterlichen Temperaturmittelwerten
- Die räumlichen Differenzen sind bei den meisten Klimaparametern vergleichsweise gering, für Regentage, Sommertage, Frosttage und Sturmtage jedoch deutlich.

Die räumlichen Differenzen in der MPR HB-OL werden im Analysekompartiment Exposition, welches Bestandteil der Vulnerabilitätsanalyse ist, wieder aufgenommen und sektor- bzw. handlungsbereichsspezifisch weiter konkretisiert.

Neben den genannten räumlichen Spannweiten innerhalb der MPR HB-OL existieren auch Spannweiten, die aus den Rechnungen der verschiedenen regionalen Klimamodelle mit ihren unterschiedlichen Modellläufen unter Berücksichtigung der verschiedenen Emissionsszenarien resultieren. Folgende Einordnung der angenommenen A1B-Veränderungen innerhalb der in Tab. 3 aufgeführten Spannweiten kann getroffen werden:

- Die Veränderungen der Jahresmitteltemperatur sowie für die Temperaturkentage Frosttage und Eistage liegen im mittleren Bereich der Spannweiten, für die Temperaturkentage Sommertage und tropische Nächte eher im oberen Bereich.
- Die Veränderungen des Gesamtniederschlags und der Starkregentage aus CLM und REMO befinden sich deutlich am oberen Rand der Spannweiten; WETTREG zeigt mit einer Abnahme des Gesamtniederschlags ein gegenläufiges Bild und fällt aus der Spannweite heraus (s. Kap. 2.4).
- Die Veränderungen bezüglich Schneemenge, -bedeckung und -tage innerhalb der Spannweiten sind uneinheitlich, da z.T. nur Ergebnisse einzelner Regionalmodelle vorliegen und die Gegenwartsläufe mit den gemessenen Werten nur wenig übereinstimmen (Biaskorrektur: s. Kap. 2.1).
- **Fazit:** Bis zum Jahr 2050 stellen die Veränderungen aus dem A1B-Emissionsszenario für CLM und REMO im Vergleich mit den Spannweiten für die Parameter Sommertage, tropische Nächte, Gesamtniederschlag, Starkregentage und Windgeschwindigkeit ein starkes, bezüglich der Parameter Jahresmitteltemperatur, Frosttage, Eistage, Sonnenschein und Bewölkung ein mittleres Klimaänderungssignal dar. Die WETTREG-Ergebnisse weichen z.T. davon ab.

Die nicht regional modellierten Klimaparameter Wassertemperatur, mittlerer Meeresspiegel, Gezeiten und mittleres Tidehochwasser sowie Sturmflutwasserstände mit ihren Spannweiten sind in den Kapiteln 3.4.1 bis 3.4.4 aufgeführt.

3.2 Das ‚nordwest2050‘-Klimaszenario für 2085

Für das ‚nordwest2050‘-Klimaszenario 2085, welches das mittlere Jahr der 30-jährigen Periode 2071-2100 betrachtet, sind die Veränderungen der verfügbaren Klimaparameter für CLM und REMO in Tab. 5 und für WETTREG in Tab. 6 dargestellt.

Tabelle 5: Das ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien 2085: 1. Änderungen der Jahresmittelwerte der Klimaparameter für das Emissionsszenario A1B aus den Regionalmodellen REMO und CLM; alle Werte für die Periode 2071-2100 im Vergleich mit der Periode 1971-2000 und für die MPR HB-OL. 2. Spannweiten der Änderungen der Jahresmittelwerte: zusätzliche Berücksichtigung des regionalen Klimamodells RCAO und der Emissionsszenarien B1, B2 und A2 aus dem Norddeutschen Klimaatlas sowie Literaturrecherchen zu den nicht aus den regionalen Klimamodellen abzuleitenden Parametern; alle Werte für die Periode 2071-2100 im Vergleich mit der Periode 1961-1990 und für die MPR HB-OL (Definitionen der Klimaparameter s. Kap. 7).

Parameter	Änderung der Jahresmittelwerte (2071-2100 im Vergleich mit 1971-2000)	Spannweiten der Jahresmittelwerte (2071-2100 im Vergleich mit 1961-1990)
CO ₂ -Konzentration (absolute Werte)	770 ppm	615 bis 920 ppm
durchschnittliche Temperatur (in 2 m Höhe)	+2,8°C	+1,9 bis +4,7 °C
Sommertage (Tmax. ≥ 25°C)	+15,9 Tage	+5,6 bis +42,6 Tage
tropische Nächte (Tmin. ≥ 20°C)	+4 Nächte	+1,3 bis +18,7 Nächte
Frosttage (Tmin. ≤ 0°C)	-32,3 Tage	-39,5 bis -12,1 Tage
Eistage (Tmax. ≤ 0°C)	-11,6 Tage	-17,6 bis -4,8 Tage
Gesamtniederschlag	+6%	-1 bis +10%
Regentage (Niederschlag > 1 mm)	+4,2 Tage	n. v.
Starkregentage (Niederschlag ≥ 20 mm)	+1,8 Tage	+1 bis +2 Tage
Schneemenge	-70% (CLM)	-95 bis -51%
Schneebedeckung	-3,5 Tage (CLM)	-10 bis 0 Tage
Schneetage (Tage mit Schneefall)	-1,3 Tage	-2,7 bis -0,2 Tage
mittlere Windgeschwindigkeit (in 10 m Höhe)	+2,5%	0 bis +3%
maximale Windgeschwindigkeit (in 10 m Höhe)	+11%	n. v.
Sonnenscheindauer	-3,9% (CLM)	-3 bis -7%
Bewölkungsgrad	+0,7%	-6 bis +2%
Wassertemperatur* (Binnengewässer und Unterweser)	+2,8°C	+1,9 bis +4,7°C
mittlerer Meeresspiegel* (Vergleich zu 1980-1999)	+34,5 cm	+18 bis +140 cm
mittleres Tidehochwasser* (MThw, Extrapolation)	+30,5 cm	+20 bis +41 cm
Wasserstände durch Windstau*	+25 cm	+15 bis +35 cm
Sturmflutwasserstände*: Summe aus mittlerer Meeresspiegel, MThw und Windstau	+90 cm	+53 bis +216 cm

* = nicht aus den regionalen Klimamodellen abzuleiten; n. v. = nicht vorhanden

Tabelle 6: Das ‚nordwest2050‘-Klimaszenario 2085: Änderungen der Jahresmittelwerte der Klimaparameter für das Emissionsszenario A1B aus dem Regionalmodell WETTREG; alle Werte für die Periode 2071-2100 im Vergleich mit der Periode 1971-2000 und für die MPR HB-OL (die WETTREG-Ergebnisse fließen nicht in die Spannweiten der Jahresmittelwertänderungen ein: s. Kap. 2.4).

Parameter	Änderung der Jahresmittelwerte (2071-2100 im Vergleich mit 1971-2000)
CO ₂ -Konzentration (absoluter Wert)	770 ppm
durchschnittliche Temperatur (in 2 m Höhe)	+2,3°C
Gesamtniederschlag	-3,4%
Regentage (Niederschlag > 1 mm)	-6,1 Tage
Starkregentage (Niederschlag ≥ 20 mm)	+0,7 Tage
relative Luftfeuchte	-1,7%
mittlere Windgeschwindigkeit	-6%
Sonnenscheindauer	+11,3% / +177 Stunden
Bewölkungsgrad	-6,4%

Alle Klimaparameter in Tabelle 5 und Tabelle 6 liegen ebenfalls saisonal differenziert vor.

Für die MPR HB-OL insgesamt können bis zum Ende des 21. Jahrhunderts folgende – auch im Vergleich mit dem 2050-Szenario – klimawandelbedingte Trends aus dem 2085-Szenario abgeleitet werden:

- weitere Zunahme der Jahresmitteltemperatur (auch für die Gewässer), der Anzahl der Sommertage und tropischen Nächten;
- weitere nicht ganz so deutliche Abnahme der Zahl der Frost- und Eistage;
- geringe Zunahme der Jahresregenmenge im Vergleich mit der Referenzperiode bzw. leichte Abnahme im Vergleich mit dem 2050-Szenario (in WETTREG: weiterhin leichte Abnahme) bei allerdings weiterhin deutlicher Abnahme im Sommer und deutlicher Zunahme im Winter;
- weitere Zunahme der Starkregenereignisse;
- weitere Abnahme der Schneemenge, -bedeckung und -tage;
- weitere Zunahme der mittleren und maximalen Windgeschwindigkeiten;
- weitere Abnahme der Sonnenscheindauer (in WETTREG: weitere Zunahme) bei nahezu unveränderter prozentualer Bedeckung (in WETTREG: weitere Abnahme);
- weiter voranschreitender Anstieg des mittleren Meeresspiegels, des mittleren Tidehochwassers, des Windstaus und damit der Sturmflutwasserstände.

Der räumliche Vergleich der Klimaveränderungen zwischen der Küstenregion und dem Binnenland für das mittlere Jahr 2085 (s.o.) ergibt folgende Trends:

- **Küste** und **Binnenland**: Die für das 2050-Szenario genannten räumlichen Differenzen werden deutlicher. D.h., in der Küstenregion kommt es zu einer deutlicheren Zunahme des Jahresniederschlags und des Winterniederschlags bei schon heute höheren Niederschlagsmengen und im Binnenland zu einer stärkeren Temperaturzunahme im Winter bei schon heute niedrigeren winterlichen Temperaturmittelwerten.

- Die räumlichen Differenzen für die Temperaturen und Temperaturkenntage sind für das 2085-Szenario zwischen Küste und Binnenland insgesamt größer als im 2050-Szenario. Insbesondere bei der Betrachtung der oberen Spannweite wird dieses deutlich. Für den Niederschlag ist eine größere räumliche Variabilität nicht festzustellen (außer für die Regentage).

Die räumlichen Differenzen in der MPR HB-OL werden im Analysekompartiment Exposition, welches Bestandteil der Vulnerabilitätsanalyse ist, wieder aufgenommen und sektor- bzw. handlungsbereichspezifisch weiter konkretisiert.

Neben den oben aufgelisteten räumlichen Spannweiten innerhalb der MPR HB-OL existieren – wie erwähnt – auch Spannweiten, die aus den Rechnungen der verschiedenen regionalen Klimamodellen mit ihren unterschiedlichen Modellläufen unter Berücksichtigung der verschiedenen Emissionsszenarien resultieren. Folgende Einordnung der A1B-Veränderungen innerhalb der aufgeführten Spannweiten kann getroffen werden:

- Die Veränderung der Jahresmitteltemperatur liegt in der Mitte der Spannweite, die Veränderungen der Temperaturkenntage Sommertage und tropische Nächte jetzt eher im unteren Bereich sowie die Veränderungen der Frost- und Eistage im oberen Bereich der Spannweiten.
- Die Veränderungen des Gesamtniederschlags und der Starkregentage aus CLM und REMO befinden sich weiterhin am oberen Rand der Spannweiten; WETTREG zeigt mit einer Abnahme des Gesamtniederschlags ein gegenläufiges Bild und fällt aus der Spannweite heraus (s.o.).
- Die Veränderungen bezüglich Schneemenge, -bedeckung und -tage innerhalb der Spannweiten sind uneinheitlich, da auch hier z.T. nur Ergebnisse einzelner Regionalmodelle vorliegen und die Gegenwärtsläufe mit den gemessenen Werten nur wenig übereinstimmen (Biaskorrektur: s. Kap. 2.1).
- **Fazit:** Bis zum Jahr 2085 stellen die Veränderungen aus dem A1B-Emissionsszenario im Vergleich mit den Spannweiten für die Parameter Frosttage, Eistage, Gesamtniederschlag, Starkregentage und mittlere Windgeschwindigkeit ein starkes, bezüglich des Parameters Jahresmitteltemperatur ein mittleres sowie bezüglich der Parameter Sommertage, tropische Nächte, Sonnenschein und Bewölkung ein schwaches Klimasignal dar. Die WETTREG-Ergebnisse weichen weiterhin z.T. davon ab.

Die Spannweiten der nicht regional modellierten Klimaparameter Wassertemperatur, mittlerer Meeresspiegel, mittleres Tidehochwasser und Sturmflutwasserstände sind in den Kapiteln 3.4.1 bis 3.4.4 dargestellt.

3.3 Klimaparameter der regionalen Klimamodelle

Die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle erlauben Aussagen über die Veränderungen der benötigten Klimaparametergruppen Temperatur (durchschnittliche, maximale und minimale Temperatur), Temperaturkentage (Sommertage, tropische Nächte, Frosttage und Eistage), Niederschlag (Gesamtniederschlag, Regentage, Starkregentage, Schneemenge, Schneebedeckung und Schneetage), Wind (mittlere und maximale Geschwindigkeit, Sturmtage und windstille Tage), relative Luftfeuchte, Wasserdampf, Sonnenscheindauer und Bedeckungsgrad. Sie werden in den folgenden Kapiteln 3.3.1 bis 3.3.5 erläutert.

Die für die weiteren Analysen von ‚nordwest2050‘ wichtigen Veränderungen in den Extremereignissen werden einerseits aus den Klimaparametern der Regionalmodelle abgeleitet, wie z.B. Hitze- und Trockenperioden sowie Starkregenereignisse. Sie werden im Kap. 3.3.5 weiter erläutert. Die zukünftige Ausprägung des Extremereignisses Sturmflut, für die keine Erkenntnisse aus den Regionalmodellen zur Verfügung stehen, sind in Kap. 3.4.4 dargestellt.

3.3.1 Temperatur und Temperaturkentage

Die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle CLM und REMO zeigen, dass sich die durchschnittliche Jahrestemperatur in der MPR HB-OL von heute (Vergleichsperiode 1971-2000) zwischen ca. 9,3°C (Klimastation Bremen) und ca. 8,8°C (Klimastation Worpswede) bis zum mittleren Jahr 2050 um 1,5°C (mit einer Spannweite von 1 bis 2°C) und bis zum mittleren Jahr 2085 um 2,8°C (mit einer Spannweite von 1,9 bis 4,7°C) erhöht (s. Abbildung 2: Temperaturdifferenzen der durchschnittlichen Jahresmittel aus den Regionalmodellen CLM und REMO im Vergleich mit der Referenzperiode 1971-2000). Das Regionalmodell WETTREG zeigt für das 2050-Szenario eine Temperaturerhöhung von 1,4°C und für das 2085-Szenario von 2,3°C (s. Tab. 3 und Tab 4 in Kap. 3.1 sowie Tab. 5 und Tab. 6 in Kap.3.2).

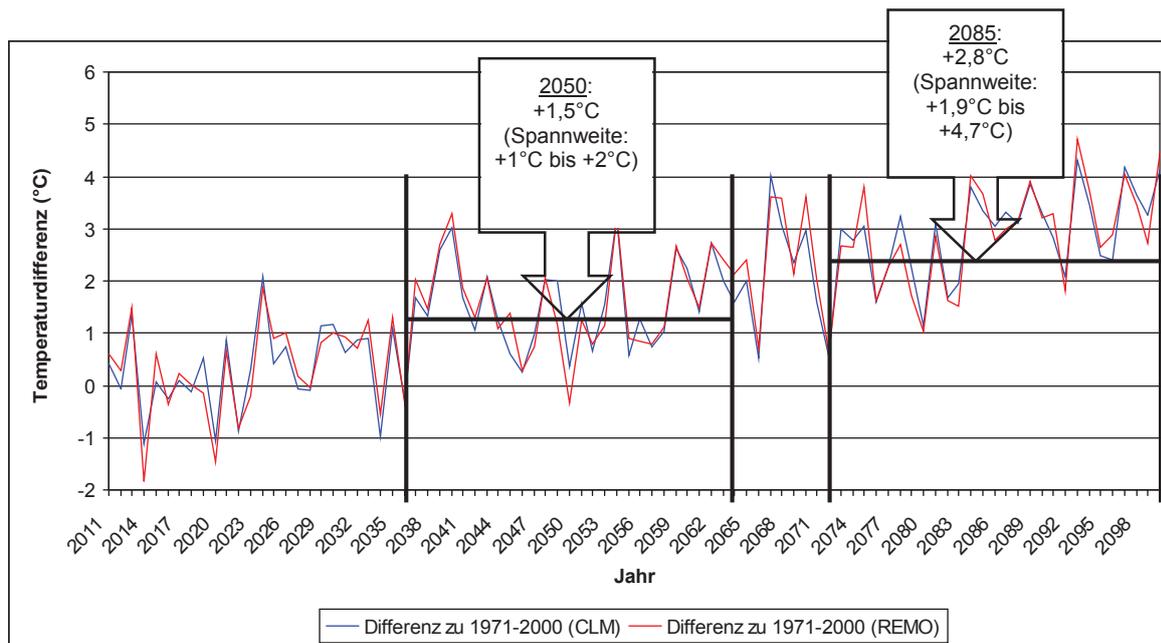


Abbildung 2: Temperaturdifferenzen der durchschnittlichen Jahresmittel aus den Regionalmodellen CLM und REMO im Vergleich mit der Referenzperiode 1971-2000.

Die Veränderungen der Temperaturkenntage¹ sind in den folgenden Abb.3, Abb. 4, Abb. 5 und Abb. 6 dargestellt.

¹ **Sommertage:** Tage, an denen die maximale Lufttemperatur mindestens einmal am Tag über 25°C steigt (Tmax. ≥ 25°C); **tropische Nächte, Tropennacht:** Tage, an denen die minimale Lufttemperatur nicht unter 20°C sinkt (Tmin. ≥ 20°C); **Frosttage:** Tage, an denen die minimale Lufttemperatur unter 0°C sinkt (Tmin. ≤ 0°C); **Eistage:** Tage, an denen die maximale Lufttemperatur nicht über 0°C steigt (Tmax. ≤ 0°C; s.a. Kap. 7).

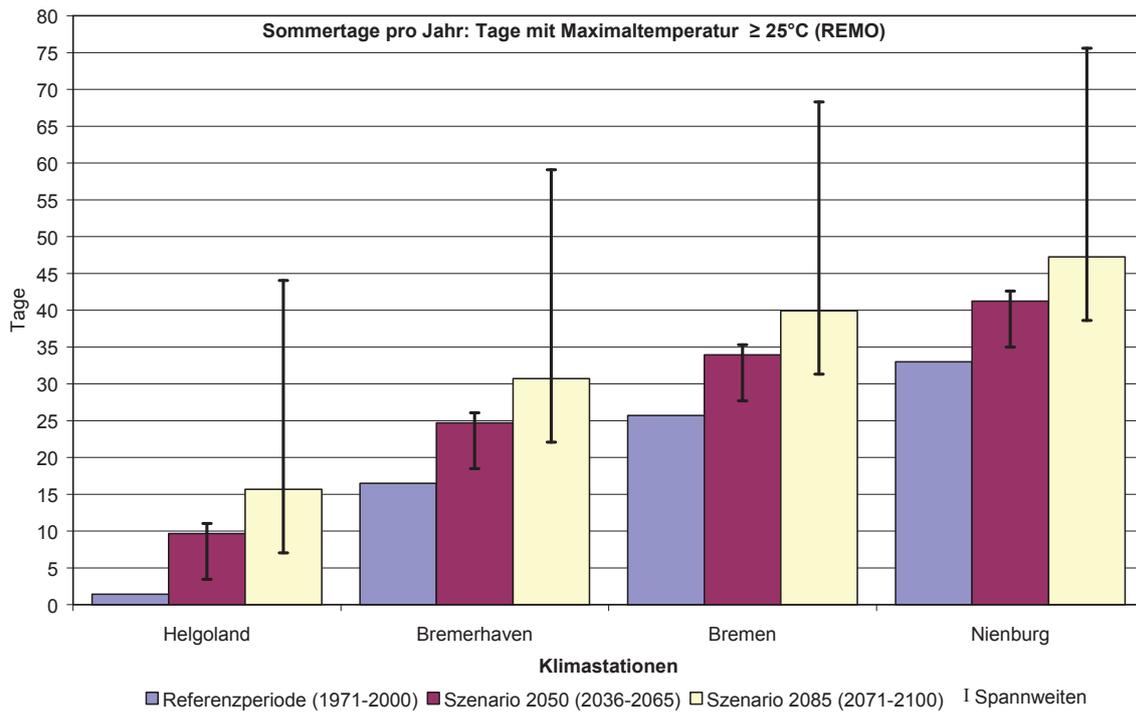
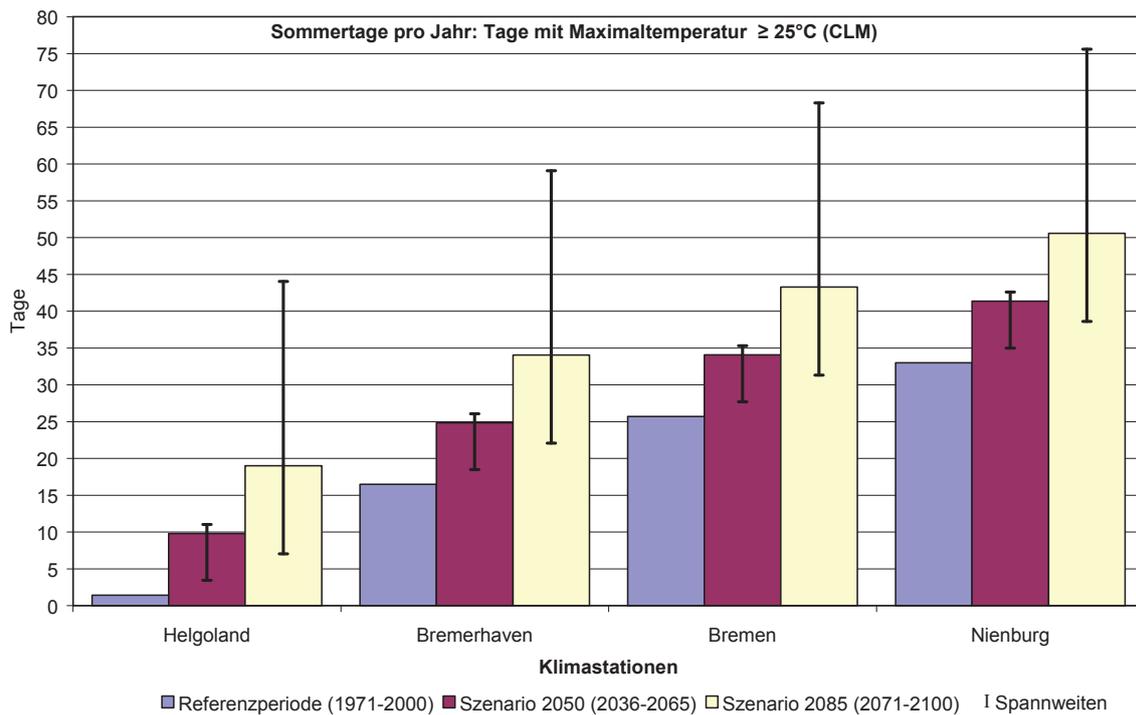


Abbildung 3: Mittlere Anzahl der Sommertage pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO).

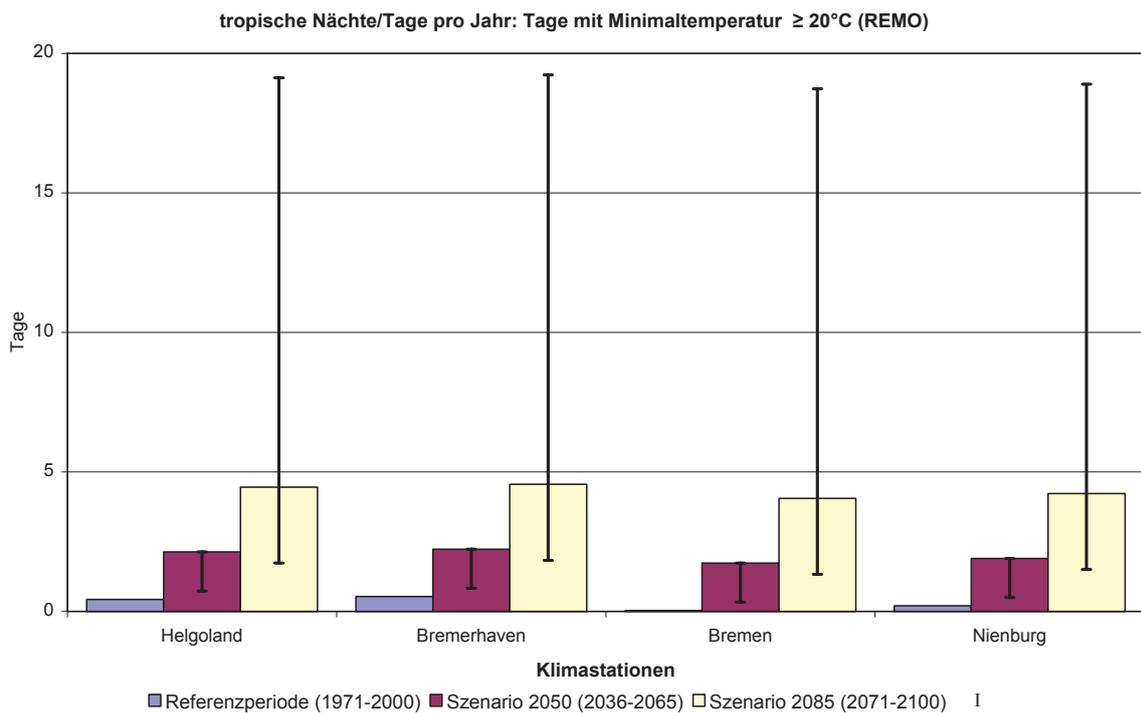
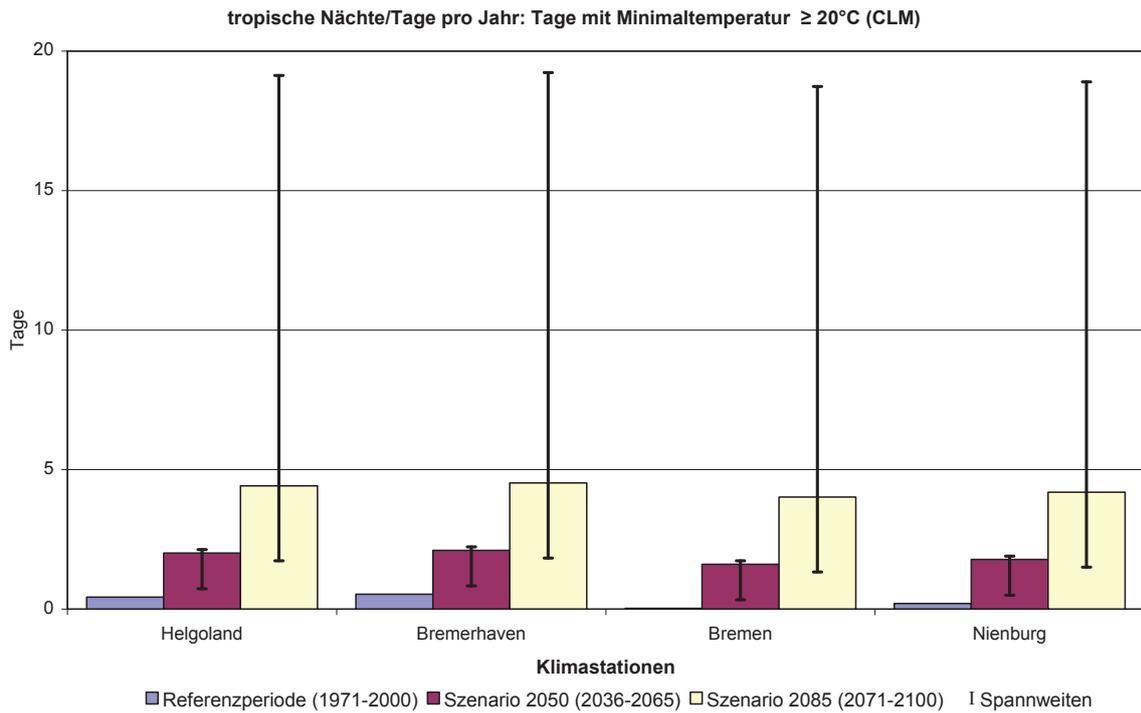


Abbildung 4: Mittlere Anzahl der tropischen Nächte pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO).

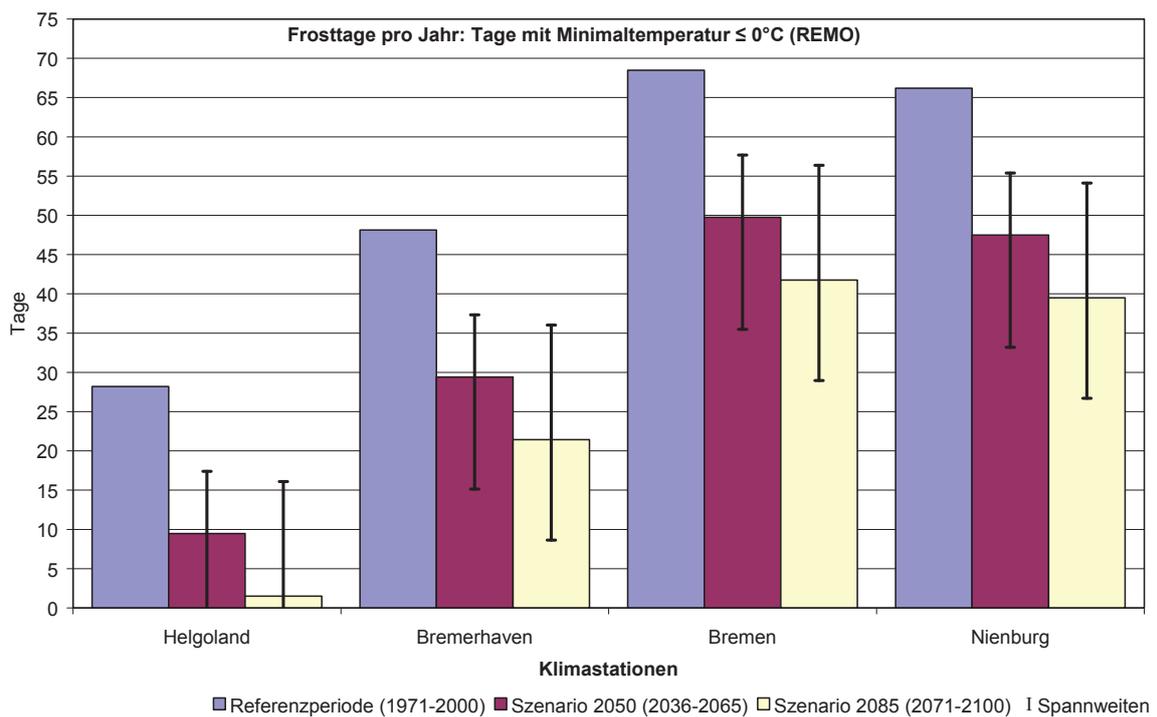
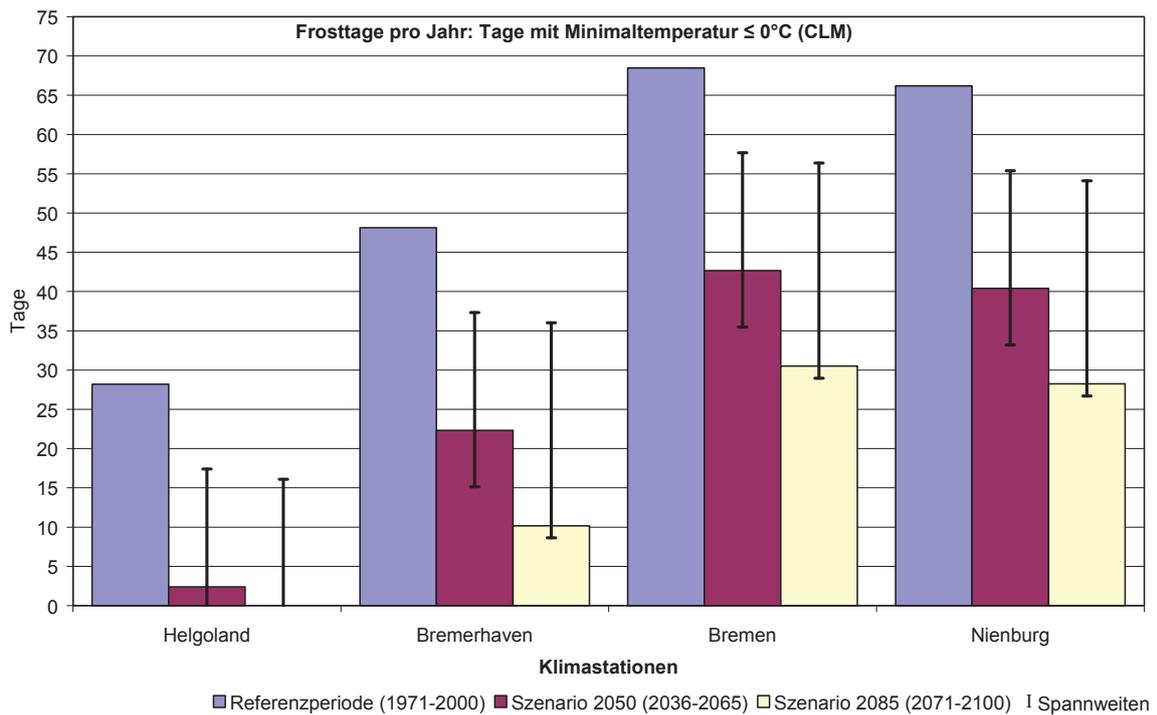


Abbildung 5: Mittlere Anzahl der Frosttage pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO).

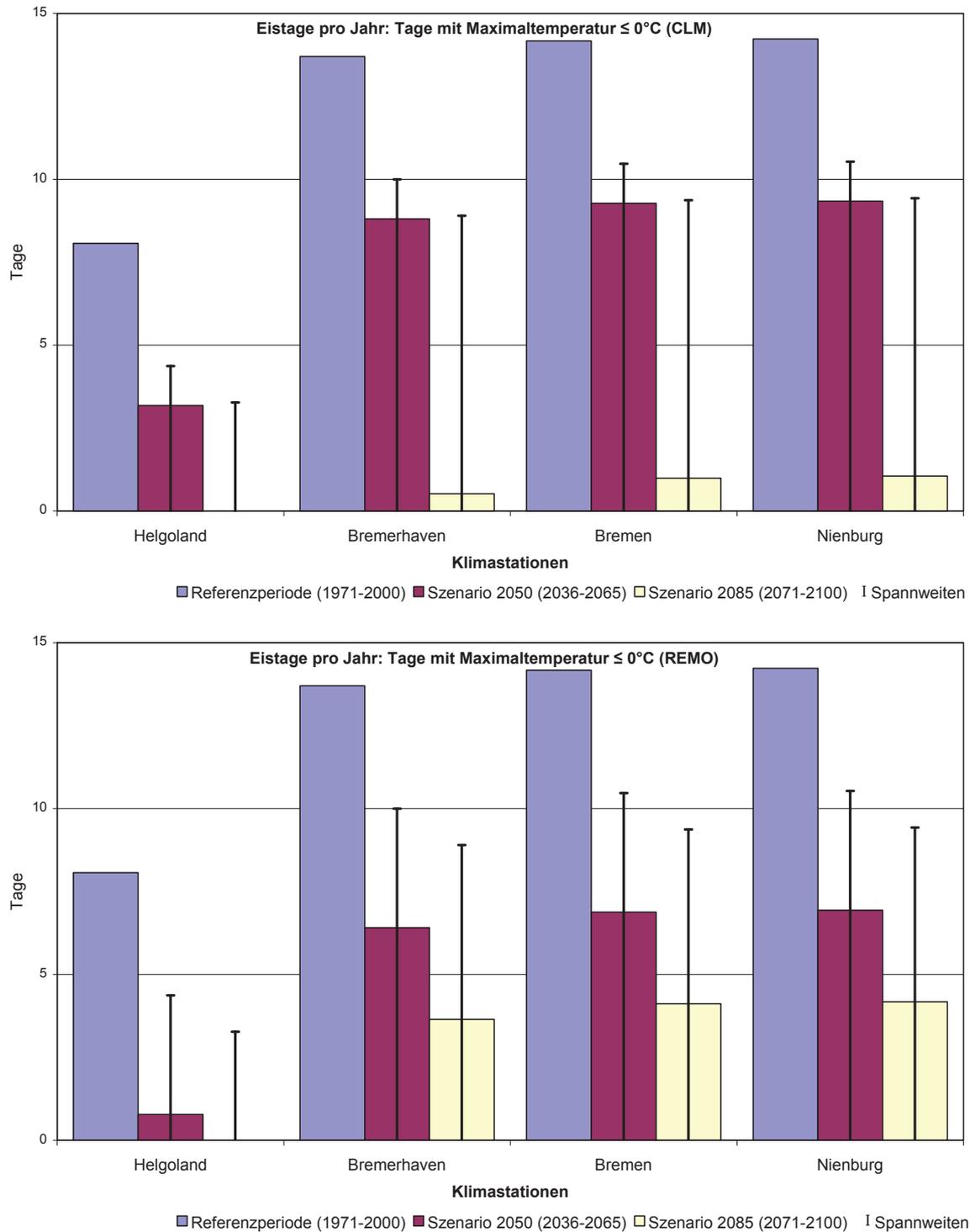


Abbildung 6: Mittlere Anzahl der Eistage pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO).

3.3.2 Niederschlag

Die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle CLM und REMO zeigen, dass sich der durchschnittliche Gesamtniederschlag in der MPR HB-OL von heute (Vergleichsperiode 1971-2000) zwischen ca. 672 mm (Bremen) und ca. 792 mm (Jever) bis zum mittleren Jahr 2050 um 8,2% (mit einer Spannweite von +3 bis +9%) und bis zum mittleren Jahr 2085 um 6% (mit einer Spannweite von -1 bis +10%) erhöht. Die Ergebnisse des regionalen Klimamodells WETTREG weichen davon ab: Für das 2050-Szenario ist eine Abnahme um 1% und für das 2085-Szenario eine Abnahme um 3,4% festzustellen (s. Tab. 3 und Tab 4 in Kap. 3.1 sowie Tab. 5 und Tab. 6 in Kap. 3.2).

Deutlicher werden die klimawandelbedingten Niederschlagsänderungen bei der Betrachtung der saisonalen Niederschlagsverteilung. Während für CLM und REMO im Sommer Rückgänge von ca. 3% bis 2050 (Spannweite zwischen -13% und +8%) bzw. ca. 17% bis 2085 (zwischen -9% und -46%) zu verzeichnen sind, wird es im Winter zu höheren Niederschlagsmengen von +8% bis 2050 (zwischen +9 bis +27%) bzw. +25% bis 2085 (zwischen +17 bis +44%) kommen. Auch für den Herbst nimmt die Niederschlagsmenge zu: ca. +20% für das 2050-Szenario und ca. +13% für das 2085-Szenario. Die Niederschlagsänderungen für den Frühling betragen +6% (2050-Szenario) und +9% (2085-Szenario). Die entsprechenden Veränderungen in Millimeter für das Modell CLM zeigt Abb. 7 und für das Modell WETTREG Abb. 8.

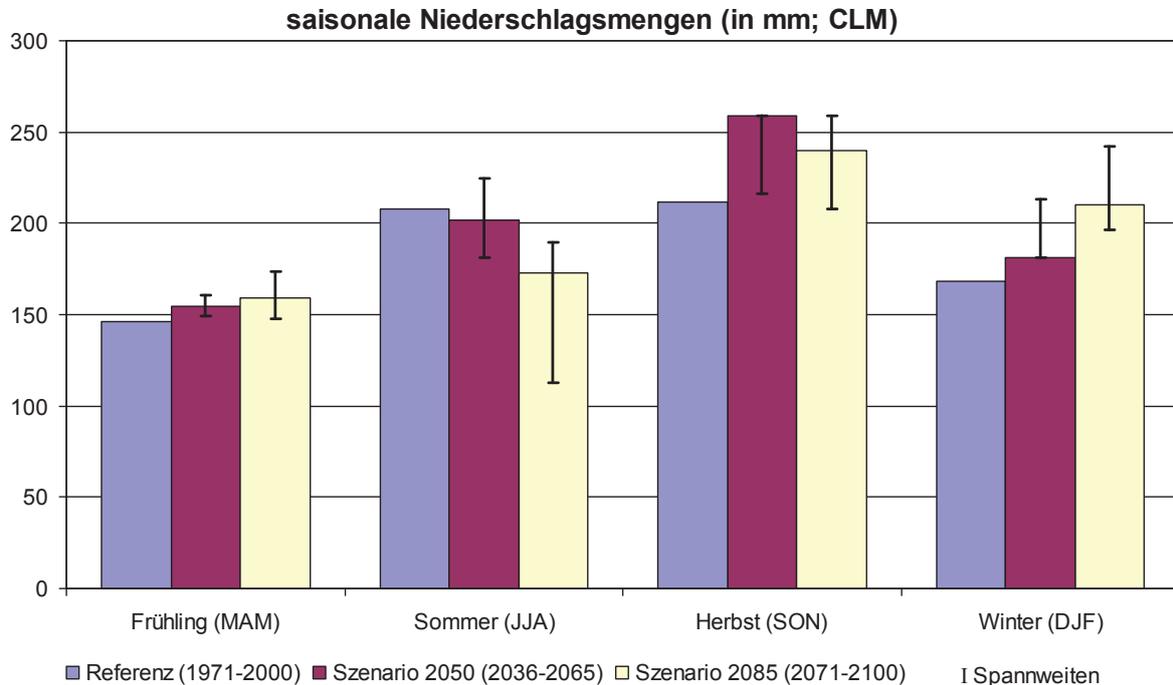


Abbildung 7: Saisonale Verteilung der Niederschlagsmengen für die Referenzperiode sowie die Szenarien 2050 und 2085 für CLM.

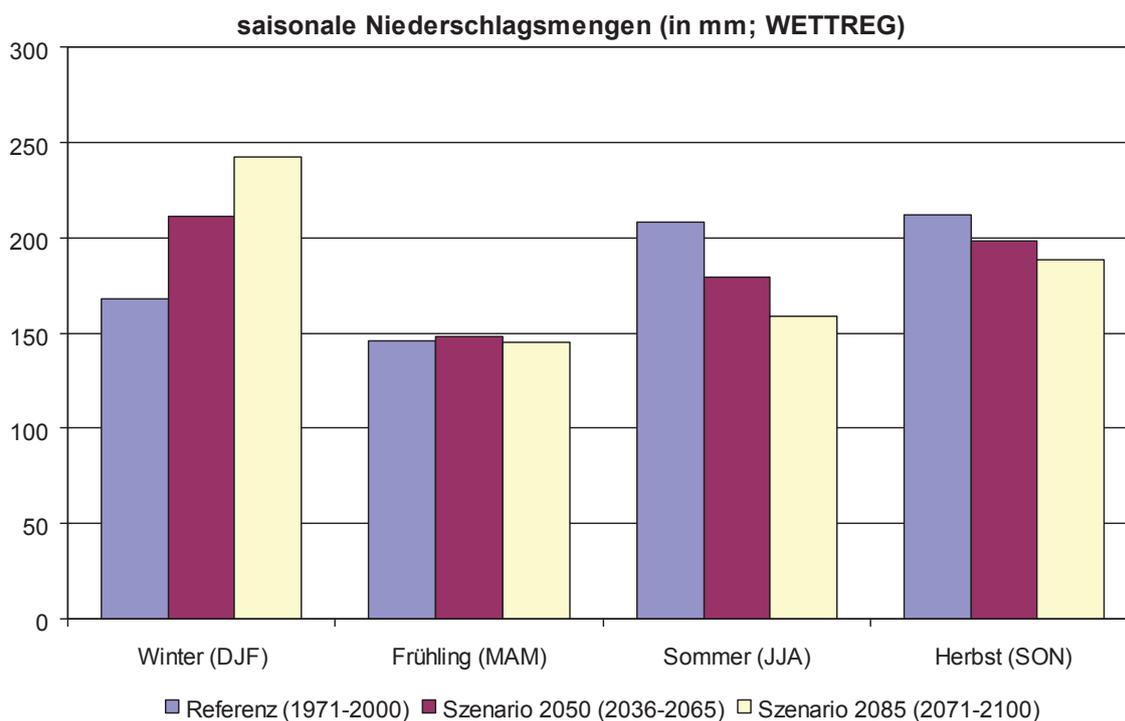


Abbildung 8: Saisonale Verteilung der Niederschlagsmengen für die Referenzperiode sowie die Szenarien 2050 und 2085 für WETTREG (keine Spannweitenbetrachtung).

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 ist daher einerseits eine Abnahme der mittleren Niederschläge festzustellen (s.o.), andererseits nimmt aber die Anzahl von Starkregentagen im Jahresmittel leicht zu (s. Kap. 3.3.5), während die Zahl der Regentage² pro Jahr im 2050-Szenario um ca. 4 Tage abnimmt und im 2085-Szenario um ca. 4 Tage zunimmt (s. Abb. 9).

² **Regentage:** Tage, an denen die Niederschlagsmenge (Schnee und Regenwasser) größer 1 mm beträgt (Niederschlagsmenge > 1 mm).

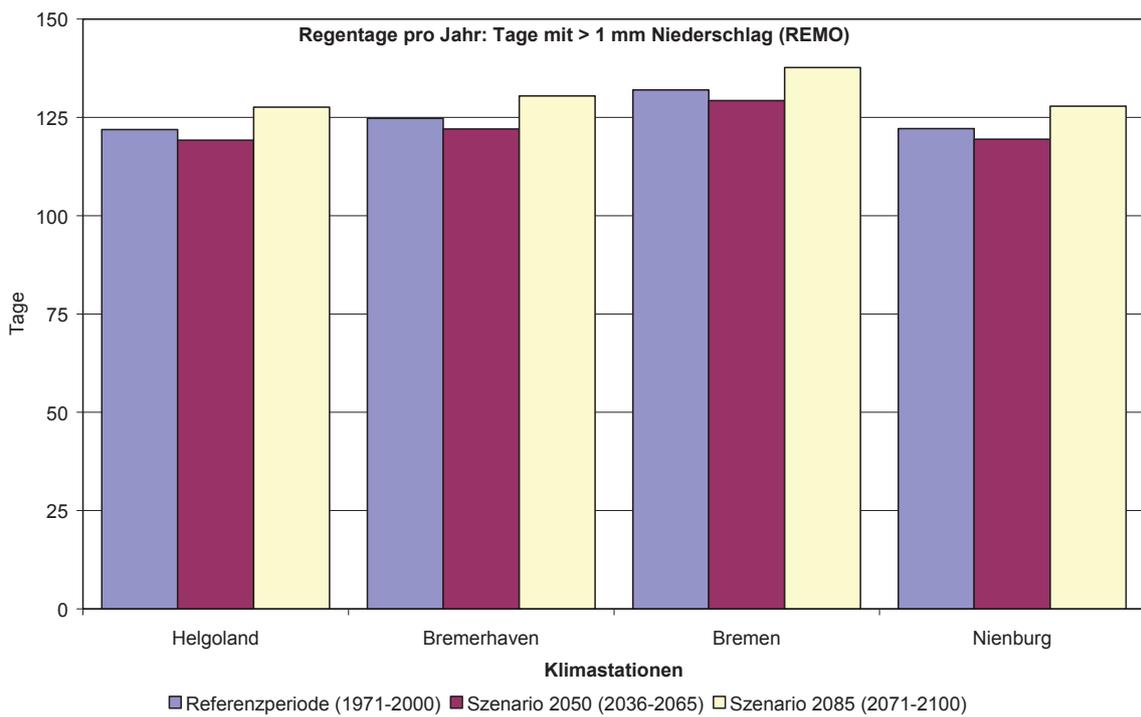
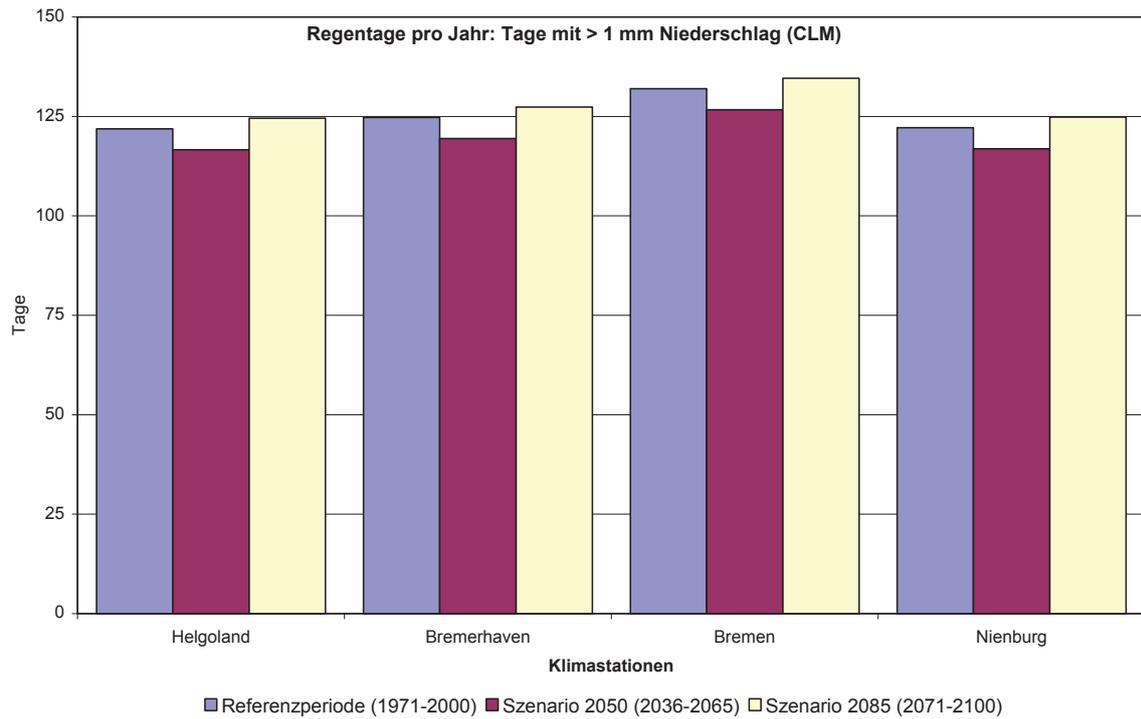


Abbildung 9: Mittlere Anzahl der Regentage pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO, Spannweiten nicht vorhanden).

Aufgrund steigender Temperaturen (s.o.), die zu einer Verringerung der Schneemenge³ um ca. 60% bis 2050 (Spannweite: -92 bis -38%) bzw. 70% bis 2085 (Spannweite: -93 bis -51%) führt, nehmen auch die Tage mit Schneebedeckung⁴ ab: für CLM im 2050-Szenario um ca. -2,4 Tage (Spannweite: -10 bis 0 Tage) und im 2085-Szenario um ca. -3,5 Tage (Spannweite -10 bis 0 Tage). Auf der Nordseeinsel Helgoland kann daher unter Berücksichtigung der Spannweiten die mittlere Zahl der Tage mit Schneebedeckung pro Jahr auf Null sinken (Abb. 10). Die Veränderungen in der Anzahl der Schneetage⁵ ist in der Abb. 11 für CLM und REMO dargestellt.

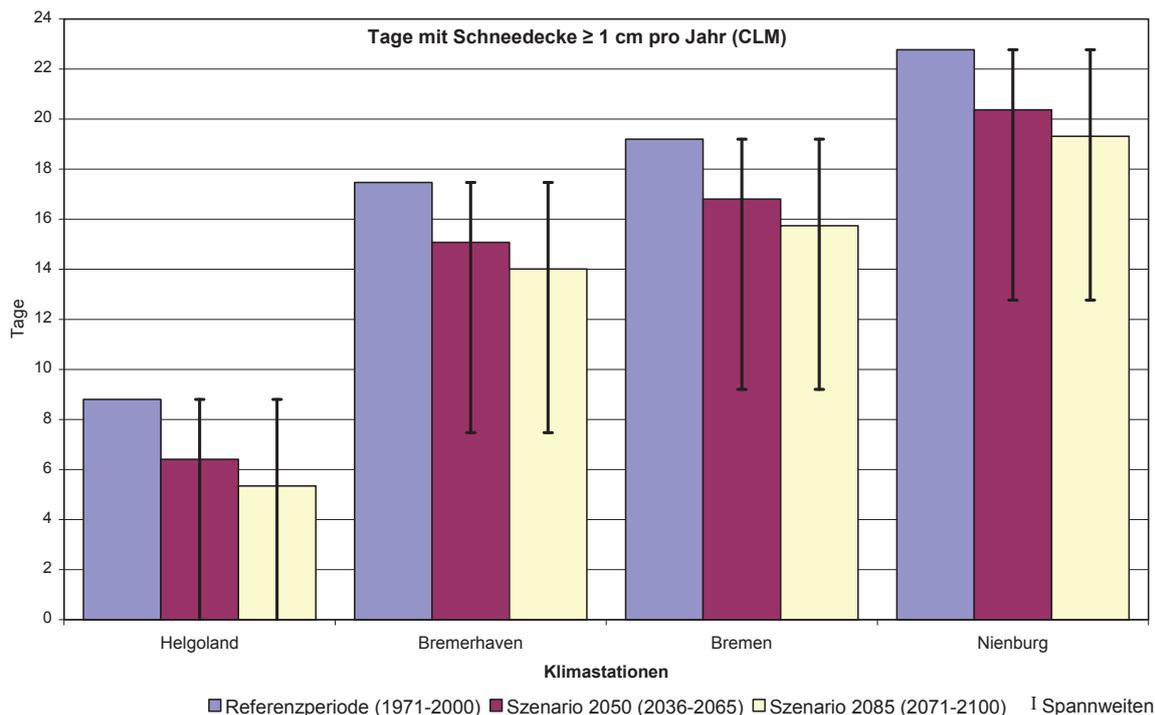


Abbildung 10: Mittlere Anzahl der Tage mit Schneedecke pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (CLM).

³ Die **Schneemenge** wird als Schneewasseräquivalent angegeben. Das ist die Wassermenge in mm, die man erhält, wenn man eine Schneedecke mit bekannter Höhe und Dichte zum Schmelzen bringt.

⁴ **Schneebedeckung**: Zahl der Tage, an denen die Schneedecke größer oder gleich 1 cm ist.

⁵ **Schneetage** sind solche Tage, an denen sich der gefallene Niederschlag ausschließlich aus Schneewasser zusammensetzt.

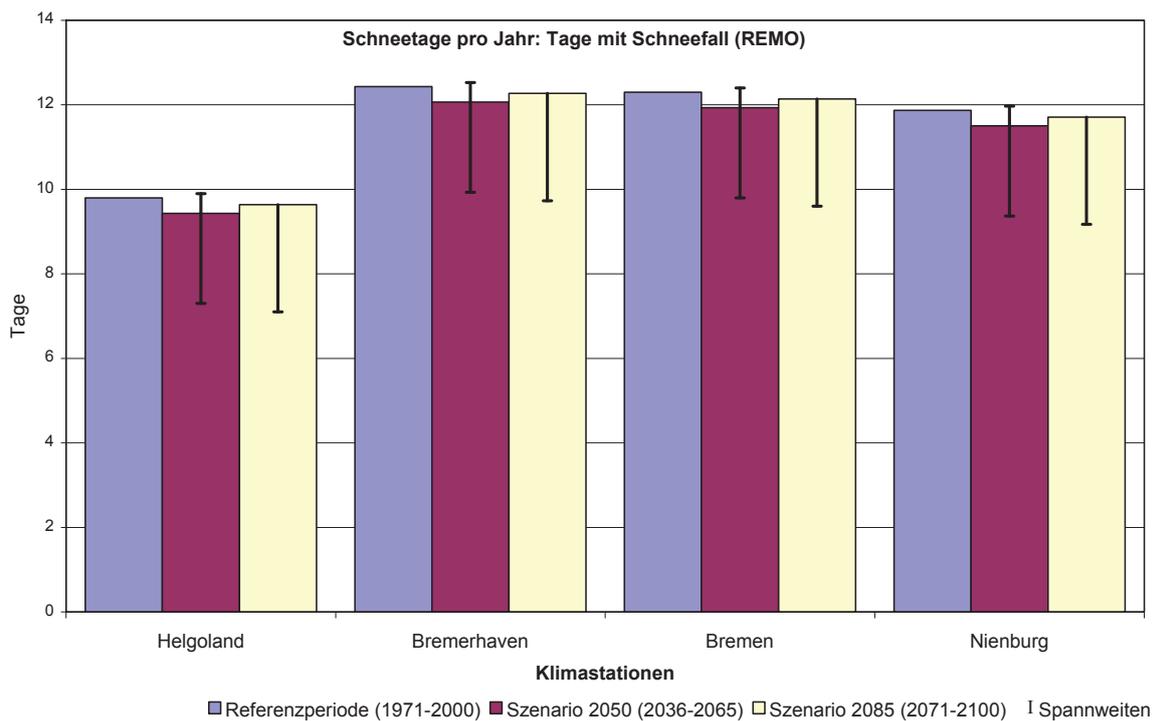
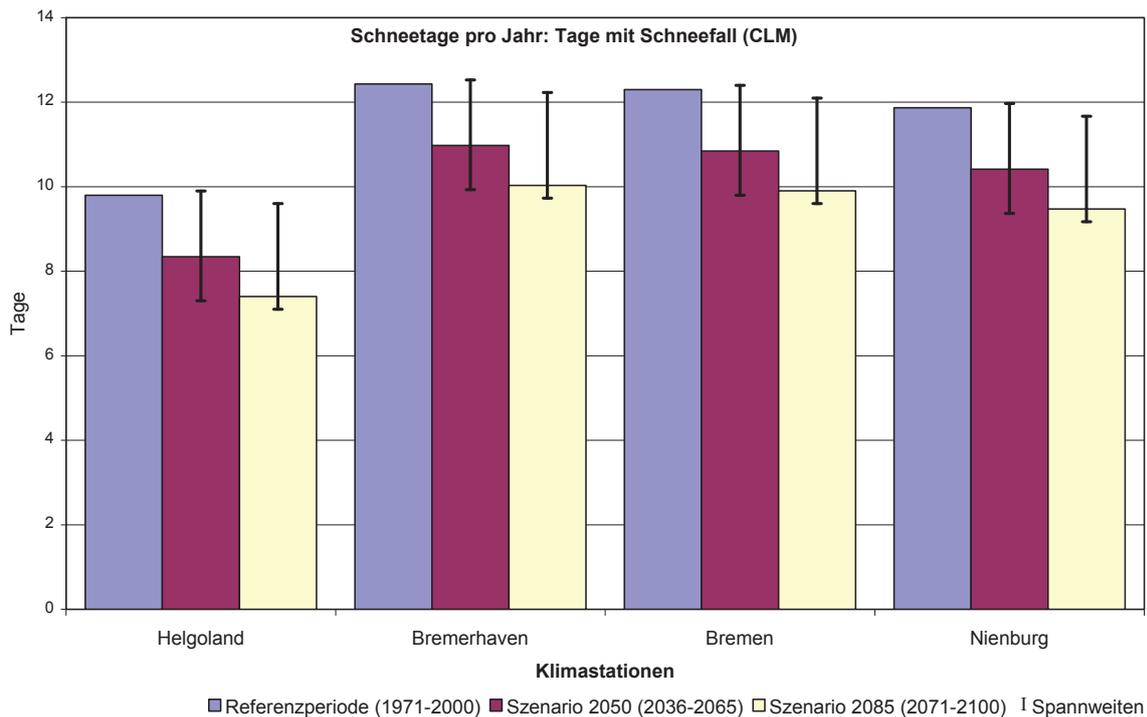


Abbildung 11: Mittlere Anzahl der Schneetage pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO).

Mit der Veränderung der Niederschlagsmengen, insbesondere der Zunahme der winterlichen Niederschläge und eines schnelleren Schneeabschmelzverhaltens, kann sich auch das Hochwasser- und Überschwemmungsrisiko erhöhen (Nds. MUK 2009)⁶. So unterliegt das Weserästuar auch den landseitigen Folgen der veränderten Abflüsse aus dem Wesereinzugsgebiet. Für die Süßwasserzufuhr in die norddeutschen Ästuarie (Oberwasser) bedeutet dies für das Sommerhalbjahr infolge der Zunahme der Evapotranspiration eine mögliche deutliche Abnahme, während im Winterhalbjahr eine Zunahme mit längeren Hochwasserphasen sicher zu erwarten ist. Zu gleichen Tendenzen kommen Maniak et al. (2005) für das Projekt KLIMU, für das sie eine Abnahme des Abflusses um etwa 10% im Spätsommer errechnen und eine Zunahme der Jahressumme des Oberwasserzuflusses zwischen 8% und 11%. 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).

3.3.3 Wind

Die zunehmende und regional unterschiedliche Erwärmung der Atmosphäre wird sich auf die Windintensität und möglicherweise auch auf die Windrichtung auswirken. Die Ergebnisse für die ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien sind in Kap. 3.1 und Kap. 3.2 aufgeführt.

Für die Charakterisierungen der Veränderungen in den Windverhältnissen werden die mittlere Windgeschwindigkeit⁷ und die Anzahl der windstillen Tage⁸ verwendet (die Klimaparameter Sturmintensität und Sturmtage werden in Kap. 3.3.5 beschrieben). Die Veränderungen der mittleren Windgeschwindigkeit sind in Abb. 12 aufgeführt.

⁶ Die Konsequenzen einer veränderten Niederschlagsverteilung für die Abflüsse sind Bestandteil der Niederschlags-Abflussmodellierung, die aktuell in Bearbeitung ist.

⁷ **Mittlere Windgeschwindigkeit:** mittlerer Betrag des Windvektors in 10 Meter Höhe.

⁸ **Windstille Tage:** Tage, an denen die maximale Windgeschwindigkeit 12 km/h (Beaufort-Skala 2 = leichte Brise) unterschreitet ($V_{\max.} < 12 \text{ km/h}$)

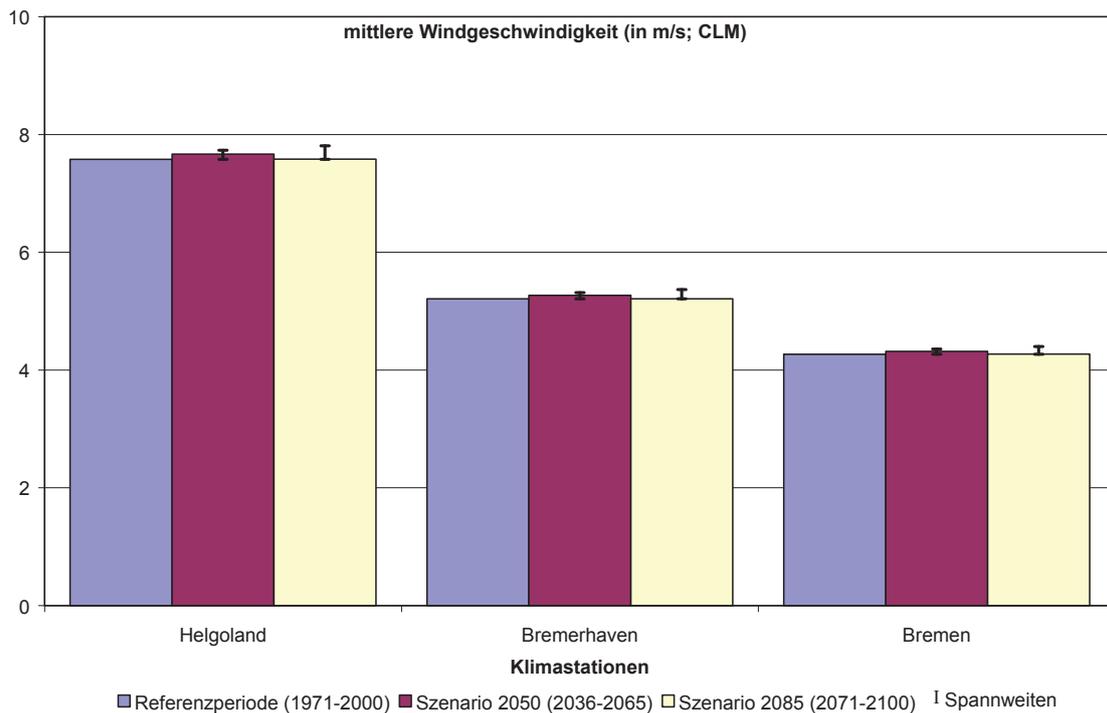


Abbildung 12: Mittlere jährliche Windgeschwindigkeit für drei Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (CLM).

Die Ergebnisse über die Veränderungen in der Anzahl der windstillen Tage für das A1B-Szenario stehen ebenso wie die Veränderungen der Windrichtung bzw. der Windhäufigkeitsverteilung bestimmter Richtungssektoren noch aus; sie werden in der regionalen klimawandelbezogenen Vulnerabilitätsanalyse bei den hiervon betroffenen Sektoren bzw. Handlungsbereichen aufgenommen. Die Spannweiten bezüglich der windstillen Tage betragen für das 2050-Szenario - 0,2 bis +0,8 Tage und für das 2085-Szenario -0,8 bis +0,7 Tage bei heutigen Werten (1971-2000) in der MPR HB-OL von 0,47 Tagen (Bremerhaven), 0,2 Tagen (Cuxhaven) und 2,1 Tagen (Bremen).

3.3.4 Sonnenscheindauer, Bewölkung, Luftfeuchte und Wasserdampf

Die Ergebnisse der Regionalmodelle für die Klimaparameter Sonnenscheindauer⁹, Bewölkungs- bzw. Bedeckungsgrad sind in Abb. 13, Abb. 14 und Abb. 15 dargestellt (s.a. Kap. 3.1 und Kap. 3.2). Es ist zu erkennen, dass sich die Ergebnisse für die zukünftige Sonnenscheindauer zwischen den beiden Modellen CLM und WETTREG unterscheiden (REMO-Daten für Sonnenschein nicht vorhanden): Während in CLM eine geringe Abnahme berechnet wird, ist in WETTREG eine deutlich Zunahme festzustellen. Bezüglich des Bewölkungsgrads unterscheiden sich die Berechnungen der beiden Modell CLM und REMO nicht wesentlich: bei beiden ist eine geringe Zunahme zu beobachten. Für das Modell WETTREG wird hingegen eine Abnahme berechnet, wobei sich die Veränderungen für 2050 und 2085 nicht wesentlich unterscheiden (keine Spannweitenbetrachtung für WETTREG: s. Kap. 2.4).

⁹ **Sonnenscheindauer:** stündlicher Wert, beim dem die direkte einfallende kurzwellige Sonnenstrahlung 120 W/m² übersteigt.

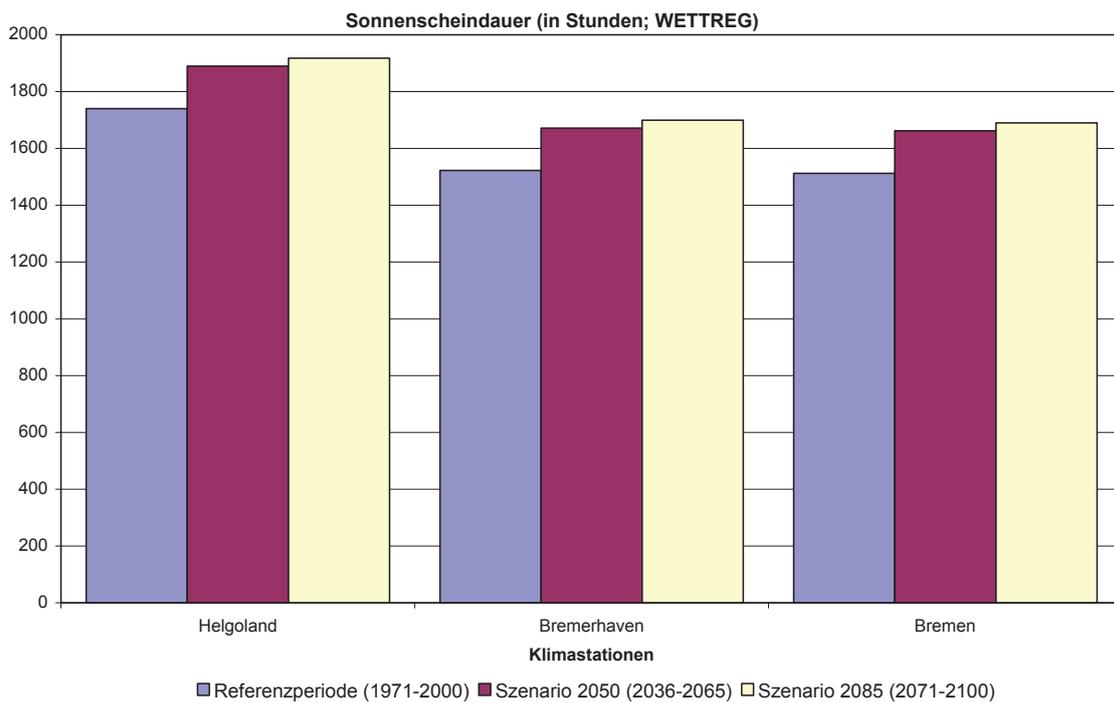
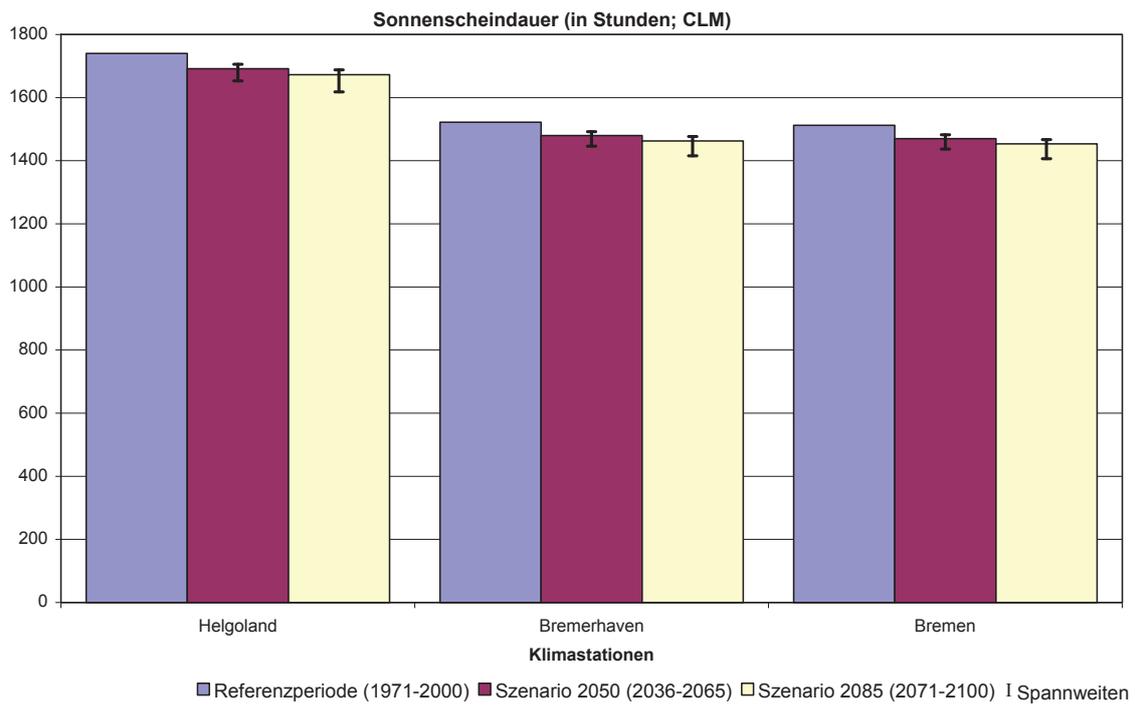


Abbildung 13: Mittlere jährliche Sonnenscheindauer für drei Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (CLM oben, WETTREG unten und ohne Spannweiten).

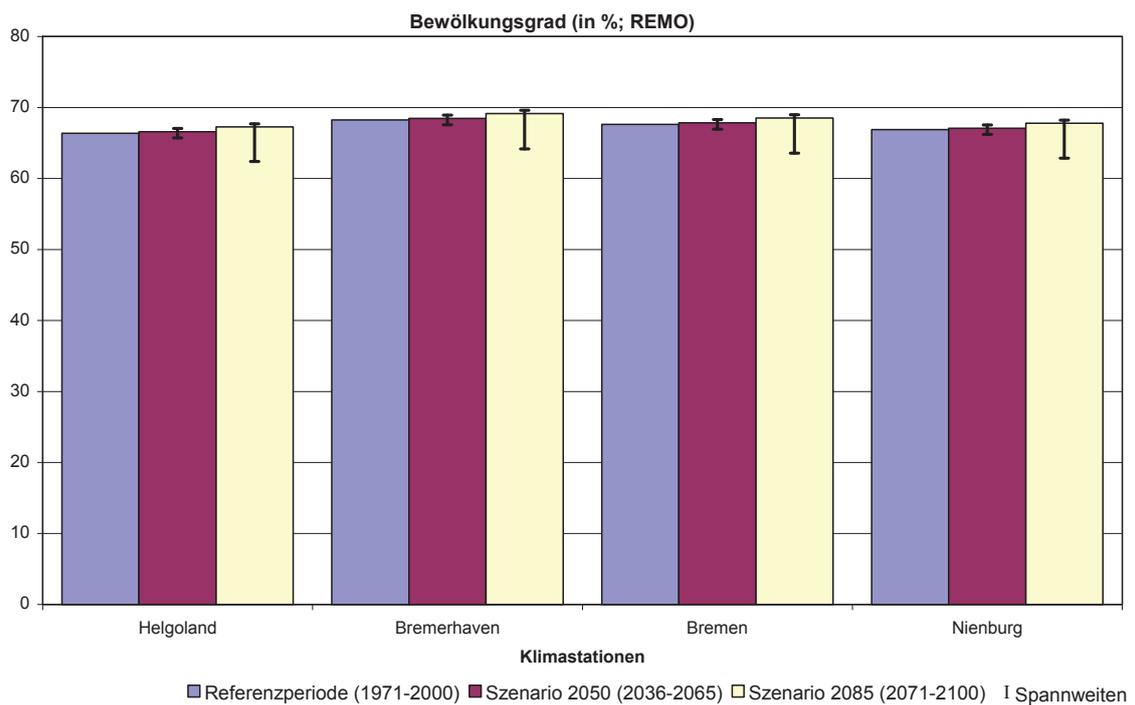
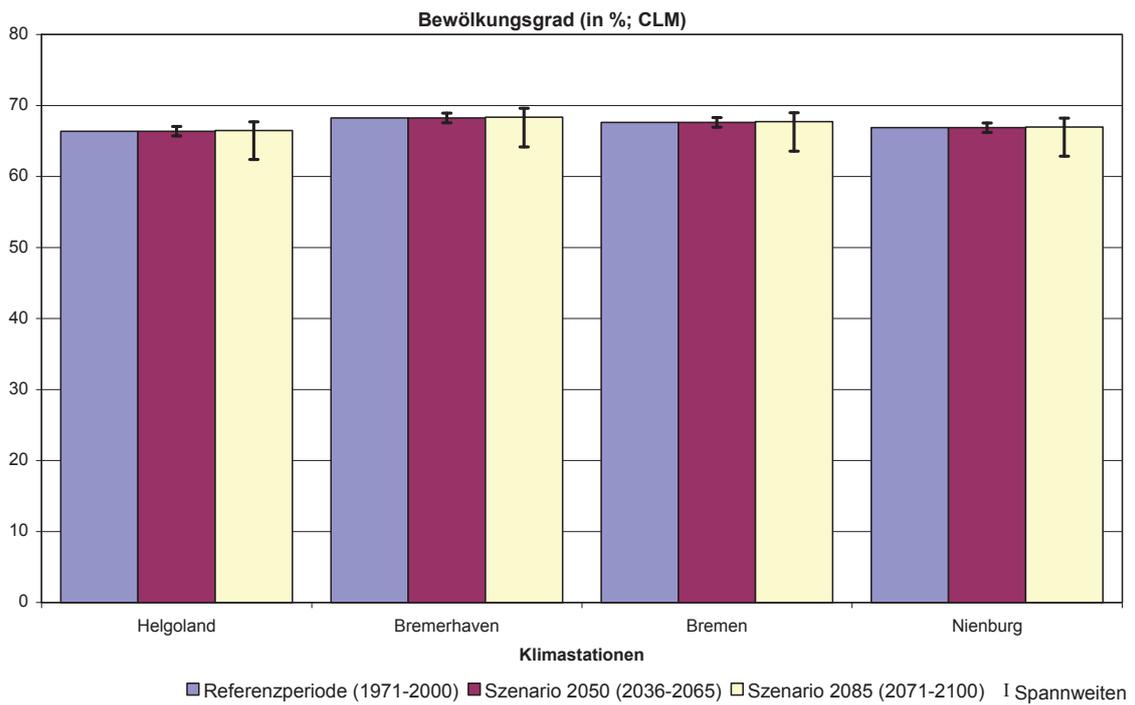


Abbildung 14: Mittlerer Bewölkungsgrad pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO).

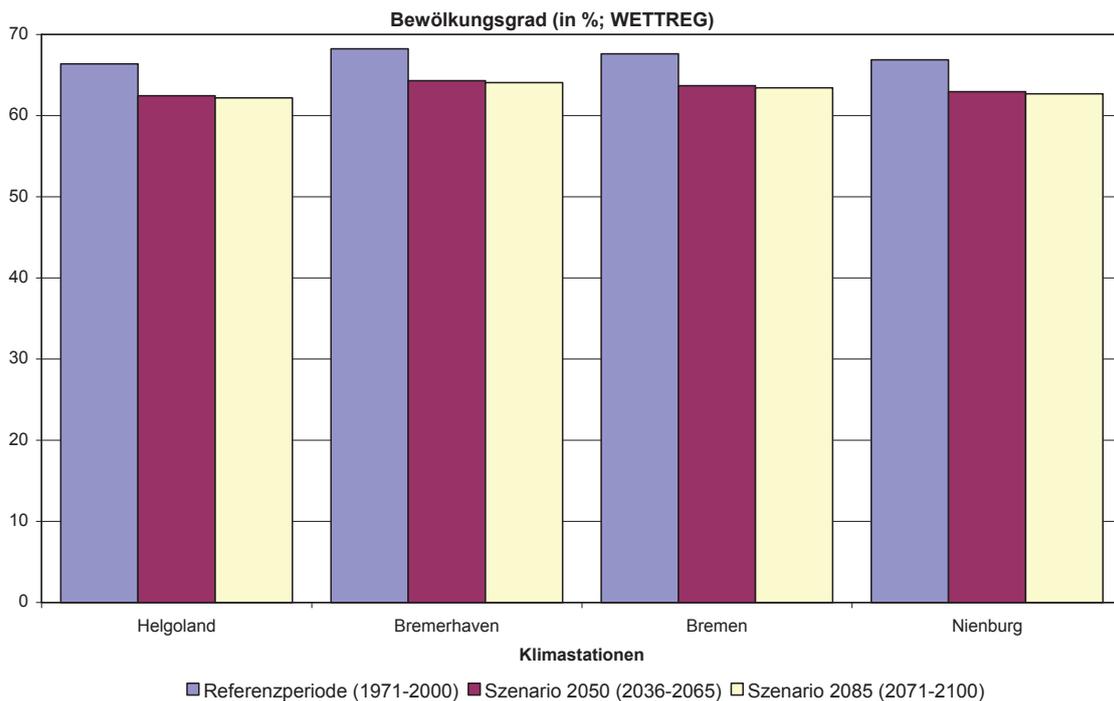


Abbildung 15: Mittlerer Bewölkungsgrad pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (WETTREG).

Die Ergebnisse über die zukünftigen Veränderungen der relativen Luftfeuchte¹⁰ und des Wasserdampf¹¹ aus den Regionalmodellen CLM und REMO sowie die des Dampfdrucks¹² aus dem Modell WETTREG stehen noch aus. Auch sie werden gegebenenfalls weiter bearbeitet und dann im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse zur Bestimmung der Exposition aufgenommen.

3.3.5 Extremereignisse aus den regionalen Klimamodellen

Extremereignisse zeichnen sich durch eine kurzzeitige, aber sehr starke Abweichung der Werte von den klimatischen Mittelwerten in einer Region aus. Dieses sind z.B. Hitzewellen, Trockenperioden, Starkniederschläge und Stürme¹³ (s.a. Kap. 7). 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).

¹⁰ **Relative Luftfeuchte** ist ein Relativmaß für den Grad der Sättigung der Luft mit Wasserdampf; definiert als der aktuelle Dampfdruck im Verhältnis zum Sättigungsdampfdruck über Wasser bei vorgegebener Lufttemperatur. Die spezifische Feuchte ist eine konservative Größe, da Massen im Gegensatz zu Volumina (bei Temperaturänderung) konstant bleiben.

¹¹ **Wasserdampf** (bodennaher Wasserdampfgehalt): definiert als die Masse des Wasserdampfes im Verhältnis zur Masse der feuchten Luft, angegeben für das 850 hPa-Druckniveau.

¹² **Dampfdruck**: bezeichnet den Partialdruck des Wasserdampfes (in hPa).

¹³ Definitionen für extreme Klimaereignisse sind z.T. dem europäischen Forschungsprojekt MICE („Modelling the Impact of Climate Extremes“: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/projects/mice/>) entnommen.

Der Klimawandel wird sich jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit 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 andauern können. Eine mögliche erhöhte Variabilität im Wetter- und Klimageschehen mit z.B. weiterhin vorkommenden Spät- und/oder Frühfrösten sowie Temperaturstürzen kann zu nachteiligen Auswirkungen auf Ökosysteme und Gesellschaft führen (Schuchardt et al. 2008).

Bisher herrscht noch große wissenschaftliche Unsicherheit darüber, wie sich der Klimawandel auf die Häufigkeit von Stürmen auswirken wird (Schirmer & Wittig 2007) und entsprechende Ergebnisse werden noch kontrovers diskutiert (Storch et al. 1997, 2005). Die Regionalmodelle zeigen eine Zunahme der Sturmintensität¹⁴ und eine Zunahme der Anzahl der Winterstürme. Eine Zunahme von Tagen mit extrem hohen Windgeschwindigkeiten für Norddeutschland wird als wahrscheinlich erachtet (Meinke 2007, Nds. MUK 2009). Auch nach Jonas et al. (2005) nehmen die Häufigkeiten extremer täglicher Windmaxima im Winter tendenziell zu und im Sommer ab, wobei insbesondere die Stärke der nördlichen und westlichen Winterstürme zunehmen könnte. Allerdings sind die Aussagen der regionalen Klimamodelle bezüglich veränderter Windrichtungen nicht eindeutig und die Auswertung der Daten aus den Modellen CLM und REMO ist noch nicht abgeschlossen (s.o.).

Für die maximalen Windgeschwindigkeiten kann festgestellt werden, dass sie sich im Winter deutlich stärker erhöhen als im Jahresmittel (im Jahresmittel Zunahme um ca. 4% für 2050-Szenario und um ca. 11% für 2085-Szenario), während sie im Sommer im Mittel leicht abnehmen. Die Veränderungen in den maximalen Windgeschwindigkeiten zeigt Abb. 16.

¹⁴ **Sturmintensität** (maximale Windgeschwindigkeit): maximaler Betrag des Windvektors in 10 Meter Höhe.

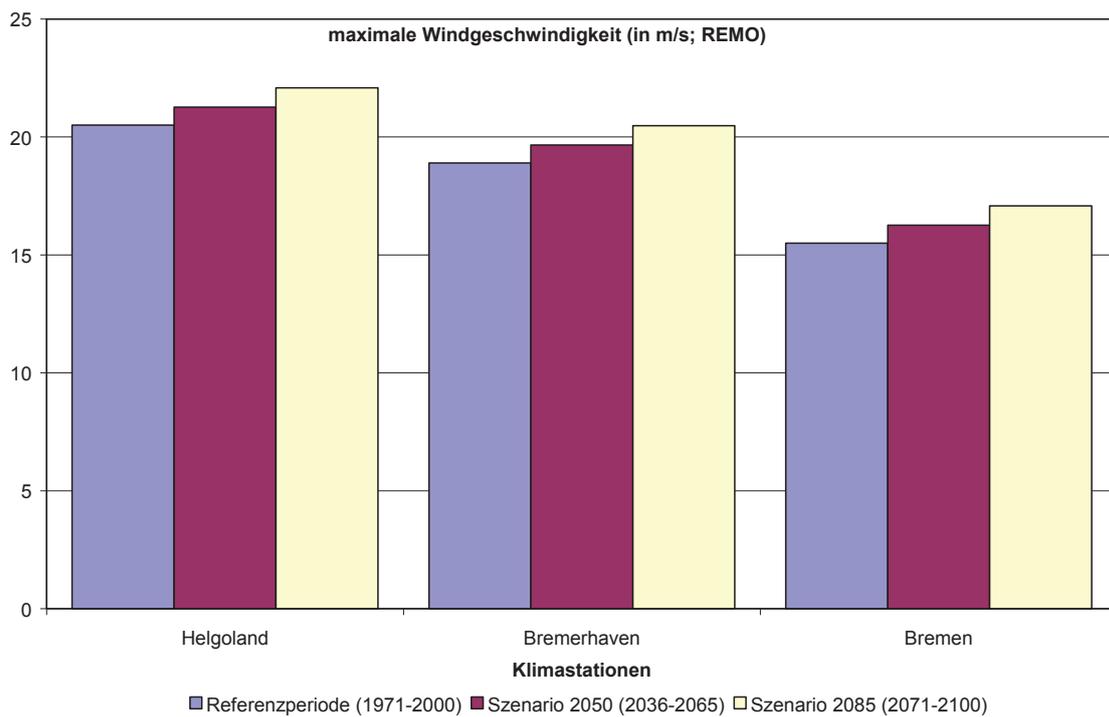
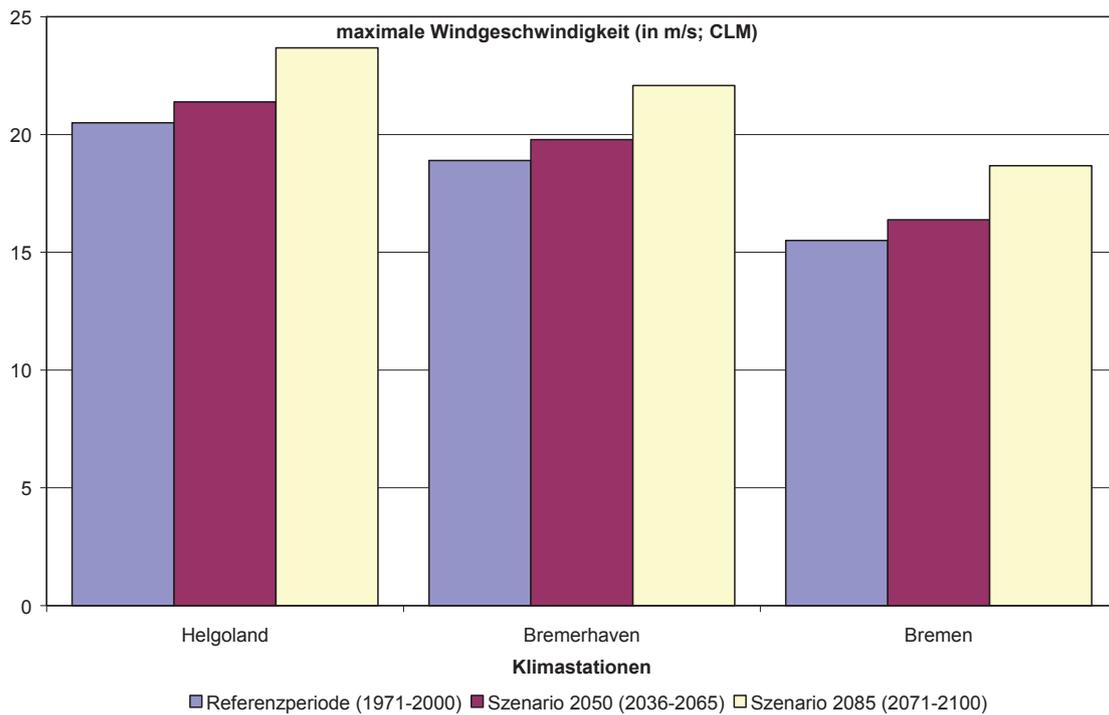


Abbildung 16: Maximale Windgeschwindigkeiten (Sturmintensitäten) für drei Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO; Spannweiten sind nicht verfügbar).

Die Veränderung in der Zahl der Sturmtage¹⁵ für das A1B-Emissionsszenario wird aktuell noch ausgewertet und gegebenenfalls in die Analysen der Vulnerabilität der davon betroffenen Sektoren oder Handlungsbereiche aufgenommen. Die Spannweiten betragen für das 2050-Szenario im Jahresmittel -1,3 bis +3 Tage und für das 2085-Szenario im Jahresmittel -1,5 bis +3 Tage; die Werte für die Referenzperiode 1971-2000 betragen ca. 31 Tage für Helgoland, ca. 8 Tage für Bremerhaven und ca. 2,5 Tage für Bremen.

Wie in Kap. 3.3.2 erwähnt, ist im Klimawandel mit einer Intensivierung des Wasserkreislaufs zu rechnen (Jacob 1998). Dadurch verändern sich nicht nur die mittleren Niederschlagsmengen, sondern auch die Häufigkeit von Starkregenereignissen, wie anhand der zukünftigen Anzahl von Starkregentagen¹⁶ nachgewiesen werden kann (s. Abb. 17).

¹⁵ **Sturmtage:** Tage, an denen die maximale Windgeschwindigkeit 62 km/h (Beaufort-Skala 8 = stürmischer Wind) überschreitet ($V_{max.} > 62$ km/h) (hier wird der Definition des Norddeutschen Klimaatlas gefolgt und nicht MICE, wo Sturmtage als Tage mit Windgeschwindigkeiten über 25 m/s = 90 km/h definiert werden).

¹⁶ **Starkregentage:** Tage mit Niederschlagsmengen größer oder gleich 20 mm.

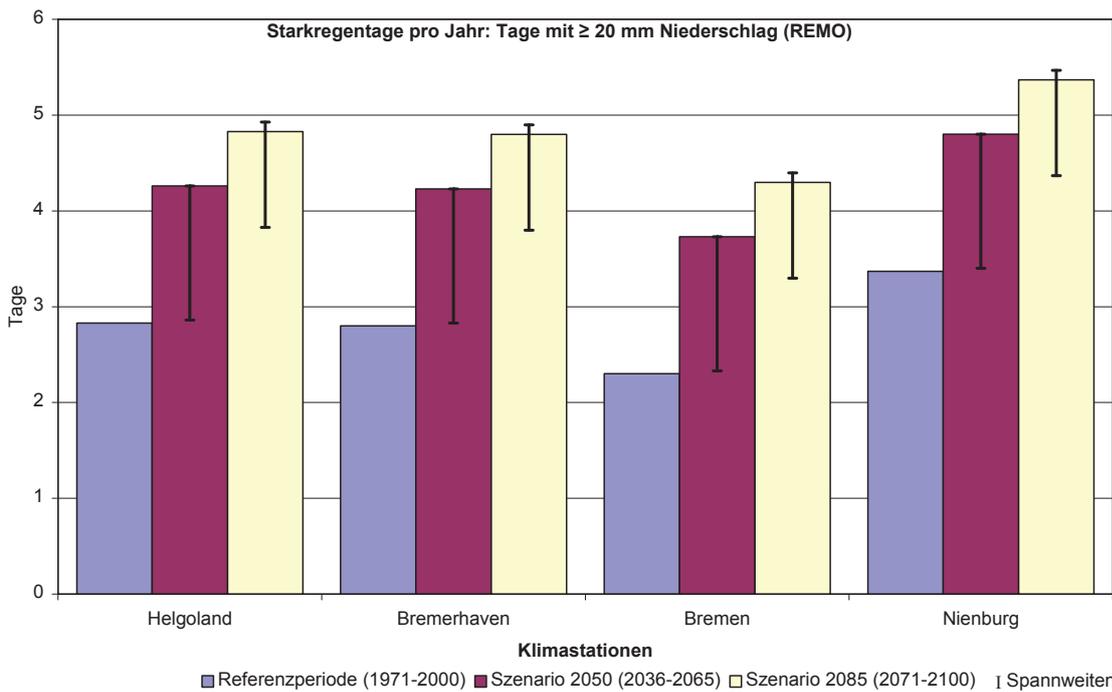
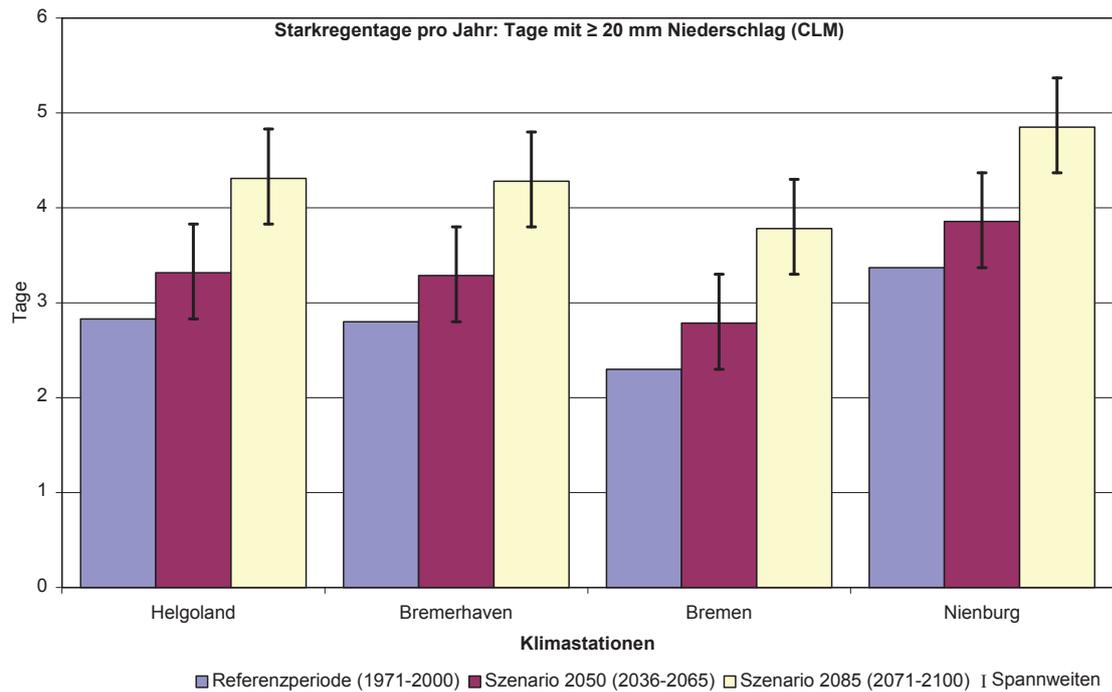


Abbildung 17: Mittlere Anzahl der Starkregentage pro Jahr für vier Klimastationen für die Referenzperiode sowie für die Szenarien 2050 und 2085 (oben CLM, unten REMO).

Die Auswertungen bezüglich der zukünftig veränderten Häufigkeit und/oder Dauer von Hitze¹⁷- und Trockenperioden¹⁸ sind noch in Arbeit. Auch sie werden soweit möglich innerhalb der sektor- bzw. handlungsbereichsspezifischen sowie der clusterspezifischen Analyse der Vulnerabilität zur Bestimmung der Exposition weiter bearbeitet.

3.4 Klimaparameter ohne regionale Klimamodellierung

Für die in Tab. 3 (s. Kap. 3.1) und Tab. 5 (s. Kap. 3.2) mit einem Sternchen markierten Klimaparameter, deren zukünftige Veränderungen nicht mit den regionalen Klimamodellen (z.T. aber mit globalen Modellen) berechnet werden können, sind unterschiedliche Quellen sowohl für die mittleren Jahresänderungen als auch für die Spannweiten herangezogen worden. Diese werden im Folgenden beschrieben.

3.4.1 Wassertemperaturen

Für die klimabedingten Änderungen der Wassertemperaturen der Unterweser werden insbesondere die Erkenntnisse aus dem Projekt KLIMU (Grabemann et al. 2005) sowie einer aktuellen Studie zu den möglichen Wirkungen des Klimawandels auf Wassertemperaturen von Fließgewässern herangezogen (WWF 2009). Für die Nordseewassertemperaturen kann auf Veröffentlichungen und Datenauswertungen des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie zurückgegriffen werden (BSH: <http://www.bsh.de>).

Für die **Binnengewässer** kann zusammenfassend gesagt werden, dass die durch den Klimawandel bereits eingetretene und für die Zukunft prognostizierte Erhöhung der mittleren Lufttemperatur zu einer (zeitlich verzögerten) Erhöhung der Wassertemperatur führt. Der wichtigste Wirkungspfad für die Veränderungen der Wassertemperaturen ist in den veränderten Energieströmen an der Erdoberfläche zu sehen, da infolge erhöhter kurz- und langweiliger Strahlungseinträge sowie durch erhöhte Wasserdampfgehalte und Lufttemperaturen mit einer Zunahme der Wassertemperaturen zu rechnen ist. Dabei ist davon auszugehen, dass unbeschattete Gewässer stärker reagieren als beschattete.

Da die Lufttemperatur im Wesentlichen von denselben Energieströmen gesteuert wird wie die Wassertemperatur, kann sie als Indikator für die Wassertemperatur verwendet werden (EEA 2008, WWF 2009). Allerdings sind die absoluten Maxima der Fließgewässertemperaturen durch die mit steigender Wassertemperatur zunehmende Verdunstung und deren kühlende Wirkung begrenzt. Vermutlich werden in manchen Flüssen daher die historisch gemessenen Maximaltemperaturen zukünftig nicht oder nur geringfügig überschritten. Die Häufigkeit mit der extrem hohe Wassertemperaturen auftreten, wird jedoch sehr wahrscheinlich zunehmen und daher werden auch die mittleren Jahresmaxima und -minima voraussichtlich in etwa demselben

¹⁷ **Hitzeperiode**: länger andauernde Phase von heißem Wetter (vgl. a. Kap. 0; die Auswertung der Klimadaten bezüglich veränderter Intensität von Hitzeperioden steht noch aus und wird gegebenenfalls in der Vulnerabilitätsanalyse weiter bearbeitet).

¹⁸ **Trockenperiode**: längere Phase aufeinanderfolgender Trockentage. Die Frage, was eine Trockenperiode ist bzw. wie viel Trockentage eine Trockenperiode bilden, ist sowohl abhängig von den naturräumlichen Gegebenheiten, als auch von den Nutzungsarten bzw. -anforderungen; dieses wird u.a. auch im Rahmen der Niederschlags-Abfluss-Modellierung analysiert.

Maße weiter ansteigen wie die Jahresmittelwerte (Grabemann et al. 2005).

Ein weiterer Wirkungspfad ist in der Veränderung des **Abflussregimes** zu sehen. Verringerte Abflüsse führen vereinfacht gesagt zu einer Minderung der Wärmekapazität. Folglich werden im Fall geringerer Abflüsse im Sommer bei gleichem Energieangebot höhere Wassertemperaturen resultieren. Erhöhte Abflüsse haben eine umgekehrte Wirkung; im Weserästuar kann es zudem zum Eintrag von kaltem Nordseewasser kommen (Grabemann et al. 2005; Erkenntnisse bezüglich des Abflussregimes der Fließgewässer in der Untersuchungsregion werden aus der Niederschlags-Abflussmodellierung gewonnen). Zusätzlich werden die Wassertemperaturen im Weserästuar durch Abwärme erzeugende Kohle- und Kernkraftwerke erhöht, deren Wärmebelastung für die Unterweser bei ca. +2°C liegt (Schirmer mündlich). Inwieweit sich diese anthropogene Wärmebelastung zukünftig verändert, ist Bestandteil der Vulnerabilitätsanalysen.

Für die Abschätzung der Veränderungen der Wassertemperaturen in der Nordsee können die Auswertungen der Messkampagnen des BSH herangezogen werden. Hier werden wöchentliche (seit 1995) und monatliche (seit 1968) Temperaturkarten der Mittelwerte der Nordseewassertemperaturen erstellt, die auf Satelliten- und Schiffsmessungen beruhen. Da zusätzlich für das Klima in Nordeuropa der Wärmetransport durch Meeresströmungen im Atlantischen Ozean eine entscheidende Rolle spielt, liefert das BSH seit 1993 mit der Bestimmung der meridionalen Transporte im Nordatlantik von Wärme und Süßwasser über die Linie Englischer Kanal-Neufundlandbänke einen Beitrag zur Analyse des regionalen Klimageschehens. Die Abb. 18 zeigt beispielhaft die Temperaturanomalien in den Oberflächentemperaturen der Nordsee für das Jahr 2009 (s.a. unter [http://www.bsh.de/Meeresdaten - Beobachtungen - Meeresoberflächentemperatur](http://www.bsh.de/Meeresdaten-Beobachtungen-Meeresoberflächentemperatur)).

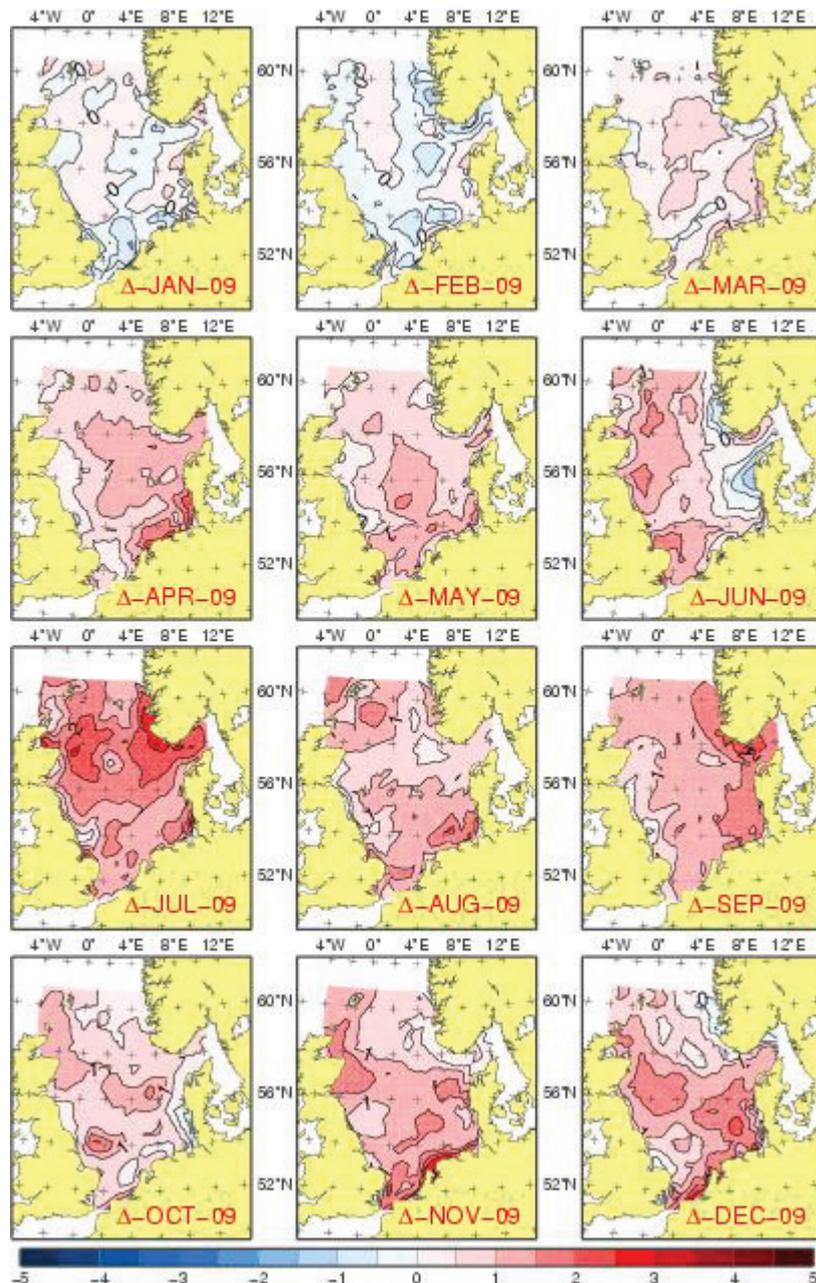


Abbildung 18: Temperaturanomalien in den Wassertemperaturen der Nordsee für das Jahr 2009. Die Anomalien der raumzeitlichen Temperaturfelder sind vom BSH aus den wöchentlichen Oberflächentemperaturfeldern für den Zeitraum 1971-1993 anhand einer monatlichen Klimatologie berechnet worden (<http://www.bsh.de/>).

Die Beobachtungen des BSH bestätigen die stattfindende klimawandelbedingte Temperaturänderung auch für die Nordsee. Insgesamt setzte sich die seit 1987 anhaltende Warmphase in der Nordsee weiter fort und insbesondere die südöstliche Nordsee zeigt seit Ende der 1980er Jahre einen überdurchschnittlichen Anstieg der Oberflächenwassertemperatur. Der in den vergangenen 100 Jahren vorherrschende, 8 bis 12 Jahre andauernde Zyklus von Kalt- und Warmphasen ist somit überschritten worden. Die über dem langjährigen Mittel liegenden Oberflächentemperaturen in der Nordsee wirken sich zunehmend auf das Artenspektrum bei Tieren und Pflanzen aus (BSH 2008).

Weiterhin zeigen aktuelle Messungen aus den Monaten Dezember 2009 und Januar 2010, dass sich der strenge Winter nicht in einer deutlichen Abkühlung des Nordseewassers widerspiegelt, wie das in den 1970er und 1980er Jahren der Fall war. Die Durchschnittstemperatur im Januar 2010 lag bei 6,3°C und damit nur um 0,3°C unter dem langjährigen Mittel von 6,6°C. Grund hierfür ist die in den vergangenen Jahren infolge der globalen Klimaerwärmung im Durchschnitt um mehr als 1°C gegenüber früheren Jahrzehnten aufgeheizte Nordsee. Der hohe Wärmeinhalt bei Winterbeginn sorgte also dafür, dass die Oberflächentemperatur im Januar nur knapp unter das langjährige Mittel sank. Die aktuellen durchschnittlichen Nordseewassertemperaturen liegen somit weiterhin im langfristigen Trend zu höheren Wassertemperaturen (BSH 2010).

Nach Boelens et al. (2005) stieg die Temperatur mariner europäischer Gewässer seit dem Jahr 1900 um ca. 0,8°C und auch Kirby et al. (2007) stellten für die Nordsee eine signifikante Erhöhung der Temperaturen insbesondere während der Wintermonate fest (UBA 2009). An der Langzeit-Messstation Helgoland-Reede stieg die Wassertemperatur an der Oberfläche seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1962 um 1,5°C (Kraberg et al. 2008). Zusätzlich haben sich in der Nordsee in den späten 1980er Jahren die Oberflächentemperatur und die Windverhältnisse stark verändert, da durch die Zunahme westlicher Winde der Einstrom warmen Wassers in die Nordsee verstärkt worden ist (WBGU 2006). Ein Zusammenhang zwischen dieser Veränderung der Nordatlantischen Oszillation (NAO) und der anthropogenen Klimaerwärmung ist wahrscheinlich (Gillett et al. 2003).

Insgesamt ähneln die Veränderungen der Meeresoberflächentemperatur – insbesondere in flachen Randmeeren wie der Nordsee – ebenfalls stark der Entwicklung der Lufttemperaturen: Die Erwärmung des Oberflächenwasser fällt mit +0,6°C seit Beginn des 20. Jahrhunderts nur etwas geringer aus als der Anstieg der globalen Mitteltemperatur von +0,74°C (WBGU 2006, IPCC 2007). Da die Meeresoberfläche thermisch eng an die darüber liegende Atmosphäre gekoppelt ist, ist auch in Zukunft davon auszugehen, dass die Wassertemperaturen einen ähnlichen Verlauf wie die Lufttemperaturen zeigen werden.

3.4.2 Meeresspiegel

Die Projektionen für den zukünftigen mittleren globalen Meeresspiegelanstieg, die allerdings mit vergleichsweise größeren Unsicherheiten behaftet sind, betragen nach dem 4. Sachstandsbericht des IPCC für das A1B-Emissionsszenario bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (bzw. der Dekade 2090-2099) gemittelt ca. 35 cm. Der Betrachtungszeitraum des IPCC endet mit dem gegenwärtigen Jahrhundert, so dass dazwischen liegende Zeitpunkte oder -perioden geschätzt werden müssen. Für das mittlere Jahr 2050 wird daher von einem Meeresspiegelanstieg von 17,5 cm ausgegangen. Hier werden also die modellbasierten globalen Projektionen unter Berücksichtigung des A1B-Emissionsszenarios für den Meeresspiegelanstieg gemittelt. Der im vergangenen Jahrhundert beobachtete säkulare Anstieg von 25 cm pro Jahrhundert wird damit überschritten.

IPCC (2007) gibt für den bisherigen mittleren globalen Anstieg des Meeresspiegels für den Zeitraum 1961 bis 2003 $1,8 \pm 0,5$ mm pro Jahr an, also etwa 18 cm pro Jahrhundert, mit einer

deutlichen Beschleunigung im Zeitraum 1990 bis 2003 auf etwa 3 mm pro Jahr entsprechend 30 cm pro Jahrhundert. Allerdings wird vom IPCC auch gesagt, dass ihre Werte die noch unbekanntem Folgen von Gletscherschmelzen nicht enthalten. Die sich deutlich abzeichnende Erhöhung der Beiträge der globalen Gletscherschmelze zum Meeresspiegelanstieg wird die Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs also verstärken. 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 (s. a. Kap. 5).

In den Spannweitenangaben der beiden ‚nordwest2050‘-Szenarien werden für die untere Grenze die niedrigsten Werte des IPCC verwendet (Ergebnis des B1-Emissionsszenarios), während die obere Grenze aus den statistischen Analysen des Zusammenhangs zwischen Temperaturanstieg und Meeresspiegeländerung von Rahmstorf (2007) und Rahmstorf et al. (2007) abgeleitet worden ist. Zu beachten ist, dass sich abweichend von den Klimaparametern der Regionalmodelle die Werte vom IPCC bezüglich des Meeresspiegelanstiegs auf die Vergleichsperiode 1980-1999 beziehen und die Analysen von Rahmstorf das Jahr 1990 als Ausgangspunkt für die von ihm abgeleiteten Anstiegsraten haben.

Insgesamt ergibt sich somit eine sehr große Spannweite bezüglich des Anstiegs des mittleren Meeresspiegels von 9 bis 70 cm für das mittlere Jahr 2050 und von 18 bis 140 cm für das mittlere Jahr 2085. Diese großen Spannweiten zeigen deutlich die Unsicherheiten über den mittel- und längerfristigen Fortgang des Meeresspiegelanstiegs sowie seine Auswirkungen auf das Tidehochwasser (s.u.) im Bereich der Deutschen Bucht. Im Folgenden werden einige Quellen sowohl für die untere als auch für die obere Grenze der Spannweiten aufgeführt:

- Nach Jensen & Mudersbach (2007) folgt die Nordsee dem Anstieg des mittleren globalen Wasserstandes (MW) mit Verzögerung. Sie geben den Trend des Anstiegs des MTmw 1950 bis 2005 für ausgewählte Küsten- bzw. Inselpegel mit 14,4 bzw. 18,5 cm pro Jahrhundert an. Eine Beschleunigung des Anstiegs seit den 1990er Jahren lässt sich nach ihnen statistisch nicht belegen.
- Rahmstorf & Richardson (2007) gehen 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 globale Temperaturerhöhung bis 2100 schon über 1 m bedeuten würde (für das A1FI-Szenario mit bis zu 6°C Temperaturanstieg sogar max. 2,2 m; s. Kap. 5).
- Grinsted et al. (2009) gehen in einer aktuellen Veröffentlichung davon aus, dass der Meeresspiegel bis zur Dekade 2090-2099 für das A1B-Emissionsszenario um 90 bis 130 cm ansteigen wird, wobei die Wahrscheinlichkeit, dass der Anstieg innerhalb der IPCC-Spannweiten liegen wird, von ihnen als gering eingeschätzt wird.
- Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung globale Umweltveränderungen (WBGU 2006) hat in einem Sondergutachten errechnet, dass sich bei einer Stabilisierung der Erwärmung bei 3°C über dem vorindustriellen Wert ein Meeresspiegelanstieg um ca.

3 bis 5 Meter bis zum Jahr 2300 ergibt. Der Wert von 3 m entspricht einem Verlust von je einem Sechstel des grönländischen und des westantarktischen Eisschildes; 5 m entsprechen je einem Drittel.

- Das United Kingdom Climate Impacts Programme (UKCIP) (<http://www.ukcip.org.uk/>) berücksichtigt in ihren Projektionen bezüglich des Meeresspiegels ein „high-plus-plus“-Szenario, in dem von einem mittleren Anstieg für Großbritannien bis zum Ende des 21. Jahrhunderts von 93 cm bis ungefähr 190 cm ausgegangen wird.
- Die Deltakommission in den Niederlanden (<http://www.deltacommissie.com>) empfiehlt, einen Meeresspiegelanstieg von 65 bis 130 cm bis zum Jahr 2100 und von 200 bis 400 cm bis zum Jahr 2200 für die erforderlichen Anpassungen der Küstenschutzsysteme zugrunde zulegen.

Eine Übersetzung der globalen Projektionen der Meeresspiegeländerungen auf die regionale Ebene muss zusätzlich die spezifischen Bedingungen an der deutschen Nordseeküste berücksichtigen (Schirmer 2005). So kann die Nordsee als Randmeer des Nordatlantiks infolge von Änderungen der Dichte sowie in der Zirkulation der Wassermassen einen im Vergleich zum globalen Mittel überproportionalen, d.h. höheren Anstieg zeigen (Woth & von Storch 2008). Hinzu kommt die relative Senkung der Niedersächsischen Küste (in Zeiträumen von Jahrhunderten wird das postglaziale Absinken der deutschen Nordseeküste von ca. 10 bis 20 cm pro Jahrhundert relevant, was zu den jeweiligen globalen Schätzungen addiert werden muss) und die Veränderung des Tidenhubs (insbesondere der Anstieg des Tidehochwassers: s. Kap. 3.4.3). Weiterhin kommen anthropogene Veränderungen der Topografie im Küstenvorfeld und im Weserästuar hinzu, da infolge der starken Vertiefung und des geringen Gefälles des Weserästuars sich ein weiterer Anstieg des küstennahen Wasserstände nach Grabemann et al. (2005) in den Flussunterläufen nahezu unverändert fortsetzen.

3.4.3 Gezeiten und mittleres Tidehochwasser (MThw)

Von großer Bedeutung für potenzielle Klimawirkungen ist außer der Höhe des mittleren Meeresspiegels die zukünftige Veränderung der Gezeiten, da sie Strömungen, Wasserstände und Wasseraustausch an der Küste, im Wattenmeer und insbesondere in den Ästuaren bedingen. Der IPCC macht hierzu nur sehr allgemeine Aussagen; regionale Klimamodelle gar keine. 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 Tidenhub erzeugt. Dieser Prozess ist z.B. bei allen neueren Vertiefungen von Unterelbe und Unterweser vorhergesagt worden und auch eingetreten (Schuchardt et al. 2008). So hat sich der Tidenhub in Bremen-Vegesack von 3,4 m (1977) auf 3,9 m (2010) erhöht, während er in Bremerhaven an der Doppelschleuse im selben Zeitraum nur um 0,1 m (von 3,6 m auf 3,7 m) gestiegen ist (Schirmer 2010).

Die Auswertungen von Jensen & Mudersbach (2007) belegen, dass sich der Trend der Zunahme des **Tidenhubs** an der Deutschen Nordseeküste (6 Pegel) seit den 1960er Jahren erheblich

beschleunigt hat: von 18,1 cm pro Jahrhundert (1857-2005) auf 57,1 cm pro 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 Trend für den mittleren Tidenhub von 19,8 cm pro Jahrhundert (1925-2001) auf 34,3 cm pro Jahrhundert (1965-2001), wobei allerdings der Beitrag des Ausbaus der Ästuarie an diesen Veränderungen unklar bleibt (s. o.).

Die Analysen der Zeitreihen des mittleren **Tidehochwassers** verdeutlichen die bereits seit mehr als 50 Jahren ablaufenden Veränderungen der hydrodynamischen Eigenschaften der Nordsee. So konnten Jensen & Mudersbach (2007) zeigen, dass der langfristige Trend des MThw-Anstiegs im Bereich der deutschen Küstenlinie 23,5 cm pro Jahrhundert (1857-2005) betrug und damit dem globalen Trend von 14 cm (IPCC 2007) zuzüglich 10 cm als Folge des regionalen Absinkens der Deutschen Küste folgte. Sowohl global als auch an der Deutschen Küste setzte Mitte des 20. Jahrhunderts eine signifikante Trendbeschleunigung ein, die ab den 1990er Jahren global 31 cm pro Jahrhundert und ab den 1950er Jahren an der Küste 40 cm pro Jahrhundert erreichte (s. Abb. 19). Diesen Trend zeigte auch die küstenfernere Nordsee am Pegel Helgoland, wo eine Trendbeschleunigung für das MThw von 18,4 cm pro Jahrhundert (1925-2001) auf 23,7 cm pro Jahrhundert (1965-2001) zu beobachten war (Jensen & Mudersbach 2004).

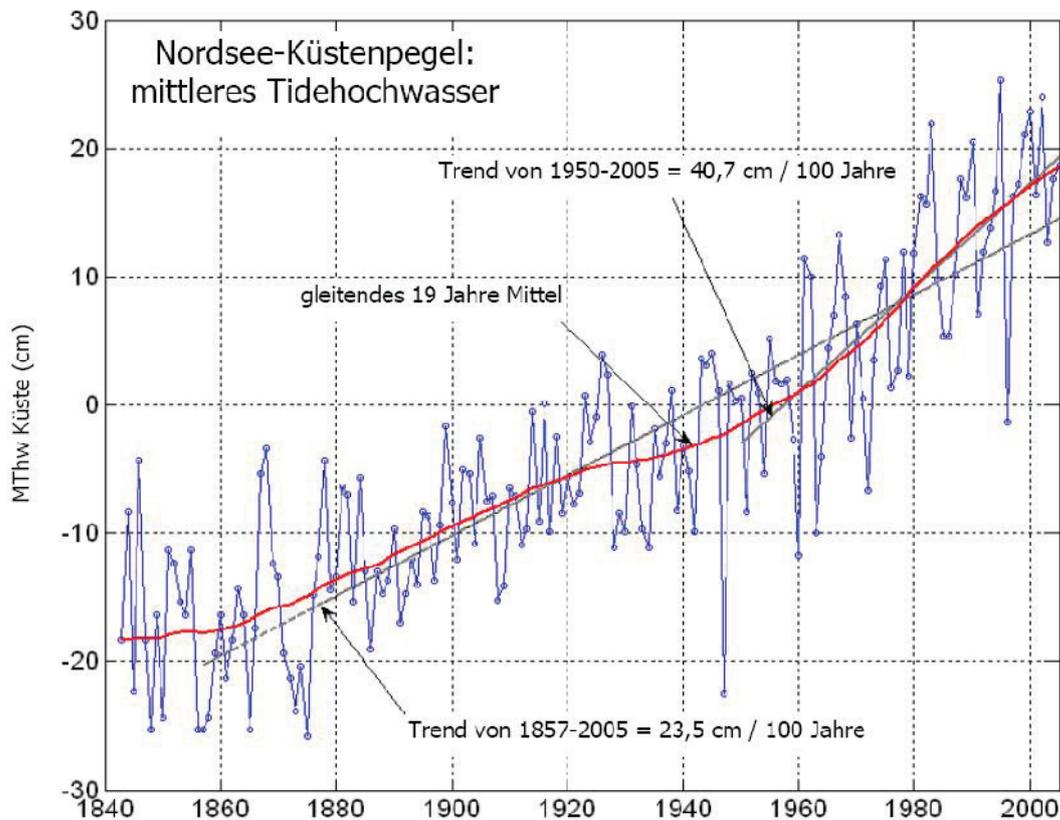


Abbildung 19: Normierte Zeitreihe für das MThw gemittelt für Nordsee-Küstenpegel (aus Jensen & Mudersbach 2007).

In den beiden ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien kann daher extrapoliert – also auf Basis der Beobachtung hochgerechnet – werden, dass es für das mittlere Jahr 2050 zu einem Anstieg des MThw um 15,5 cm (Spannweite 10 bis 21 cm) und für ein mittleres Jahr 2085 um 30,5 cm (Spannweite 20 bis 41 cm) kommt. Allerdings muss hinsichtlich der MThw-Veränderungen festgehalten werden, dass die Nordsee ein sehr komplexes Tideverhalten aufweist, so dass die beobachteten Phänomene noch nicht vollständig befriedigend erklärt werden können und z.T. kontrovers diskutiert werden.

3.4.4 Windstau und Sturmfluten

Die zukünftige Entwicklung der Sturmfluthäufigkeit und der Höhe von extremen Sturmflutwasserständen ist nur schwer abzuschätzen. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass ein gleich großer Sturmflut erzeugender Impuls bei höherem Tidehochwasser (s.o.) entsprechend höhere Sturmflutwasserstände bewirkt. Für das Projekt KLIMU ist errechnet worden, dass eine Sturmflut, die das MThw um 2,5 m übersteigt (z.B. am 9. November 2007 durch das Sturmtief Tilo verursacht), 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 (Wittig et al. 2007; s. Teil 1 des Berichts). Die Schließung der Sturmflutsperrwerke an den Nebenflüssen und die Verluste von Überschwemmungsflächen erhöhen die Sturmflutwasserstände bei gleichen Randbedingungen zusätzlich (Schirmer 2005).

Zur Erklärung der Veränderungen in den Werten für die Sturmflutwasserstände müssen einige Erläuterung vorangeschickt werden: Um von einer Sturmflut zu sprechen, müssen zusätzlich zur Flut (Tidehochwasserstand) spezielle meteorologische Bedingungen eintreten. Bei Wetterlagen mit über einige Stunden andauernden hohen Windgeschwindigkeiten aus westlichen oder nördlichen Richtungen werden zusätzliche Wassermassen an die Küste getrieben und führen, als sog. Windstau, zu einer Wasserstandserhöhung. Der Windstau verhält sich umgekehrt proportional zur Wassertiefe, so dass insbesondere an flachen Küstenabschnitten die Wassermassen höher auflaufen. Die eigentliche Sturmfluthöhe ergibt sich aus dem Zusammentreffen (der Addition) von Windstau und der Tidephase. Der Wasserstand an einem bestimmten Ort hängt also von folgenden Komponenten ab: dem mittleren Meeresspiegel, den regionalen Windverhältnissen, die die Windstauereignisse hervorrufen, den astronomischen Gezeiten sowie der regionalen Küstenmorphologie. Damit hängt die Entwicklung zukünftiger Sturmfluten im Wesentlichen von dem Ausmaß des Anstiegs des mittleren Meeresspiegels sowie der Charakteristik möglicher Änderungen der lokalen Windstatistik ab (Woth & von Storch 2008). Dementsprechend bezeichnen die in den ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien festgelegten Werte für den Windstau den meteorologisch bedingten Wasserstandsanteil, der durch klimawandelbedingt verstärkte Sturmintensität verursacht wird. In der Deutschen Bucht mit ihren Ästuaren sind das für das 2050-Szenario 10 cm (mit einer Spannweite zwischen 0 und 20 cm; s.a. Tab. 3) und für das 2085-Szenario 25 cm (mit einer Spannweite von 15 bis 35 cm; s.a. Tab. 5).

Es kann davon ausgegangen werden, dass eine Erhöhung des Scheitels zukünftiger Sturmflutwasserstände in etwa um die gleiche Größenordnung erfolgt, wie die des mittleren Meeresspiegels. Die Werte für den mittleren Meeresspiegelanstieg und die klimawandelbedingt

erhöhten Wasserstände durch Windstau müssen also addiert werden. Erhöht sich nun weiterhin, wie in den Klimaszenarien festgelegt, das mittlere Tidehochwasser (s. Kap. 3.4.3), also der für die Sturmfluten relevante Flutwasserstand, so müssen für die Annahmen über die zukünftigen Sturmflutwasserstände die hierfür festgesetzten Veränderungen ebenfalls berücksichtigt werden. Die zukünftig zu erwartenden Sturmflutwasserstände ergeben sich also aus der Summe der drei Wasserstandsparameter mittlerer Meeresspiegel, mittleres Tidehochwasser (MThw)¹⁹ und windbedingter Wasserstau. Für die Sturmflutwasserstände werden nun in den beiden Klimaszenarien folgende Annahmen festgesetzt: für das 2050-Szenario erhöhen sie sich um 43 cm (Spannweite: +19 bis +111 cm) und für das 2085-Szenario um 90 cm (Spannweite: +53 bis +216 cm). Es ist allerdings festzuhalten, dass gegenwärtig zwar eine Tendenz zur Zunahme leichter und mittlerer Sturmfluten erkennbar ist, es aber noch keine statistisch abgesicherten Befunde im Bereich der Nordseeküste gibt (Woth & von Storch 2008).

Neben einem Anstieg der absoluten Sturmfluthöhen ist zum Ende des 21. Jahrhunderts zusätzlich auch mit einer Erhöhung der Sturmflutdauer im Bereich der Deutschen Bucht zu rechnen (Woth et al. 2005). Ein hoher Windstau würde dann in der Deutschen Bucht nicht wie bisher im Mittel 7 bis 8 Stunden am Deich stehen, sondern 2 bis 3 Stunden länger. Dies erhöht zum einen die Chance des Zusammentreffens eines hohen Windstauereignisses mit dem Gezeitenmaximum und verursacht somit mit höherer Wahrscheinlichkeit eine Sturmflut, zum anderen erhöht sich die Belastungsdauer der Deiche und Vorländer sowie der Inseln und Dünen.

¹⁹ Die Prozesse der Landsenkung im Nordseeküstenbereich müssen hier nicht zusätzlich berücksichtigt werden, da es sich bei der Abschätzung über das MThw um eine Extrapolation der in der Vergangenheit gemessenen Werte handelt, die dementsprechend isostatische Effekte beinhaltet.

4. Vergleich mit dem KLIMU-Klimaszenario

Im 1. Teil des Klimaszenarien-Berichts ist das Klimaszenario aus dem Projekt „Klimawandel und Unterweserregion“ (das sog. KLIMU-Klimaszenario: s. Schirmer 2005) vorgestellt worden. Die Analysen der BMBF-Klimafolgenforschungsprojekte KLIMU (<http://www.klimu.uni-bremen.de>), KRIM (<http://www.krim.uni-bremen.de>) und zum Teil KWU (<http://www.klimawandel-unterweser.ecolo-bremen.de>) basieren auf den dort festgelegten Veränderungen über das zukünftige Klima. Da auch in ‚nordwest2050‘ einige wesentliche Aussagen zu den Klimafolgen, Sensitivitäten und der Anpassungskapazität im Rahmen der Vulnerabilitätsanalysen auf Erkenntnissen der genannten Projekte beruhen, erfolgt im folgenden Kapitel zur Einordnung der Ergebnisse ein Vergleich mit den ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien.

Grundlage des KLIMU-Klimaszenarios ist das sozioökonomische Szenario IS92a des IPCC (2001), in dem ein eher hoher zukünftiger CO₂-Ausstoß ein kräftiges Klimasignal verursacht. Dieses Klimasignal ist in das globale Klimamodell ECHAM4/OPYC3 eingespeist worden (vgl. von Storch et al. 1998, Schirmer 2005). Hieraus sind Aussagen über die Veränderungen der in der Tab. 7 aufgeführten Klimaparameter für die Region Bremen und die Unterweser im Jahr 2050 auf der Basis des Bezugszeitraums 1961 bis 1990 als 11-jähriges gleitendes Mittel abgeleitet worden.

Die Klimaprojektionen aus den regionalen Klimamodellen REMO und CLM für die ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien zeigen für die MPR HB-OL bis zum Jahr 2050 (Periode 2036-2065) einen im Vergleich zum KLIMU-Klimaszenario deutlich geringeren Anstieg der Jahresmitteltemperatur. Der dort projizierte Wert von +2,7°C bis 2050 stellt ein starkes Klimasignal dar und ist mit dem Wert für das 2085-Szenario vergleichbar. Hintergrund ist die Annahme einer Verdoppelung der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration auf 720 ppm, welches einem „pessimistischen“ (höheren als A1B) Emissionsszenario entspricht (A1B: zwischen 490 und 600 ppm für das 2050-Szenario).

Tabelle 7: Vergleich des KLIMU-Klimaszenarios (Referenzperiode 1961-1990) mit dem ‚nordwest2050‘-Klimaszenario 2050 und 2085 (Referenzperiode 1971-2000; Regionalmodelle CLM und REMO).

	KLIMU-Klimaszenario	‚nordwest2050‘-Klimaszenarien		
Zeitperiode	2050	2050 (2036-2065)		2085 (2071-2100)
Parameter	mittlere Änderungen	mittlere Änderungen	Spannweiten der Änderungen	mittlere Änderungen
CO ₂ -Konzentration	720 ppm	550 ppm	490 bis 600 ppm	770 ppm
durchschnittliche Temperatur	+2,7°C	+1,5°C	+1 bis 2°C	+2,8°C
Frühling (MAM)	+3,2°C	+1,1°C	+0,3 bis +1,7°C	+1,9°C
Sommer (JJA)	+2,7°C	+1,5°C	+1,1 bis +1,8°C	+2,7°C
Herbst (SON)	+2,2°C	+1,7°C	+1,4 bis +2,2°C	+2,9°C
Winter (DJF)	+2,9°C	+1,9°C	+1,1 bis +2,8°C	+3,6°C
Gesamtniederschlag	+10%	+8,2%	+3 bis +9%	+6%
Frühling (MAM)	+22,1%	+6,1%	+2 bis +10%	+9%
Sommer (JJA)	-6%	-3%	-13 bis +8%	-17%
Herbst (SON)	+12,2%	+22,4%	+2 bis +19%	+13%
Winter (DJF)	+15,7%	+8%	+9 bis +27%	+25%
mittlere Windgeschwindigkeit	+3,8%	+1,8%	0 bis +2%	+2,5%
Frühling (MAM)	+4,7%	+3,8%	-1 bis +4%	+3%
Sommer (JJA)	-4,3%	-0,6%	-2 bis +1%	-2%
Herbst (SON)	+6,8%	+2,4%	0 bis +3%	+1,8%
Winter (DJF)	+6,6%	+2,3%	-2 bis +4%	+7,4%
mittlerer Meeresspiegel* (Vergleich zu 1980-1999)	+55 cm (inkl. säkularer Anteil)	+17,5 cm	+9 bis +70 cm	+34,5 cm
mittleres Tidehochwasser* (MThw)	+15 cm (MTnw -15, MThb +30)	+15,5 cm	+10 bis +21 cm	+30,5 cm
Wasserstände durch Windstau*	+5,8 cm (HB) +7,5 cm (Brhv)	+10 cm	0 bis +20 cm	+25 cm
Sturmflutwasserstände*: Summe aus mittlerer Meeresspiegel, MThw und Windstau	+75,8 bis +77,5 cm (HHThw in KRIM +265 cm)	+43 cm	+19 bis +111 cm	+90 cm

* = nicht aus den regionalen Klimamodellen abzuleiten; ppm = parts per million; MThw = mittleres Tidehochwasser; MTnw = mittleres Tideniedrigwasser; MThb = mittlerer Tidenhub; HHThw = höchster Tidehochwasserstand; HB = Stadt Bremen; Brhv = Stadt Bremerhaven

Für die saisonal differenzierte Erwärmung lassen sich aus beiden Klimaszenarien folgende Unterschiede ableiten:

- in ‚nordwest2050‘ zeigt der Winter die stärkste Erwärmung, in KLIMU der Frühling;
- in ‚nordwest2050‘ ist der Frühling die Jahreszeit mit der geringsten Erwärmung, in KLIMU ist es der Herbst;

- die Differenzen zwischen den in beiden Szenarien projizierten Erwärmungen sind im Frühling am größten (2,2°C) und im Herbst am geringsten (0,5°C);
- die Werte aus KLIMU für die Herbst- und Wintererwärmung bewegen sich noch innerhalb bzw. knapp außerhalb der Spannweiten von ‚nordwest2050‘, während die anderen Jahreszeiten z.T. deutlich darüber hinausgehen.

Für den Gesamtniederschlag wird in beiden Szenarien bis zum Jahr 2050 für die MPR HB-OL bzw. die Unterweserregion im Jahresmittel eine fast gleiche Zunahme von ca. 10% projiziert. Gemeinsam ist beiden Szenarien auch eine Zunahme im Winter, Frühling und Herbst, während im Sommer eine Abnahme festzustellen ist. Ähnlich wie bei den Temperaturen sind jedoch auch Unterschiede zu erwähnen: in KLIMU ist die größte Zunahme der Niederschlagsmenge im Frühling, in ‚nordwest2050‘ im Herbst zu erkennen. Insgesamt bewegen sich die Veränderungen der Niederschlagsmengen in KLIMU (außer für die Frühlingsmonate) alle innerhalb der ‚nordwest2050‘-Spannweiten. Beide Szenarien sind bezüglich dieses Klimaparameters also vergleichbar und zeigen ähnliche Trends mit regenreicheren Wintern (KLIMU: mehr im Winter und Frühling; ‚nordwest2050‘: mehr im Herbst und Winter) und niederschlagsärmeren Sommern.

Für den Klimaparameter mittlere Windgeschwindigkeit und seine saisonale Differenzierung ergeben sich im Vergleich der beiden Szenarien folgende Aussagen:

- die mittleren Windgeschwindigkeit aller Jahreszeiten sind in KLIMU deutlich größer als in ‚nordwest2050‘ und überschreiten auch die Spannweiten;
- die größte Zunahme in KLIMU zeigt der Herbst, in ‚nordwest2050‘ der Frühling;
- in beiden Szenarien zeigt der Sommer eine Abnahme der mittleren Windgeschwindigkeit.

Hinsichtlich des möglichen mittleren Meeresspiegelanstiegs stellt der im KLIMU-Klimaszenario angenommene Wert von +55 cm bis 2050 (mit Berücksichtigung des säkularen Anteils von +15 cm) einen im Vergleich mit dem im 2050-Szenario von ‚nordwest2050‘ angenommenen Wert von +17,5 cm kräftiges Signal dar. Betrachtet man die entsprechende obere Spannweite (+70 cm), so befindet sich der KLIMU-Wert allerdings innerhalb der möglichen Veränderungen. Auch die Annahmen bezüglich des mittleren Tidehochwassers und der Wasserstände durch Windstau bewegen sich innerhalb der ‚nordwest2050‘-Spannweiten. Die Aussagen bezüglich der Klimafolgen bzw. potenziellen Auswirkungen durch veränderte Wasserstände können daher als vergleichbar eingestuft werden. Im Projekt KRIM ist ergänzend zum dort verwendeten KLIMU-Klimaszenario im Sinne einer „worst case“-Betrachtung für die Sturmflutwasserstände ein Extremszenario angenommen worden. In Anlehnung an die durch das Sturmtief Anatol im Jahr 1999 verursachte Sturmflut, die nach Einschätzung des BSH im Bereich von Hamburg bei einer südlicheren Zugbahn des Sturmtiefs zu 2 m höheren Wasserständen hätte führen können, wurde eine zusätzliche Wasserstandserhöhung von +200 cm angenommen (sog. Anatol-Zuschlag). Dieser Wert liegt oberhalb der Spannweiten des ‚nordwest2050‘ 2085-Szenarios (vgl. Kap. 3.2).

Als Fazit des Vergleichs zwischen dem KLIMU-Klimaszenario und den ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien wird deutlich, dass die mittleren Werte für das 2050-Szenario zum Teil überschritten und eher die mittleren Veränderungen aus dem 2085-Szenario erreicht werden (s. Tab. 7). Die saisonale Differenzierung ergibt deutlich Unterschiede insbesondere für Frühling und Herbst. Die Veränderungen aus dem KLIMU-Szenario bezüglich Niederschlag und Wasserständen bewegen sich innerhalb der 2050-Szenario-Spannweiten, bezüglich Temperatur und mittlere Windgeschwindigkeit liegen sie darüber (s. Tab. 7).

Es kann also festgehalten werden, dass die aus dem KLIMU-Klimaszenario (mit der Erweiterung durch KRIM) abgeleiteten Klimafolgen weiterhin plausibel und gültig sind und daher in die Vulnerabilitätsanalyse einfließen können. Eine Abschwächung der mit dem Klimawandel verbundenen Folgen kann also im Vergleich der beiden Szenarien nicht konstatiert werden; möglicherweise treten sie erst später ein (nach 2050). Allerdings zeigen aktuell vielfältige Messdaten z.B. von Satelliten für die atmosphärische Kohlendioxidkonzentration und den Meeresspiegel einen stärkeren Anstieg, als er vom IPCC projiziert wird (s. nächstes Kap. 5), welches auch stärkere Auswirkungen wahrscheinlich macht.

5. Ausblick: Ist mit extremerer Klimaentwicklung zu rechnen?

In den Emissionsszenarien des IPCC werden keine Klimaschutzmaßnahmen berücksichtigt und dementsprechend sind sowohl die Emissionen als auch die Konzentrationen treibhausgaswirksamer Gase nicht von globalen Verabredungen der internationalen Klimapolitik zum Klimaschutz beeinflusst. Ob es möglich ist, verbindliche Ziele zum Klimaschutz – also zur Reduktion des Ausstoßes klimarelevanter Treibhausgase – zu beschließen und umzusetzen, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Wenn ja, dann wäre es wohl möglich, zumindest stärkere und/oder schnellere Klimaveränderungen als die in den ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien dargestellten zu vermeiden bzw. sogar unter diesen Werten zu bleiben.

Die weltweit von den Klimaforschern zusammengetragenen Erkenntnisse bezüglich des Klimawandels, die auf Messungen und Beobachtungen beruhen, zeichnen allerdings ein anderes Bild: Das Klima ändert sich zumindest teilweise stärker und schneller als von IPCC in seinem Bericht aus dem Jahr 2007 vermutet. Deutlich wird dies z.B. bei den Messungen der CO₂-Emissionen (s. Abb. 20) und der mittleren globalen Meeresspiegelhöhe (s. Abb. 21). Diese Beschleunigung ist beim Temperatursignal noch nicht so eindeutig festzustellen; bei der Abnahme der arktischen Eisfläche aber ebenfalls (University of Copenhagen 2009; s.a. <http://nsidc.org/>). Den beobachteten höheren Emissionen trägt das IPCC dadurch Rechnung, dass im nächsten 5. Sachstandsbericht ein Emissionsszenario zur Verfügung stehen und Eingang in die Klimamodellierung finden wird, welches „oberhalb“ von A2 liegt (Mitteilung vom MPI-M).

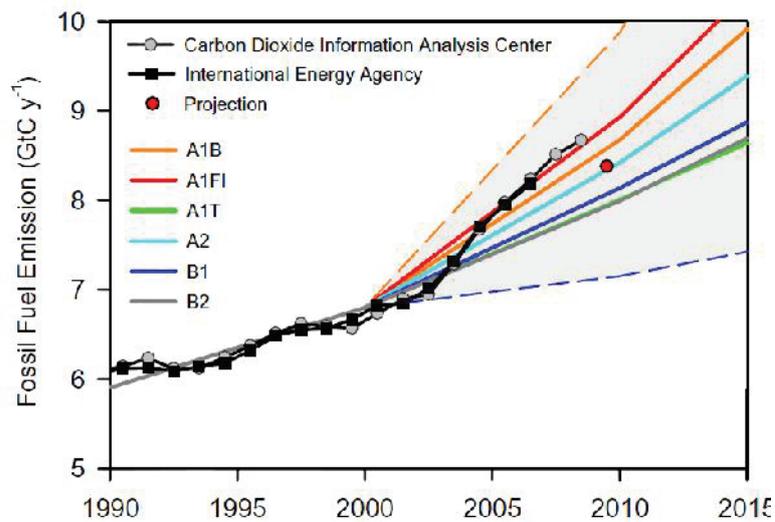


Abbildung 20: Angenommener Verlauf der CO₂-Entwicklung nach IPCC-Emissionsszenarien und tatsächlicher Verlauf der Emissionen (nach GCP 2009; s.a. Raupach et al. 2007).

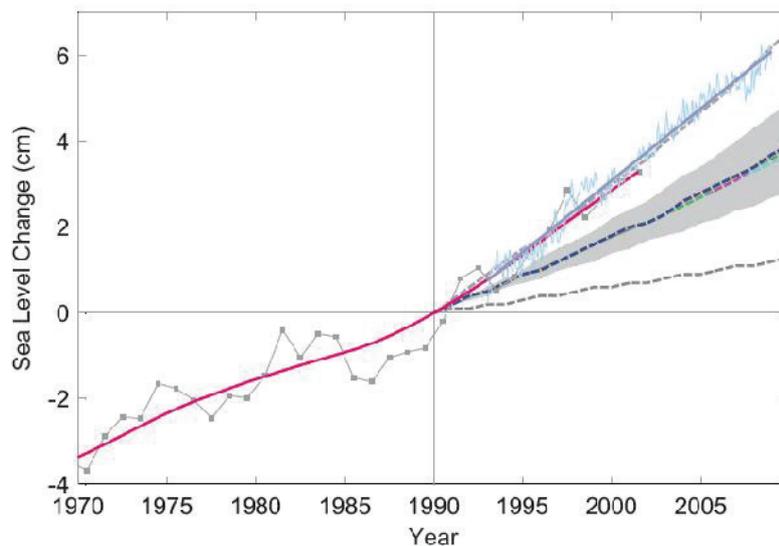


Abbildung 21: Veränderungen des mittleren globalen Meeresspiegels zwischen 1970 und 2008 im Vergleich mit 1990. Die durchgezogene dicke Linie basiert auf Messungen, die zur Entfernung interannueller Variabilität geglättet worden ist (Linie mit Datenpunkten) sowie die Projektionen des IPCC mit ihren Unsicherheitsbereichen (aus University of Copenhagen 2009).

Die in den ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien festgelegten Werte für die Veränderung der Klimaparameter beruhen auf dem Emissionsszenario A1B (s. Kap. 2.2), welches als moderates „business as usual“-Emissionsszenario bezeichnet werden kann. Da es aber aufgrund der beobachteten höheren Emissionen auch möglich erscheint, dass die Klimamodelle, die diese höheren Emissionen als Input nutzen, ein entsprechend stärkeres Klimasignal produzieren, sollte neben den dargestellten oberen Grenzen der Spannweiten bei den Klimafolgenanalysen auch „mitgedacht“ werden, was bei „extremen“ oder „ungünstigen“ Klimaänderungen passieren könnte

(wie z.B. im UKCIP (2008) für extreme Annahmen bezüglich des Meeresspiegels). Insbesondere für langfristig wirksame Entscheidungen ist das relevant und erfordert eine kontinuierliche Beobachtung der weiteren Klimaentwicklung und Berücksichtigung der neuesten Klimamodellergebnisse in allen Entscheidungen zur Klimaanpassung.

Deutlich stärkere Klimasignale, als die in den vorliegenden Szenarien festgelegten, werden auch schon unter Berücksichtigung des A1FI-Emissionsszenarios berechnet (z.B. globale Mitteltemperatur $+6,4^{\circ}\text{C}$). Wie sich solche starken Temperaturänderungen in städtischen Bereichen verstärken werden, soll z.B. in KLIMZUG-Nord betrachtet werden, wo das Norddeutsche Klimabüro des GKSS-Forschungszentrums in Geesthacht zu der Einschätzung kommt, dass die Höchsttemperaturen bis zum Ende des Jahrhunderts in der Metropolregion Hamburg etwa $1,4$ bis $9,4^{\circ}\text{C}$ höher ausfallen können. Die maximale sommerliche Höchsttemperatur könnte also etwa 36 bis 44°C erreichen (<http://klimzug-nord.de/>). Der Hitzesommer von 2003, der in Europa über 10 Milliarden € volkswirtschaftlichen Schaden und zehntausende zusätzliche Todesfälle verursacht hat (Münchener Rück 2004), könnte also z.B. ein durchschnittlicher Sommer 2050 und ein eher kühler Sommer 2070 sein (s. Abb. 22).

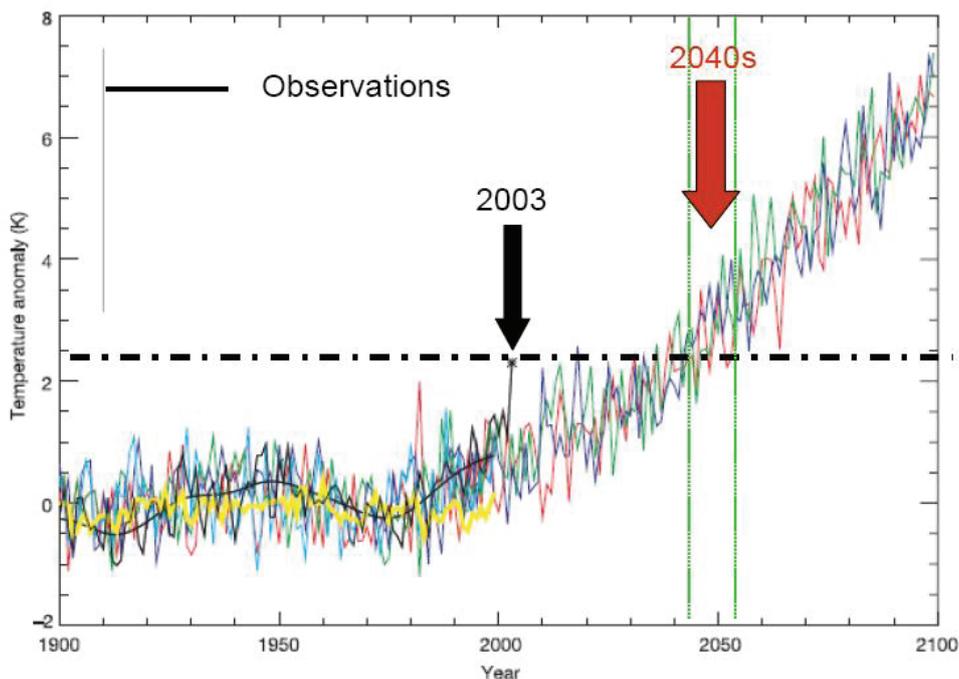


Abbildung 22: Temperaturanomalien der Monate Juni, Juli und August im Vergleich zur Periode 1961-1990 in Europa. Die gemessene Temperatur im Jahr 2003 ist als Sternchen dargestellt. Die schwarzen Linien stellen beobachtete bzw. gemittelte Temperaturen dar, die bunten Linien sind Modellierungsergebnisse des globalen Modells HadCM3 unter Berücksichtigung des A2 Szenarios (aus Lemke 2009).

Extrem starke und/oder schnelle Veränderungen des Klimas können auch aus sog. Kipp-Punkten (englisch: Tipping Points) im Klimasystem resultieren und zu klimawandelbedingten „Überraschungen“ führen (eine Zusammenfassung von 13 globalen Kipp-Punkten findet sich in UBA 2008). Neben der allmählichen anthropogenen Erwärmung ist es daher möglich, dass

aufgrund der Überschreitung von kritischen Schwellen im Klimasystem besonders starke oder sogar abrupte Klimaänderungen einsetzen. Dabei können bereits geringe Änderungen im Klimasystem bewirken, dass Kipp-Punkte erreicht werden, in deren Folge sich das Klima abrupt, unumkehrbar und langfristig ändert (UBA 2008). Für die Analysen der Klimafolgen und Anpassungserfordernisse spielen solche Überraschungen eine außerordentlich große Rolle, da abrupte und drastische Klimaänderungen in der Lage sind, selbst die Anpassungsmöglichkeiten der Gesellschaften reicher Industrieländer zu übersteigen.

Insbesondere bei der Frage, wie mit höheren und/oder beschleunigten Meeresspiegelanstiegsraten umzugehen ist, die z.B. aus den Kipp-Punkten bezüglich der arktischen und grönländischen Eismassen resultieren könnten, ist für die „Anwender“ der Klimaprojektionen, z.B. bei den für den Unterhalt der Küstenschutzelemente verantwortlichen Deichverbänden, von hoher Relevanz. Hier sind in den ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien daher schon „extreme“ oder „ungünstige“ Werte festgesetzt, die es erlauben, im Sinne eines Stress- oder Belastungstests der Untersuchungsregion die Grenzen der bisherigen Anpassungsstrategien zu identifizieren.

Da es jedoch trotz aller Weiterentwicklungen und Fortschritte bei der Klimamodellierung auch zukünftig Unsicherheiten in den Klimaprojektionen geben wird, ist eine zentrale Herausforderung der Klimamodellierung die Angabe der Unsicherheitsbereiche – wenn möglich in Form von Wahrscheinlichkeitsangaben. Das schon erwähnte Projekt ENSEMBLES hat hierzu einen wichtigen Beitrag geleistet, wobei die Ergebnisse insbesondere auf regionaler Ebene aber noch nicht vorliegen.

Die „Übersetzung“ der globalen Klimaprojektionen mit ihren noch immer erheblichen Unsicherheiten in regional bezogene und womöglich sogar saisonal differenzierte Aussagen erfordert nach Schirmer (2005) neben dem Verständnis der grundlegenden klimatischen Prozesse auch einen gewissen Mut zur Festlegung auf eine aus einem Emissionsszenario resultierende bestimmte Prognose. 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 Modelle und Projektionen über den Klimawandel erlaubt jedoch zunehmend „härtere“ und komplexere Aussagen über die Folgen des Klimawandels und muss daher kontinuierlich beobachtet werden.

Hinzu kommt, dass sich auf längere Sicht, also bis zum Jahr 2100 und darüber hinaus, aufgrund der Trägheit des Klimasystems die genannten Tendenzen in den Veränderungen der betrachteten Klimaparameter höchst wahrscheinlich fortsetzen. So hängen die Erwärmung und der Anstieg der Meere aufgrund der Größe der Ozeane und der großen Wärmekapazität des Wassers deutlich hinter der globalen Temperaturentwicklung her und werden auch nach einer Stabilisierung der Emissionsraten noch fortschreiten. Der seit mehreren Jahrzehnten anthropogen beschleunigte Anstieg des Meeresspiegels, der Resultat der Treibhausgasemissionen und Temperaturänderungen der Vergangenheit ist, wird daher in jedem

Falle noch für mindestens zwei weitere Jahrhunderte anhalten und dann deutlich höhere Werte aufweisen (z.B. WBGU 2006).

Das bedeutet, dass die unter Berücksichtigung eines „extremere“ Klimasignals in der Klimafolgenforschung zu gewinnenden Erkenntnisse nicht „um sonst“ wären, sondern es erlauben würden, die z.T. sehr komplexen und langwierigen Vorsorgeprozesse und Anpassungsmaßnahmen bei Bedarf so rechtzeitig in Gang zu setzen, dass Risiken nicht unkontrolliert steigen, klimabedingte Katastrophen vermieden werden und ausreichend Zeit zur Entwicklung von Handlungsalternativen bleibt. Zusätzlich wären auch sog. „win-win“-Ergebnisse zu erzielen, in dem sich z.B. die Deichsicherheit bei Anpassung der Küstenschutzelemente erhöht, auch wenn der Meeresspiegel nicht so schnell steigt, wie zum Teil befürchtet.

Fazit und Empfehlung:

Aktuelle Beobachtungen und Erkenntnisse lassen einen über die IPCC-Ergebnisse (zusammengestellt im 4. Sachstandsbericht von 2007) hinaus beschleunigten Klimawandel möglich erscheinen. Ein Teil dieser möglichen Entwicklungen ist in den Spannweiten der beiden ‚nordwest2050‘-Klimaszenarien enthalten (z.B. bezüglich der Wasserstandsänderungen); ein anderer Teil allerdings nicht. Deshalb empfehlen wir, beim Umgang mit den Klimaszenarien und ihrer Kommunikation zur Verdeutlichung der Unsicherheiten vorsorglich stärker auf die obere Grenze bzw. das stärkere Klimasignal der Spannweiten zu fokussieren.

Aufgrund des kontinuierlich verbesserten Wissens über Art und Ausmaß des Klimawandels ist weiterhin zu empfehlen, den Klimawandel und neues Klimawissen intensiv zu beobachten und alle Anpassungsmaßnahmen oder -strategien so flexibel wie möglich zu gestalten.

Glossar

Quellen für das Glossar: IPCC (2001 und 2007), Schirmer & Wittig (2007), Born (2009) und MICE (2005).

Emissionsszenario

Eine plausible Darstellung der zukünftigen Entwicklung der Emissionen von Substanzen, die möglicherweise strahlungswirksam sind (z.B. Treibhausgase, Aerosole), basierend auf einer kohärenten und in sich konsistenten Reihe von Annahmen über die zugrunde liegenden Kräfte (wie demographische und sozioökonomische Entwicklung oder Technologiewandel) und deren Schlüsselbeziehungen. Von Emissionsszenarien abgeleitete Konzentrationsszenarien werden als Vorgabe für die Berechnung von Klimaprojektionen mit Klimamodellen eingesetzt. IPCC präsentierte 1992 eine Reihe von Emissionsszenarien, die als Basis für die Klimaprojektionen des IPCC-Berichts aus dem Jahr 1996 dienten. Diese Emissionsszenarien werden als die IS92-Szenarien bezeichnet. Im IPCC-Sonderbericht zu den Emissionsszenarien (IPCC 2000) wurden neue Emissionsszenarien – die sogenannten SRES-Szenarien – veröffentlicht. Einige dieser Szenarien wurden unter anderem als Basis für die Klimaprojektionen in IPCC 2001 und 2007 verwendet.

Erkennung und Zuordnung von Klimaänderungen

Das Klima ändert sich ständig auf allen Zeitskalen. Die Erkennung einer Klimaänderung ist das Verfahren, mit dem aufgezeigt wird, dass sich das Klima in einem bestimmten statistischen Sinn geändert hat, ohne einen Grund für diese Änderung zu nennen. Die Zuordnung von Gründen für die Klimaänderung ist das Verfahren der Bestimmung der wahrscheinlichsten Gründe für die erkannten Änderungen auf einem bestimmten Vertrauensniveau (IPCC 2007).

Extremes Wetterereignis

Ein extremes Wetterereignis ist ein Ereignis, das an einem bestimmten Ort und zu einer bestimmten Jahreszeit selten ist. Die Definitionen für „selten“ variieren, aber ein extremes Wetterereignis wäre normalerweise so selten wie oder seltener als das 10- oder 90%-Perzentil der beobachteten Wahrscheinlichkeitsverteilung. Per Definition kann die Charakteristik von so genanntem „Extremwetter“ absolut gesehen von Ort zu Ort unterschiedlich sein. Einzelne Extremereignisse können nicht einfach und direkt der anthropogenen Klimaänderung zugeordnet werden, da immer eine begrenzte Chance besteht, dass das betreffende Ereignis auch natürlicherweise hätte auftreten können. Wenn ein Muster von extremem Wetter über eine bestimmte Zeitspanne, z.B. eine Saison, bestehen bleibt, kann es als „extremes Klimaereignis“ klassiert werden, vor allem wenn es ein Mittel bzw. eine Summe aufweist, die seinerseits bzw. ihrerseits extrem ist (z.B. eine Dürre als eine bestimmte Anzahl von Tagen ohne Niederschlag, eine Hitzeperiode als eine bestimmte Zahl von heißen Tagen ($T_{max.} \geq 30^{\circ}C$) und tropischen Nächten ($T_{min.} \leq 20^{\circ}C$) oder Starkniederschlag während einer Saison oder an einem Tag mit bestimmten Mindestwerten; IPCC 2007, MICE 2005).

Klimaänderung

Klimaänderung bezieht sich auf jede Änderung des Klimas im Verlauf der Zeit, die aufgrund einer Änderung im Mittelwert oder im Schwankungsbereich seiner Eigenschaften identifiziert werden kann (z.B. mit Hilfe von statistischen Tests), und die über eine längere Periode von typischerweise Jahrzehnten oder noch länger andauert. Klimaänderung kann durch interne natürliche Schwankungen oder durch äußeren Antrieb oder durch andauernde anthropogene Veränderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre oder der Landnutzung zustande kommen. Es ist zu beachten, dass das Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) im Artikel 1 Klimaänderung definiert als „Änderungen des Klimas, die unmittelbar oder mittelbar auf menschliche Tätigkeiten zurückzuführen sind, welche die Zusammensetzung der Erdatmosphäre verändern, und die zu den über vergleichbare Zeiträume beobachteten natürlichen Klimaschwankungen hinzukommen.“ Das UNFCCC unterscheidet also zwischen Klimaänderung verursacht durch die Veränderung der Zusammensetzung der Atmosphäre aufgrund menschlicher Aktivitäten und Klimavariabilität aufgrund natürlicher Ursachen (s. a. Klimavariabilität, Erkennung und Zuordnung) (IPCC 2007).

Klimamodell

Eine numerische Darstellung des Klimasystems, die auf den physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften seiner Bestandteile, seinen Wechselwirkungen und Rückkopplungsprozessen basiert und alle oder einige seiner bekannten Eigenschaften berücksichtigt. Das Klimasystem kann von Modellen unterschiedlicher Komplexität dargestellt werden, d.h. für jeden Bestandteil oder eine Kombination von Bestandteilen kann ein Modellspektrum oder eine Modellhierarchie bestimmt werden, die sich in Aspekten unterscheidet wie der Anzahl der räumlichen Dimensionen, dem Ausmaß, in welchem physikalische, chemische oder biologische Prozesse explizit dargestellt werden, oder bis zu welchem Grad empirische Parametrisierungen verwendet werden. Klimamodelle werden als Forschungsinstrument verwendet, um das Klima zu untersuchen und zu simulieren, aber auch für operationelle Zwecke, einschließlich monatlicher, saisonaler und jahresübergreifender Klimaprognosen (IPCC 2007).

Klimaprognose

Eine Klimaprognose oder Klimavorhersage ist das Resultat eines Versuchs, eine Schätzung der effektiven Entwicklung des Klimas in der Zukunft vorzunehmen, z.B. auf saisonaler, jahresübergreifender oder längerfristiger Zeitskala. Weil die zukünftige Entwicklung des Klimasystems stark von den Ausgangsbedingungen abhängen kann, bestehen solche Prognosen in der Regel aus Wahrscheinlichkeitsangaben (siehe auch Klimaprojektion; IPCC 2007).

Klimaprojektion

Eine Projektion ist die Reaktion des Klimasystems auf Emissions- oder Konzentrationsszenarien von Treibhausgasen, Aerosolen oder Strahlungsantriebs-Szenarien, häufig auf Klimamodellsimulationen basierend. Klimaprojektionen werden von Klimaprognosen

unterschieden um zu betonen, dass Klimaprojektionen von den verwendeten Emissions-/Konzentrations- bzw. Strahlungsantriebs-Szenarien abhängen, die auf Annahmen z.B. über zukünftige gesellschaftliche und technologische Entwicklungen beruhen, die nur eventuell verwirklicht werden und deshalb mit erheblichen Unsicherheiten verbunden sind (IPCC 2007).

Klimaszenario

Eine plausible und häufig vereinfachte Beschreibung des zukünftigen Klimas, die auf einer in sich konsistenten Zusammenstellung von klimatologischen Beziehungen beruht und die zum expliziten Zweck konstruiert wurde, die möglichen Folgen einer anthropogenen Klimaänderung zu erforschen. Klimaszenarien sind meist von Klimaprojektionen abgeleitet, integrieren aber oft zusätzlichen Informationen aus anderen Quellen über klimawandelbedingte Veränderungen zu betrachtender Parameter.

Klimavariabilität

Klimavariabilität bezieht sich auf Schwankungen des mittleren Zustandes und anderer statistischer Größen (wie Standardabweichungen, Vorkommen von Extremerscheinungen usw.) des Klimas auf allen zeitlichen und räumlichen Skalen, die über einzelne Wetterereignisse hinausgehen. Die Variabilität kann durch natürliche interne Prozesse innerhalb des Klimasystems (interne Variabilität) oder durch natürliche oder anthropogene äußere Einflüsse (externe Variabilität) begründet sein (s.a. Klimaänderung; IPCC 2007).

Definitionen der Klimaparameter

Die folgenden Definitionen für die betrachteten Klimaparameter sind aus den Klima- und DWD-Messdatenformaten sowie dem Vorgehen in der Datenauswertung für den Norddeutschen Klimaatlas abgeleitet. Falls weitere Quellen herangezogen werden mussten, sind sie bei den einzelnen Parametern angegeben.

Bewölkungsgrad (Bedeckungsgrad): Bezeichnet den Grad der Bewölkung. Wenn die Bewölkung im Tagesmittel 0 Achtel beträgt, spricht man von sonnigem Himmel, bei 1 bis 3 Achtel spricht man von einem leicht bewölkten oder heiteren Himmel. Wenn die Bewölkung 4 bis 6 Achtel beträgt, handelt es sich um einen wolkgigen oder bewölkten Himmel. Bedeckt ist der Himmel bei 7 bis 8 Achtel Bewölkung (s.a. sonnige Tage).

Dampfdruck: bezeichnet den Partialdruck des Wasserdampfs (in hPa).

Eistage: Tage, an denen die maximale Lufttemperatur nicht über 0°C steigt ($T_{\max.} \leq 0^\circ\text{C}$).

Frosttage: Tage, an denen die minimale Lufttemperatur kleiner oder gleich 0°C ist ($T_{\min.} \leq 0^\circ\text{C}$).

Heiße Tage: Tage, an denen die maximale Lufttemperatur mindestens einmal am Tag größer oder gleich 30°C ist ($T_{\max.} \geq 30^\circ\text{C}$; s.a. Hitzeperiode).

Hitzeperiode: länger andauernde Phase von heißem Wetter. Es existiert keine allgemein gültige Definition für eine Hitzewelle, da regionale klimatische Unterschiede auch eine unterschiedliche Akklimatisierung der Bevölkerung mit sich bringen. Aber auch innerhalb der klimatisch ähnlichen Regionen sind unterschiedliche Definitionen im Gebrauch. In einer Analyse zu hitzebedingten Mortalitätssteigerungen in den Niederlanden definieren Huyen et al. (2001), dass eine Hitzeperiode dann vorliegt, wenn an fünf aufeinander folgenden Tagen eine Maximaltemperatur von 25°C und an drei dieser Tage eine Maximaltemperatur von 30°C überschritten wird. Für Tschechien gebrauchen Kysely (2004) die Definition von mindestens drei aufeinander folgenden Tagen mit einer Maximaltemperatur von mindestens 30°C. Nach der Definition des DWD ist ein Hitzetag in Deutschland ein Tag mit einer Maximaltemperatur von mindestens 30°C (s. heiße Tage). Die Auswertung der Klimadaten bezüglich veränderter Intensität von Hitzeperioden steht noch aus und wird gegebenenfalls in der Vulnerabilitätsanalyse weiter bearbeitet.

Maximale Windgeschwindigkeit (Sturmintensität): maximaler Betrag des Windvektors in 10 Meter Höhe.

Mittlere Windgeschwindigkeit: mittlerer Betrag des Windvektors in 10 Meter Höhe.

Nasse Tage: Tage, an denen die Niederschlagsmenge (Schnee und Regenwasser) mindestens 10 mm beträgt (Niederschlag ≥ 10 mm).

Nebelige Tage: Tage, an denen die relative Luftfeuchte größer oder gleich 93% ist (nach Matzarakis 2007).

Regentage: Tage, an denen die Niederschlagsmenge (Schnee und Regenwasser) größer 1 mm beträgt (Niederschlagsmenge > 1 mm).

Relative Luftfeuchte: Relativmaß für den Grad der Sättigung der Luft mit Wasserdampf – definiert als der aktuelle Dampfdruck im Verhältnis zum Sättigungsdampfdruck über Wasser bei vorgegebener Lufttemperatur. Die spezifische Feuchte ist eine konservative Größe, da Massen im Gegensatz zu Volumina (bei Temperaturänderung) konstant bleiben.

Schneebedeckung: Zahl der Tage, an denen die Schneedecke größer oder gleich 1 cm ist.

Schneemenge wird als Schneewasseräquivalent angegeben. Das ist die Wassermenge in mm, die man erhält, wenn man eine Schneedecke mit bekannter Höhe und Dichte zum Schmelzen bringt. Durch die Kristallstruktur der Schneeflocken ist die Schneehöhe deutlich höher als die entsprechende Wassermenge. Als Faustregel gilt: 1 mm Niederschlag entspricht rund 1 cm Schnee.

Schneetage: Tage, an denen sich der gefallene Niederschlag ausschließlich aus Schneewasser zusammensetzt.

Schwüle Tage: Tage, an denen der Dampfdruck größer 18 Hektopascal (hPa) ist (nach Matzarakis et al. 2009).

Sommertage: Tage, an denen die maximale Lufttemperatur mindestens einmal am Tag über 25°C steigt ($T_{\max.} \geq 25^{\circ}\text{C}$).

Sonnenscheindauer: stündlicher Wert, beim dem die direkte einfallende kurzwellige Sonnenstrahlung 120 W/m² übersteigt.

Sonlige Tage: Tage, an denen das Verhältnis von Sonnenschein und Bewölkung größer 50% ist (entspricht einem Bedeckungsgrad < 4 Achtel; nach Matzarakis et al. 2009, DWD 2009).

Starkregentage (Starkregenereignisse): Tage, an denen die Niederschlagsmenge (Schnee und Regenwasser) größer oder gleich 20 mm beträgt (Niederschlagsmenge ≥ 20 mm; MICE 2005).

Sturmtage: Tage, an denen die maximale Windgeschwindigkeit 62 km/h bzw. 17,2 m/s (Beaufort-Skala 8 = stürmischer Wind) überschreitet ($V_{\max.} > 62$ km/h bzw. 17,2 m/s). Die Auswertung der Klimadaten bezüglich veränderter Häufigkeit von Sturmtagen steht noch aus und wird gegebenenfalls in der Vulnerabilitätsanalyse weiter bearbeitet.

Trockenperiode: Vom Wasserbedarf und den naturräumlichen Gegebenheiten abhängige Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage (s.a. Trockentage). Der Begriff Trockenperiode ist in verschiedener Weise definiert: Nobilis (1980) legt z.B. für Trockenperioden fest, dass die Trockenheit mindestens 6 Tage andauern muss und dass tägliche Niederschlagshöhen bis 0,2 mm keine Unterbrechung der Periode darstellen. Die Auswertung der Klimadaten bezüglich veränderter Intensität von Trockenperioden – auch anhand der laufenden Niederschlags-Abfluss-Modellierung – steht noch aus und wird gegebenenfalls in der Vulnerabilitätsanalyse weiter bearbeitet.

Trockentage: Tage, an denen die Niederschlagsmenge kleiner oder gleich 1 mm beträgt (Niederschlagsmenge ≤ 1 mm).

Tropische Nächte, Tropennacht: Tage bzw. Nächte, an denen die minimale Lufttemperatur nicht unter 20°C sinkt ($T_{\min.} \geq 20^{\circ}\text{C}$).

Wasserdampf (bodennaher Wasserdampfgehalt): definiert als die Masse des Wasserdampfes im Verhältnis zur Masse der feuchten Luft; angegeben für das 850 hPa-Druckniveau.

Windstille Tage: Tage, an denen die maximale Windgeschwindigkeit 12 km/h oder 3,3 m/s (Beaufort-Skala 2 = leichte Brise) unterschreitet ($V_{\max.} < 12$ km/h bzw. 3,3 m/s). Die Auswertung der Klimadaten bezüglich veränderter Häufigkeit von windstillen Tagen steht noch aus und wird gegebenenfalls in der Vulnerabilitätsanalyse weiter bearbeitet.

Literatur

- Boelens, R., D. Minchin & G. O’Sullivan (2005): Climate change. Implications for Ireland’s Marine Environment and Resources. Marine Foresight series 2, pp. 38
- Born, M. (2009): Glossar zur Klimaanpassung. Sustainability Center Bremen (SCB), Werkstattberichte, Nr. 7, September 2009, im Rahmen des Projekts „KlimaWandel Unterweser“, 17 S. [<http://www.klimawandel-unterweser.ecolo-bremen.de/>, 04.12.2009]
- BSH – Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2008): Meeresumwelt-Symposium 2008. Kurzfassungen der Vorträge des 18. Symposiums vom 27. bis 28. Mai 2008, 54 S.
- BSH – Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2010): Warme Nordsee trotz Kältewelle. Pressemitteilung vom 09.02.2010.
[http://www.bsh.de/de/Das_BSH/Presse/Pressearchive/Pressemitteilungen2010/3-2010.jsp]
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2009): Wetterlexikon. Deutscher Wetterdienst (Hrsg), Offenbach
[<http://www.dwd.de/>, 16.03.2010]
- EEA – European Environment Agency (2008): Impacts of Europe’s changing climate - 2008 indicator-based assessment. Joint EEA-JRC-WHO Report, EEA Report No. 4/2008, JRC Reference Report No. JRC-47756, 246 S.
[http://reports.eea.europa.eu/eea_report_2008_4/en, 29.09.2008]
- GCP – Global Carbon Project (2009): Carbon budget and trends 2008. Veröffentlicht am 17. November 2009 [<http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget>, 18.03.2010]
- Gillett, N. P., H. F. Graf & T. J. Osborn (2003): Climate change and the North Atlantic Oscillation. In: J. W. Hurrell, Y. Kushnir, G. Ottersen & M. Visbeck (Hrsg.): North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. Washington, DC: American Geophysical Union, S. 193–209
- Grabemann, H. J., I. Grabemann & A. Müller (2005): Die Auswirkungen eines Klimawandels auf Hydrografie und Gewässergüte der Unterweser. In: Schuchardt, B. & M. Schirmer (Hrsg.): Klimawandel und Küste. Die Zukunft der Unterweserregion. Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, S. 59-77
- Grinsted, A., J. C. Moore & S. Jevrejeva (2009): Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100AD. Climate Dynamics, Volume 34, Number 4, März 2010, S. 461-472 [<http://dx.doi.org/10.1007/s00382-008-0507-2>, 18.03.2010]
- Hollweg, H. D., U. Böhm, I. Fast, B. Hennemuth, K. Keuler, E. Keup-Thiel, M. Lautenschlager, S. Legutke, K. Radtke, B. Rockel, M. Schubert, A. Will, M. Woldt & C. Wunram (2008): Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios. M & D Technical Report 3

- Huyen, M., P. Martens, D. Schram, M. P. Weijenberg & A. E. Kunst (2001): The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population. *Environmental Health Perspectives*, 109 (5), S. 463-470
- 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 J. T., Ding Y., Griggs D. J., Noguer M., van der Linden P. J., Dai X., Maskell K., Johnson C. A. (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: Gönnert, G., H. Graßl, D. Kelletat, 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.*
- Kirby, R. R., Beaugrand, G. et al. (2007): *Climate effects and benthic-pelagic coupling in the North Sea.* *Marine Ecology Progress Series* 330: 31-38.

- Kraberg, A. C., G. Husmann, N. Brennholt, N. Lücke, S. Ehmen & K. H. Wiltshire (2008): Konsequenzen des Klimawandels für die Biodiversität der Meere. Biologische Anstalt Helgoland (BAH) des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung (AWI). Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes „Wie wirkt der Klimawandel auf die Biodiversität der Meere?“. Dessau
- Kysely, J. (2004): Mortality and displaced mortality during heat waves in the Czech Republic. *Int. J. Biometeorol.*, 49, S. 91-97
- Lemke, P. (2009): Neue Entwicklungen seit dem IPCC-Klimabericht 2007. Präsentation im Rahmen der Abschlussveranstaltung des klimazwei-Projekts KlimaWandel Unterweser am 18. Juni 2009 [<http://www.klimawandel-unterweser.eco-bremen.de/index.php?obj=page&id=130&unid=c65414798679db40bc98a4441e4f73aa,30.12.2009>]
- 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
- Matzarakis, A. (2007): Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Integration von Wetter- und Klimabedingungen im Tourismus. *Berichte des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg*, Nr. 16, S. 73-79
- Matzarakis, A., C. Endler & S. Körner (2009): Klimawandel an der Nordsee – Eine tourismusklimatische Quantifizierung. *Die Küste* 76, 16 S.
- 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]
- MICE (2005): Final-Report of the MICE-Project (Modelling the Impacts of Climate Extremes). Climatic Research Unit, University of East Anglia, UK, 20 p. [<http://www.cru.uea.ac.uk/projects/mice/index.html>, 19.12.2006]
- 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]
- Münchener Rück (2004, Hrsg.): TOPICSgeo - Jahresrückblick Naturkatastrophen 2003. 2003, Hitzesommer in Europa – Die Zukunft hat bereits begonnen. Münchener Rückversicherungsgesellschaft, 56 S. [http://www.munichre.com/publications/302-03970_de.pdf, 16.11.2009]
- 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]

- Nobilis, F. (1980): Extreme Trockenperioden im Jahr in Österreich. Arch. Met. Geoph. Biokl., Set. B, 28, S. 339-349
- 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
- Rahmstorf, S., A. Cazenave, J. A. Church, J. E. Hansen, R. F. Keeling, D. E. Parker & R. C. J. Somerville (2007): Recent Climate Observations Compared to Projections. Science, Vol 316, 4. May 2007, S. 709
- Raupach, M. R., G. Marland, P. Giais, C. L. Quéré, J. G. Candadell, G. Klepper & C.B. Field (2007): Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions. Proceedings of the National Academy of Sciences 104, S. 10288-10293
- 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. (2010): Klimawandel: Folgen für Ems, Weser und Elbe. Ausstellungskatalog „Klimawandel“ des Landesmuseums für Natur und Mensch, Oldenburg, 2010
- 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., S. Wittig, M. Schirmer (2008): Klimawandel und Ästuare - Perspektiven für den Naturschutz. Studie für den WWF Deutschland, Frankfurt am Main, 70 S.
- Spekat, A., W. Enke & F. Kreienkamp (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes, FuE-Vorhaben, Förderkennzeichen 20441138, 149 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 (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]
- UBA – Umweltbundesamt (2009): Klimawandel und marine Ökosysteme - Meeresschutz ist Klimaschutz. Herausgeber: Umweltbundesamt, Hintergrundpapier, Juni 2009, 62 S. [<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3805.pdf>, 07.08.2009]
- 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]
- University of Copenhagen (2009): Synthesis Report from Climate Change – Global Risk, Challenges & Decisions, March 2009. Copenhagen [<http://www.climatecongress.ku.dk>, 21.06.2009]
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2006): Die Zukunft der Meere - zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten, 114 S. [http://www.wbgu.de/wbgu_sn2006.html, 31.05.2006]
- 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
- Woth, K. & H. von Storch (2008): Klima im Wandel: Mögliche Zukünfte des Norddeutschen Küstenklimas. In: Dithmarschen: Landeskunde - Kultur - Natur, Heft 1/2008, S. 20-31
- Woth, K., R. Weisse & H. von Storch (2005): Dynamical modelling of North Sea storm surge extremes under climate change conditions - an ensemble study. Ocean Dyn. DOI 10.1007/s10236-005-0024-3
- WWF (2009): Die mögliche Wirkung des Klimawandels auf Wassertemperaturen von Fließgewässern. 26 S. [http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf_neu/Wirkung_des_Klimawandels_auf_Wassertemperaturen_von_Fliessgewaessern..pdf, 08.03.2010]

Anhang

Tabelle 8: Liste der für die relevanten Klimaparameter verfügbaren Karten aus den jeweiligen regionalen Klimamodellen CLM (Model & Data und SGA: <http://www.mad.zmaw.de/>) und REMO (MPI-M 2007: <http://www.mpimet.mpg.de/>), dem Norddeutschen Klimaatlas (Norddeutsches Klimabüro: <http://www.norddeutscher-klimaatlas.de/>) und dem Projekt ZWEK (DWD: <http://www.dwd.de/>) für verschiedene Zeitperioden

Parameter	CLM: jährliche Mittel für A1B_1 und A1B_2, DS 3 für Deutschland sowie jährliche Mittel und saisonale Mittel für Europa; Vergleich zu drei C20-Läufen	Klimaatlas: Differenzen der jährlichen und saisonalen Mittel und Spannweiten für MPR HB-OL; Mittel aus mehreren SRES und Regionalmodellen; Vergleichsperiode 1961-1990	REMO: Differenzen der jährlichen sowie sommerlichen und winterlichen Mittel für A1B; Deutschland; Vergleichsperiode 1961-1990	ZWEK (Modellvergleich DWD): Differenzen der Jahresmittel und saisonalen Mittel für A1B; Deutschland; Änderung im Vergleich zu 1971-2000
2m-Temperatur (in °C)	Zeitperioden 2021-2050, 2031-2060, 2071-2100	Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100	Zeitperioden 2016-2045, 2036-2065, 2071-2100	Zeitperioden 2021-2050, 2071-2100
Frosttage: Zahl der Tage mit Minimumtemperatur unter 0°C (Tmin. ≤ 0°C)	Zeitperioden 2021-2050, 2031-2060, 2071-2100	Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100		
Eistage: Zahl der Tage mit Maximumtemperatur unter 0°C (Tmax. ≤ 0°C)	Zeitperioden 2021-2050, 2031-2060, 2071-2100	Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100		

Parameter	CLM: jährliche Mittel für A1B_1 und A1B_2, DS 3 für Deutschland sowie jährliche Mittel und saisonale Mittel für Europa; Vergleich zu drei C20-Läufen	Klimaatlas: Differenzen der jährlichen und saisonalen Mittel und Spannweiten für MPR HB-OL; Mittel aus mehreren SRES und Regionalmodellen; Vergleichsperiode 1961-1990	REMO: Differenzen der jährlichen sowie sommerlichen und winterlichen Mittel für A1B; Deutschland; Vergleichsperiode 1961-1990	ZWEK (Modellvergleich DWD): Differenzen der Jahresmittel und saisonalen Mittel für A1B; Deutschland; Änderung im Vergleich zu 1971-2000
Sommertage: Zahl der Tage mit Maximumtemperatur über 25°C (Tmax. ≥ 25°C)	Zeitperioden 2021-2050, 2031-2060, 2071-2100	Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100		Zeitperioden 2021-2050, 2071-2100
Tropennächte: Zahl der Tage/Nächte mit Minimumtemperatur über 20°C (Tmin. ≥ 20°C)	Zeitperioden 2021-2050, 2031-2060, 2071-2100	Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100		
Heiße Tage: Zahl der Tage mit Maximumtemperatur über 30°C (Tmax. ≥ 30°C)		Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100		Zeitperioden 2021-2050, 2071-2100
Bedeckungsgrad (%)		Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100		

Parameter	CLM: jährliche Mittel für A1B_1 und A1B_2, DS 3 für Deutschland sowie jährliche Mittel und saisonale Mittel für Europa; Vergleich zu drei C20-Läufen	Klimaatlas: Differenzen der jährlichen und saisonalen Mittel und Spannweiten für MPR HB-OL; Mittel aus mehreren SRES und Regionalmodellen; Vergleichsperiode 1961-1990	REMO: Differenzen der jährlichen sowie sommerlichen und winterlichen Mittel für A1B; Deutschland; Vergleichsperiode 1961-1990	ZWEK (Modellvergleich DWD): Differenzen der Jahresmittel und saisonalen Mittel für A1B; Deutschland; Änderung im Vergleich zu 1971-2000
Sonnenscheindauer (Stunden)		Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100		
Gesamtniederschlag / mittlere Niederschlagsmenge	Zeitperioden 2021-2050, 2031-2060, 2071-2100 (in kg/m ²)	Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100	Zeitperioden 2016-2045, 2036-2065, 2071-2100 (nur meteorologischer Sommer und Winter in %)	Zeitperioden 2021-2050, 2071-2100 (in %)
Schneemenge (%)		Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100		
Schneetage: Zahl der Tage mit Schneefall	Zeitperioden 2021-2050, 2031-2060, 2071-2100	Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100		
Zahl der Tage mit Schneebedeckung	Zeitperioden 2021-2050, 2031-2060, 2071-2100			

Parameter	CLM: jährliche Mittel für A1B_1 und A1B_2, DS 3 für Deutschland sowie jährliche Mittel und saisonale Mittel für Europa; Vergleich zu drei C20-Läufen	Klimaatlas: Differenzen der jährlichen und saisonalen Mittel und Spannweiten für MPR HB-OL; Mittel aus mehreren SRES und Regionalmodellen; Vergleichsperiode 1961-1990	REMO: Differenzen der jährlichen sowie sommerlichen und winterlichen Mittel für A1B; Deutschland; Vergleichsperiode 1961-1990	ZWEK (Modellvergleich DWD): Differenzen der Jahresmittel und saisonalen Mittel für A1B; Deutschland; Änderung im Vergleich zu 1971-2000
relative Luftfeuchtigkeit / Luftfeuchte (%)		Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100		
Zahl der Tage mit Niederschlag bzw. Regentag	Zeitperioden 2021-2050, 2031-2060, 2071-2100	Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100		
Zahl der Tage mit Niederschlag mindestens 10 kg/m ² (10 mm/Tag)	Zeitperioden 2021-2050, 2031-2060, 2071-2100			
Zahl der Tage mit Niederschlag mindestens 20 kg/m ² (20 mm/Tag)	Zeitperioden 2021-2050, 2031-2060, 2071-2100			
mittlere Windgeschwindigkeit	Zeitperioden 2021-2050, 2031-2060, 2071-2100	Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100		

Parameter	CLM: jährliche Mittel für A1B_1 und A1B_2, DS 3 für Deutschland sowie jährliche Mittel und saisonale Mittel für Europa; Vergleich zu drei C20-Läufen	Klimaatlas: Differenzen der jährlichen und saisonalen Mittel und Spannweiten für MPR HB-OL; Mittel aus mehreren SRES und Regionalmodellen; Vergleichsperiode 1961-1990	REMO: Differenzen der jährlichen sowie sommerlichen und winterlichen Mittel für A1B; Deutschland; Vergleichsperiode 1961-1990	ZWEK (Modellvergleich DWD): Differenzen der Jahresmittel und saisonalen Mittel für A1B; Deutschland; Änderung im Vergleich zu 1971-2000
windstille Tage		Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100		
Sturmtage		Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100		
Sturmintensität (in %)		Zeitperioden 2011-2040, 2016-2045, 2021-2050, 2026-2055, 2031-2060, 2036-2065, 2041-2070, 2046-2075, 2051-2080, 2056-2085, 2061-2090, 2066-2095, 2071-2100		