



Regionale Klimainformationen für Bremerhaven

Überprüfung, Erweiterung, Anwendung

CITY SERIES 01



Titelbild: © Fotolia / Chris

Zitierhinweis: Bender, S., Groth, M. & Raub, T. (2018): Regionale Klimainformationen für Bremerhaven – Überprüfung, Erweiterung, Anwendung. – City Series 01, Climate Service Center Germany, Hamburg

Erscheinungsdatum: Juli 2018

Dieser Report ist auch online unter www.climate-service-center.de erhältlich

Regionale Klimainformationen für Bremerhaven

Überprüfung, Erweiterung, Anwendung

Autoren: Steffen Bender, Markus Groth, Thomas Raub

August 2018

Inhaltsverzeichnis

0. Vorwort	3
1. Einleitung	5
2. Regionale Klimaprojektionen	7
2.1. Bewertung der Klimaveränderungen (Klimaänderungsszenarien)	7
2.1.1. Methodischer Ansatz	8
2.1.2. Modellierte historische Klimabedingungen	10
2.1.3. „Klimaschutz-Szenario“ (RCP2.6).....	11
2.1.4. Moderates Emissionsszenario (RCP4.5).....	12
2.1.5. „Business-as-usual“-Szenario (RCP8.5).....	13
2.2. Bewertung der Klimaprojektionen in der Anpassungsstrategie	14
2.2.1. Methodischer Ansatz des Vergleichs beider Ergebnisdatensätze	15
2.2.2. Temperaturzunahme und Hitze	18
2.2.3. Niederschläge und Starkregen	18
2.2.4. Fazit des Vergleichs	20
3. Zusammenfassende Bewertung für Bremerhaven.....	21
3.1. Klimaparamater – zukünftige Trends	21
3.2. Auswirkungen des Klimawandels auf den lokalen Wasserhaushalt	23
4. Literatur.....	25
Anhang 1: EURO-CORDEX – Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment	26
Anhang 2: Überblick der verwendeten Klimamodelle für das EC-Ensemble-Set	27
Anhang 3: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Klimaanpassungsstrategie für Bremen und Bremerhaven und dem EC-Ensemble-Set für RCP8.5 (2012 – 2050).	28

Abbildungsverzeichnis

Abb.1 Lage des geplanten Gewerbegebietes auf einer Teilfläche der Luneplate in Bremerhaven.....	6
Abb.2 Beispiel für die ausgewählten Gitterboxen für den Bereich Bremerhaven sowie der verwendeten Boxen aus dem E-OBS-Datensatz.	9
Abb.3 Schematische Darstellung der Bandbreitenermittlung aus den Ergebnissen der Klimaprojektionen der Anpassungsstrategie Bremen und Bremerhaven.	16
Abb.4 Vergleich der Bandbreiten des EC-Ensemble-Sets mit den Ergebnissen der Klimaanpassungsstrategie Bremen und Bremerhaven (KASB) (RCP8.5, 2021 – 2050).....	17
Abb.5 Vergleich der Klimaprojektionen aus dem ReKlies-De-Projekt (für Deutschland, Änderungen der Niederschlagsmengen im Sommer (1986 – 2085) für RCP8.5, 30-jähriges gleitendes Mittel.....	19
Abb.6 Temperatur und Vegetationsperiode – Gegenüberstellung der EC-Ensemble-Set Ergebnisse für die Zeiträume 1971 – 2000 und 2021 – 2050.....	22
Abb.7 Niederschlag, Trockenheit und Windstärke – Gegenüberstellung der EC-Ensemble-Set Ergebnisse für die Zeiträume 1971 – 2000 und 2021 – 2050.....	23

Tabellenverzeichnis

Tab.1 Übersicht der verwendeten Klimaindizes und –variablen und deren Erläuterung	7
Tab.2 Beobachtungsdaten „E-OBS-Datensatz“ und modellierte historischen Daten des EC-Ensemble-Sets	10
Tab.3 Berechnete Variablen und Indizes des EC-Ensemble-Sets: historischer Zeitraum (1971 – 2000) und Zukunftsszenario RCP2.6 (2021 – 2050).	11
Tab.4 Berechnete Variablen und Indizes des EC-Ensemble-Sets: historischer Zeitraum (1971 – 2000) und Zukunftsszenario RCP4.5 (2021 – 2050).	13
Tab.5 Berechnete Variablen und Indizes des EC-Ensemble-Sets: historischer Zeitraum (1971 – 2000) und Zukunftsszenario RCP8.5 (2021 – 2050).	14
Tab.6 Verwendete Klimamodelle im Nationalen Klimareport des Deutschen Wetterdienstes.....	15
Tab.7 Zusammenfassung der Veränderungen ausgesuchter Klimaparameter (Trend bis 2050).....	21

Box-Verzeichnis

Box 1 Die „Repräsentativen Konzentrationspfade“ (RCP)	8
Box 2 Simulationsgitterbox.	8
Box 3 E-OBS-Datensatz	9
Box 4 Dynamische und statistische Regionalisierungsmethoden	18

0. Vorwort

Der Temperaturanstieg als Folge des Klimawandels ist auch im Norden Deutschlands messbar. Seit dem Beginn der Temperaturlaufzeichnungen im Jahr 1881 ist das Jahresmittel der Lufttemperatur in Bremen und Bremerhaven um rund 1,3°C angestiegen (Quelle: DWD). Sieben der zehn wärmsten Jahre wurden seit dem Jahr 2000 gemessen (Quelle DWD). Durch die Meeresnähe, die niedrige Geländehöhe und die tidebeeinflussten Gewässer besteht eine besondere Exposition Bremens und Bremerhavens gegenüber einem Anstieg des Meeresspiegels. Auch sind beide Städte urbanen Überflutungen durch Starkregenereignisse – wie alle Regionen Deutschlands – gleichermaßen ausgesetzt.

Die Wettbewerbsfähigkeit einer Region sollte nicht durch den Klimawandel beeinträchtigt werden. Am Beispiel des vom Bund und der Stadt Bremerhaven geförderten Projektes „Green Economy“ soll die ressourcensparende, nachhaltige und klimawandeltaugliche Entwicklung eines Gewerbegebiets unter Verwendung der aktuell zu Verfügung stehenden Ergebnisse eines regionalen Klimamodellensembles erreicht werden. Die hier angewandte Methodik basiert auf dem im Report zum „GERICS-Stadtbaukasten“ für das Modul „Klimawandeltaugliche Kompensationsmaßen“ (Bender et al. 2017a) beschriebenen Vorgehen.

Die in dem vorliegenden Bericht beschriebene Untersuchung ist Bestandteil einer Kooperation des Climate Service Center Germany (GERICS) am Helmholtz-Zentrum Geesthacht mit der Bremerhavener Gesellschaft für Investitionsförderung und Stadtentwicklung mbH (BIS). Die BIS ist, im Auftrag der Stadt Bremerhaven und des Landes Bremen, für die Entwicklung, Stärkung und Vermarktung des Wirtschaftsstandortes Bremerhaven zuständig. Mit der Entwicklung des nachhaltig ausgerichteten Gewerbegebiets „Luneplate“ soll erfolgreiches Wirtschaften mit notwendigen ökologischen Kriterien in Einklang gebracht werden. Durch die Mitarbeit des GERICS wird der Flächenentwicklungsprozess – bei dem die Aspekte Nachhaltigkeit und Klimaresilienz Schwerpunkte bilden – um die Anpassung an die Folgen des Klimawandels erweitert. Dazu werden die vorhandenen regionalen Klimainformationen überprüft, mit neuen Ergebnissen ergänzt und daraus Auswirkungen für Bremerhaven abgeleitet.

Dank

Vielen Dank an Jörg Cortekar, Irene Fischer-Bruns, Juliane Otto und Elisabeth Viktor für den internen Review und ihre zahlreichen Anmerkungen, die substantiell zur Verbesserung des Inhalts beigetragen haben.

Wir weisen hiermit auf die Nutzung des E-OBS-Datensatzes aus dem EU-FP6-Projekt ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com>) und die Datenanbieter des ECA&D-Projektes (<http://www.ecad.eu>) hin.

1. Einleitung

Der Klimawandel und die fortschreitende Urbanisierung sind eng miteinander verknüpft. Bereits heute sind Städte für den Großteil des weltweiten Energieverbrauchs und der damit verbundenen CO₂-Emissionen verantwortlich. Somit weisen Städte ein großes Klimaschutzpotenzial auf. Andererseits besitzen Städte durch die hohe Konzentration wirtschaftlicher Wertschöpfung, Menschen und Infrastruktur eine hohe Vulnerabilität in Bezug auf die Folgen des Klimawandels. Dadurch kommt auch den Anstrengungen zur Anpassung an diese Folgen eine verstärkte Bedeutung zu. Die Umsetzung ist hierbei jedoch nicht trivial, da Städte sehr komplexe Systeme sind, bei deren Management sowohl klimatisch als auch nicht-klimatisch bedingte Treiber und darüber hinaus auch noch deren Wechselwirkungen beachtet werden müssen (Bender et al. 2016).

Nahezu alle kommunalen Handlungsfelder sind von den Folgen des Klimawandels betroffen, wenngleich in unterschiedlichem Maße. Um Maßnahmen für die Anpassung an die Folgen des Klimawandels zu entwickeln, auszugestalten und umzusetzen, sollten daher zwingend mögliche, zukünftige Klimaveränderungen berücksichtigt werden. Dies gilt auch für die Planungen zur Ausweisung und Gestaltung nachhaltiger Gewerbegebietsflächen. Im Rahmen des vom Bund und der Stadt Bremerhaven geförderten Projektes „Green Economy“ soll unter Berücksichtigung des sensiblen Umgangs mit Natur und Landschaft von der BIS ein Gewerbegebiet entwickelt werden, das wegweisend ressourcensparend, nachhaltig und klimawandeltauglich (unbeeinträchtigt durch zukünftige Klimabedingungen) sein soll. Unternehmen, die an einer Ansiedelung in dem neu zu gestaltenden Gewerbegebiet interessiert sind, sollen durch geeignete Rahmenbedingungen die Möglichkeit erhalten, hier besonders nachhaltig zu wirtschaften. Hierzu ist vorgesehen, dass bereits im Bebauungsplan „grüne“ Komponenten festgeschrieben werden, wie beispielweise eine Energieversorgung aus Erneuerbaren Energien, eine extensive Begrünung der Gebäudedächer, Regenwasserrückhaltung, Brauchwassernutzung, Abfallvermeidung, Erschließung durch öffentlichen Personennahverkehr oder die Anbindung an überörtliche Radwege.

Das Untersuchungsgebiet befindet sich auf der Luneplate (Abb. 1), einer ehemaligen Weserinsel im unbewohnten Ortsteil des Bremerhavener Stadtteils Fischereihafen. Ein großer Teil der Luneplate bildet das gleichnamige EU-Vogelschutzgebiet (EU-Melde-Nr. DE2417-401).

Neben den Aspekten des Klimaschutzes sollen für das nachhaltige Gewerbegebiet auch Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels Akzente setzen. Dazu greift das Vorhaben unmittelbar die vom Land und den Stadtgemeinden Bremen und Bremerhaven entwickelte Klimaanpassungsstrategie (SUBV 2018) auf.

Diese Anpassungsstrategie wird um die neuesten Ergebnisse regionaler Klimaprojektionen erweitert und die sich daraus ergebenden Konsequenzen aufgezeigt. Hierzu kommt der modulare, sektorübergreifende „GERICS-Stadtbaukasten“ mit seiner Modulgruppe „Spezifische Klimainformation“ zum Einsatz (Bender et al. 2017b).

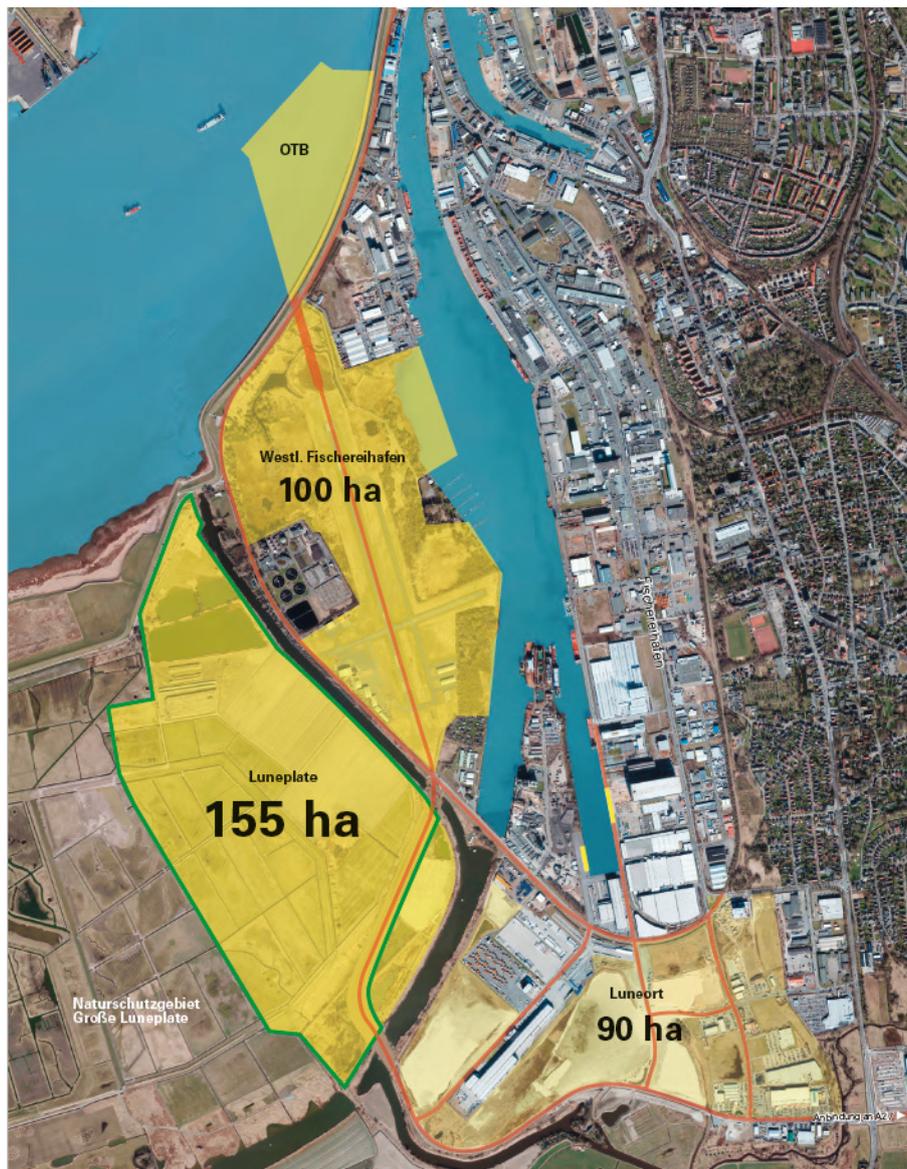


Abb.1 Lage des geplanten Gewerbegebietes auf einer Teilfläche der Luneplate in Bremerhaven (Quelle: BIS).

Der vorliegende Bericht dokumentiert die berechneten Klimaänderungen basierend auf einem Ensemble regionaler Klimaprojektionen der EURO-CORDEX-Initiative und vergleicht diese Ergebnisse mit den klimatologischen Grundlagen der „Klimaanpassungsstrategie für Bremen und Bremerhaven“ (SUBV 2018) für Bremerhaven.

2. Regionale Klimaprojektionen

2.1. Bewertung der Klimaveränderungen (Klimaänderungsszenarien)

Zur Abschätzung der Folgen des Klimawandels sowie zur nachfolgenden Bewertung der Klimawandeltauglichkeit von Maßnahmen werden folgende Klimaparameter betrachtet (Tab. 1).

Tab.1 Übersicht der verwendeten Klimaindizes und –variablen und deren Erläuterung

Klimaparameter	Erläuterung
Variablen aus regionalen Klimamodellen	
Langjähriges Mittel der Temperatur sowie langjähriger saisonaler Mittelwert für Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON)	In 2 m Höhe (Meteorologisches Jahr)
Taupunkttemperatur	In 2 m Höhe
Langjähriges Mittel der Niederschlagssumme sowie langjähriger saisonaler Mittelwert (DJF, MAM, JJA, SON)	Gesamtniederschlag (Summe aus konvektivem und stratiformem Niederschlag)
Langjähriges Mittel der Windstärke	In 10 m Höhe
Abgeleitete Indizes auf Basis von Variablen der regionalen Klimamodelle	
Anzahl der Sommertage bzw. sommerlichen Tage	Gesamtzahl der Tage mit einem Tagesmaximum von $\geq 25^{\circ}\text{C}$ (in 2 m Höhe)
Anzahl der Hitzetage	Gesamtzahl der Tage mit einem Tagesmaximum von $\geq 30^{\circ}\text{C}$ (in 2 m Höhe)
Anzahl der Starkregenereignisse	Gesamtzahl der Tage mit einer Niederschlagssumme von ≥ 25 mm
Anzahl der Trockenperioden	Periode mit mehr als 5 aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Niederschlagssumme von < 1 mm
Länge der Trockenperiode	Maximale Länge der Periode mit mehr als 5 aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Niederschlagssumme von < 1 mm
Mittlere Länge der Vegetationsperiode	Länge in Tagen zwischen dem ersten Auftreten von 6 oder mehr aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur von $> 5^{\circ}\text{C}$ und dem ersten Auftreten von 6 oder mehr aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur von $< 5^{\circ}\text{C}$ innerhalb eines Kalenderjahres
Mittlerer Beginn der Vegetationsperiode	Erstes Auftreten von mindestens 6 aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur $> 5^{\circ}\text{C}$ (d.h. Beginn der Vegetationsperiode)

2.1.1. Methodischer Ansatz

Die verwendeten Simulationen für das historische Klima (1971 – 2000) und Projektionen für das zukünftige Klima (2021 – 2050) basieren auf einem Ensemble regionaler Klimaprojektionen der EURO-CORDEX-Initiative (<http://www.euro-cordex.net>), die durch das sogenannte „Dynamische Downscaling“ erzeugt wurden (Jacob et al. 2014). (Anhang 1). Die Liste der dazu verwendeten Modelle findet sich in Anhang 2. Im nachfolgenden Text wird für dieses Ensemble die Bezeichnung „EC-Ensemble-Set“ gewählt.

Für den Blick in die Zukunft wurden 34 Klimaprojektionen analysiert, von denen vier Projektionen auf dem Szenario RCP2.6, sowie jeweils 15 Projektionen auf dem Szenario RCP4.5 beziehungsweise dem Szenario RCP8.5 basieren (siehe Box 1). Das EC-Ensemble-Set beinhaltet Simulationen sechs unterschiedlicher regionaler Klimamodelle (RCM), die von acht verschiedenen globalen Klimamodellen (GCM) beziehungsweise GCM-Realisierungen angetrieben werden.

Box 1 Die „Repräsentativen Konzentrationspfade“ (RCP)

Die globalen sozio-ökonomischen Szenarien RCP (sogenannte "Repräsentative Konzentrationspfade") wurden für den 5. Sachstandsbericht des IPCC entwickelt. Das Szenario RCP2.6 schließt sehr ambitionierte Maßnahmen zur Verringerung von Treibhausgasemissionen ein, führt zum Strahlungsantrieb von ca. 3 W pro m² um 2040, der dann zum Ende des 21. Jahrhunderts auf einen Wert von 2.6 W pro m² zurückgeht. Dieses Szenario kann auch als „Klimaschutz-Szenario“ bezeichnet werden. Mit dem Szenario RCP8.5 wird ein kontinuierlicher Anstieg der Treibhausgasemissionen beschrieben, der zum Ende des 21. Jahrhunderts einen Strahlungsantrieb von 8.5 W pro m² erreicht. Dieses Szenario stellt ein „Business-as-usual“-Szenario dar. Das Szenario RCP4.5 bewegt sich im mittleren Bereich der beiden anderen Szenarien.

(siehe z.B. <http://www.klimanavigator.de/dossier/artikel/012038/index.php> und <http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/RCP-Szenarien>, Stand: 04/2017).

Die Modelle berechnen die Klimaindizes und -variablen auf einem regelmäßigen Gitter (Box 2). Für den lokalen Fokus auf die Region werden die Klimaänderungsinformationen aus allen Simulationen für die Gitterboxen im Bereich Bremerhaven ausgewählt (Abb.2). Basierend auf dem jeweiligen Flächenanteil der Geländeoberfläche pro Gitterbox wird ein gewichtetes Mittel der Klimaänderungen berechnet (GERICS 2017). Die dadurch erhaltenen Informationen sind demnach nicht punktspezifisch, sondern beschreiben einen Mittelwert.

Box 2 Simulationsgitterbox

Klimamodelle beruhen auf mathematischen Gleichungen, die die grundlegenden physikalischen Gesetze ausdrücken, wie die Gesetze der Massen-, Impuls- und Energieerhaltung. Die Änderungen der verschiedenen Größen (z.B. Temperatur, Druck, Niederschlag usw.) mit der Zeit werden auf einem drei-dimensionalen Gitter, das den Globus umspannt, von Zeitschritt zu Zeitschritt numerisch berechnet.

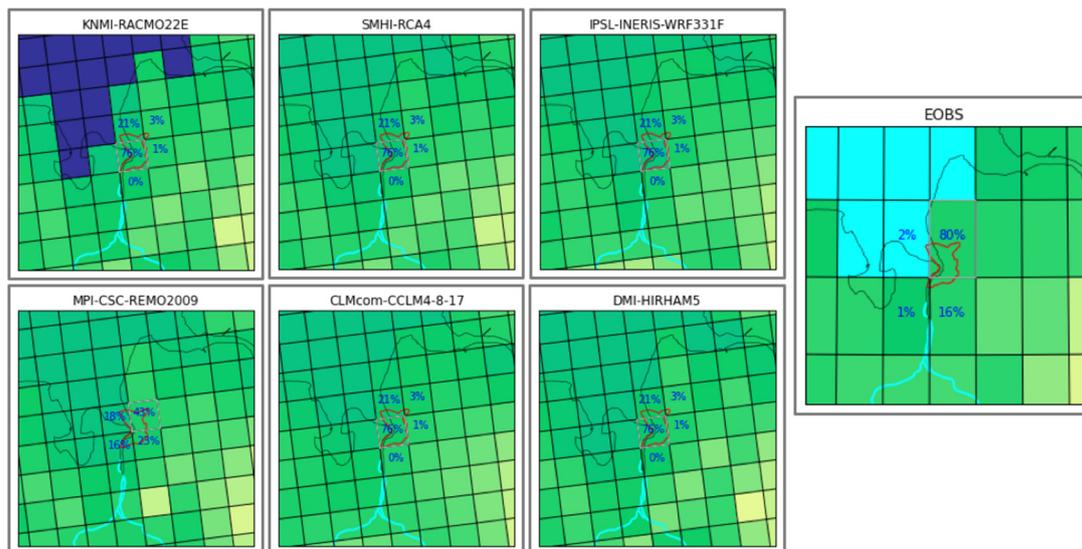


Abb.2 Beispiel für die ausgewählten Gitterboxen aus sechs Klimasimulationen für den Bereich Bremerhaven (Flächenanteil der Gitterbox mit Prozentangabe) sowie der verwendeten Boxen aus dem E-OBS-Datensatz.

Für jeden simulierten Klimaparameter werden nachfolgende Tests durchgeführt:

- Validierung gegen Beobachtungsdaten: Simulationen des EC-Ensemble-Sets für den historischen Zeitraum (hier: 1971 – 2000) werden mit dem gegittert vorliegenden E-OBS-Datensatz (Version 16.0) verglichen. Kriterien der Validierung sind: a) die mittlere Abweichung der Datensätze, b) die Abweichung der interannuellen Variabilität – berechnet anhand der Standardabweichung der Jahreswerte über die 30-jährige Evaluierungsperiode und c) die Abweichung der Jahresgänge für Temperatur und Niederschlag.
- Prüfung der räumlichen Homogenität projizierter Klimaänderungen in einer größeren Region um das Untersuchungsgebiet (7 x 7 Gitterboxen): Vergleich des „Signal-to-Noise“-Verhältnisses (GERICS 2017).
- Prüfung der Trendrichtung projizierter Klimaänderungen: Um die Robustheit des Ensemble-Klimaänderungssignals zu bestimmen, werden sowohl die Übereinstimmung der projizierten Trends als auch die Bandbreite aller projizierten Änderungen in die Bewertung mit einbezogen.

Box 3 E-OBS-Datensatz

Der E-OBS Datensatz (ENSEMBLES Observation Data – Beobachtungsdatensatz des ENSEMBLES-Projektes) enthält Niederschlag- und Temperaturmessungen mit täglicher Auflösung. Er wurde im Rahmen des EU-Projektes ENSEMBLES entwickelt (Haylock et al. 2008).

(siehe <http://www.ecad.eu/e-obs>).

2.1.2. Modellierte historische Klimabedingungen

Der Vergleich der modellierten historischen Werte (EC-Ensemble-Set) mit dem E-OBS-Beobachtungsdatensatz für den Zeitraum 1971 – 2000 zeigt, dass die Temperaturmittelwerte des E-OBS-Datensatzes, mit Ausnahme des Jahresmittels, innerhalb des 17. beziehungsweise 83. Perzentils der modellierten Werte des Modell-Ensembles liegen (Tab 2). Dies zeigt, dass die Modellierung befriedigende Ergebnisse liefert.

Tab.2 Beobachtungsdaten „E-OBS-Datensatz“ und modellierte historischen Daten des EC-Ensemble-Sets („wahrscheinliche Bandbreite – likely range“; 17. bis 83. Perzentil (P17, P83) und Median (P50)).

Klimaparameter	E-OBS- Beobachtungs- datensatz (1971 – 2000)	Modellierte historische Daten (EC-Ensemble-Set) (1971 – 2000)		
		P17	P50	P83
Mittlere Jahrestemperatur [°C]	9,3	7,9	8,1	9,2
Mittl. Temp./Winter (DJF) [°C]	2,3	0,7	1,4	2,7
Mittl. Temp./Frühling (MAM) [°C]	8,3	6,1	7,1	8,5
Mittl. Temp./Sommer (JJA) [°C]	16,5	14,8	15,7	16,9
Mittl. Temp./Herbst (SON) [°C]	9,9	8,3	9,0	9,9
Mittlere Windstärke [m/s]	k. A.	4,7	5,0	5,5
Anzahl Sommertage [#a]	16,0	5,1	9,4	15,9
Anzahl Hitzetage [#a]	1,9	0,07	1,1	2,3
Mittlerer jährli. Niederschlag [mm/d]	2,0	1,9	2,8	3,3
Mittl. Nds./Winter (DJF) [mm/d]	1,8	2,2	2,7	3,2
Mittl. Nds./Frühling (MAM) [mm/d]	1,6	1,7	2,1	2,6
Mittl. Nds./Sommer (JJA) [mm/d]	2,3	2,2	3,0	3,8
Mittl. Nds./Herbst (SON) [mm/d]	2,3	2,0	3,0	3,6
Anzahl Starkregenereignisse [#a]	0,9	0,6	1,9	3,0
Dauer längste Trockenperiode [d]	35	25	30	39
Anzahl Trockenperioden [#a]	13,0	8,0	8,9	11,3
Mittl. Start der Vegetationsperiode [d]	62,3	60,0	84,9	92,7
Mittlere Länge Vegetationsperiode [d]	263,2	221,3	235,6	250,7

Bezüglich der mittleren Niederschlagsmengen liegen die modellierten Werte lediglich für den Winter und Frühling über den Beobachtungswerten. Die beobachtete Anzahl der Starkregenereignisse, Dauer der längsten Trockenperiode und der Hitzetage wird von den Modellwerten gut wiedergegeben. Die

Modellergebnisse für die Anzahl der Sommertage, die Anzahl der Trockenperioden und die mittlere Länge der Vegetationsperiode liegen oberhalb des 83. Perzentils der Beobachtungsdaten. Alle Abweichungen befinden sich aber innerhalb tolerierbarer Größenordnungen. Für die mittlere Windstärke konnte kein Vergleich durchgeführt werden, da dieser Parameter nicht im E-OBS-Datensatz enthalten ist.

2.1.3. „Klimaschutz-Szenario“ (RCP2.6)

Für den Vergleich der modellierten historischen Werte mit den Ergebnissen des RCP2.6-Ensembles (2021 – 2050) standen nur vier Klimaprojektionen zur Verfügung. Deshalb werden zur Beschreibung der Ergebnisse folgende Größen gewählt: minimaler Wert (MIN), maximaler Wert (MAX) und der Median (P50) (Tab 3).

Tab.3 Berechnete Variablen und Indizes des EC-Ensemble-Sets: historischer Zeitraum (1971 – 2000) und Zukunftsszenario RCP2.6 (2021 – 2050).

Klimaparameter	Modellierte historische Daten (EC-Ensemble-Set) (1971 – 2000)			RCP2.6 (EC-Ensemble-Set) (2021 – 2050)		
	P17	P50	P83	MIN	P50	MAX
Mittlere Jahrestemperatur [°C]	7,9	8,1	9,2	9,1	9,7	10,4
Mittl. Temp./Winter (DJF) [°C]	0,7	1,4	2,7	2,3	2,8	3,7
Mittl. Temp./Frühling (MAM) [°C]	6,1	7,1	8,5	7,8	8,8	9,3
Mittl. Temp./Sommer (JJA) [°C]	14,8	15,7	16,9	15,7	16,9	17,3
Mittl. Temp./Herbst (SON) [°C]	8,3	9,0	9,9	10,0	10,4	11,2
Mittlere Windstärke [m/s]	4,7	5,0	5,5	4,5	4,5	5,4
Anzahl Sommertage [#a]	5,1	9,4	15,9	9,0	14,2	18,4
Anzahl Hitzetage [#a]	0,07	1,1	2,3	1,0	1,5	2,8
Mittlerer jährli. Niederschlag [mm/d]	1,9	2,8	3,3	2,5	2,9	3,7
Mittl. Nds./Winter (DJF) [mm/d]	2,2	2,7	3,2	2,5	2,9	3,8
Mittl. Nds./Frühling (MAM) [mm/d]	1,7	2,1	2,6	2,2	2,4	2,6
Mittl. Nds./Sommer (JJA) [mm/d]	2,2	3,0	3,8	2,8	3,2	3,6
Mittl. Nds./Herbst (SON) [mm/d]	2,0	3,0	3,6	2,5	3,1	5,1
Anzahl Starkregenereignisse [#a]	0,6	1,9	3,0	1,2	2,4	5,4
Dauer längste Trockenperiode [d]	25	30	39	22	31	35
Anzahl Trockenperioden [#a]	8,0	8,9	11,3	8,3	8,5	9,5
Mittl. Start der Vegetationsperiode [d]	60,0	84,9	92,7	40,8	45,9	61,6
Mittlere Länge Vegetationsperiode [d]	221,3	235,6	250,7	238,8	249,1	279,2

Bei der Bewertung der Veränderungen zwischen den modellierten historischen Werten und den Ergebnissen des **RCP2.6-Ensembles** muss bedacht werden, dass zwei verschiedene Bandbreiten miteinander verglichen werden: für die modellierten historischen Daten der Bereich innerhalb des 17. und 83. Perzentils, für das Zukunftsszenario RCP2.6 der Bereich zwischen dem niedrigsten und höchsten Wert. Im RCP2.6 Szenario sind die zukünftigen Ergebnisbandbreiten (2021 – 2050) für die mittlere Jahrestemperatur und die saisonalen Mitteltemperaturen in einen höheren Temperaturbereich verschoben. Die Unterschiede zwischen den beiden Datensätzen sind bei der mittleren Jahrestemperatur und der mittleren Temperatur im Herbst signifikant, da sich die Bandbreiten nicht beziehungsweise nur minimal überlappen. Entsprechend dazu ist ein tendenzieller Anstieg für die zukünftige Anzahl der Sommertage erkennbar. Bei der Anzahl der Hitzetage zeigt sich lediglich eine geringfügig steigende Entwicklung.

Änderungen bei den Niederschlagsmengen sind nur geringfügig ausgeprägt. Die größte Veränderung tritt beim Median der mittleren Niederschlagsmengen im Frühjahr auf. Die Anzahl der Starkregenereignisse zeigt eine leichte Verschiebung hin zu häufigeren Ereignissen. Während die Dauer der längsten Trockenperiode sowie deren Anzahl keinen Trend zur Veränderung aufweisen, verschiebt sich der Start der Vegetationsperiode tendenziell auf einen früheren Zeitpunkt. In Folge dessen erhöht sich auch deren mittlere Länge geringfügig. Die mittlere Windstärke weist keine Veränderungen auf.

2.1.4. Moderates Emissionsszenario (RCP4.5)

Beim Vergleich der modellierten historischen Werte mit den Ergebnissen des **RCP4.5-Ensembles** (2021 – 2050) zeigt sich eine signifikante Erhöhung der mittleren Jahrestemperatur. Die saisonale Betrachtung ergibt insbesondere für Herbst und Winter eine steigende Tendenz. Im Frühling und Sommer ist dieser Trend nicht so stark ausgeprägt (Tab. 4). Während die Anzahl der Sommertage tendenziell einen Anstieg aufweist, ist bei den Hitzetagen keine eindeutige Entwicklung erkennbar. Im ungünstigsten Fall könnten sich die Tage über 30°C aber deutlich erhöhen.

Bei den mittleren Niederschlagsmengen sind sowohl bei der Jahresmenge wie auch bei den saisonalen Beträgen nur geringfügige Veränderungen erkennbar. Dagegen zeigt die Anzahl der Starkregenereignisse eine ansteigende Tendenz. Im Hinblick auf Trockenperioden bleiben die Anzahl und Dauer der längsten Trockenperiode nahezu unverändert. Dies gilt auch für die mittlere Windstärke.

Der Start der Vegetationsperiode verschiebt sich, wie auch beim niedrigen Emissionsszenario, tendenziell auf einen früheren Zeitpunkt, wodurch sich auch hier die mittlere Länge der Vegetationsperiode geringfügig verlängert.

Tab.4 Berechnete Variablen und Indizes des EC-Ensemble-Sets: historischer Zeitraum (1971 – 2000) und Zukunftsszenario RCP4.5 (2021 – 2050).

Klimaparameter	Modellierte historische Daten (EC-Ensemble-Set) (1971 – 2000)			RCP4.5 (EC-Ensemble-Set) (2021 – 2050)		
	P17	P50	P83	P17	P50	P83
Mittlere Jahrestemperatur [°C]	7,9	8,1	9,2	9,1	9,3	10,4
Mittl. Temp./Winter (DJF) [°C]	0,7	1,4	2,7	2,1	2,8	3,5
Mittl. Temp./Frühling (MAM) [°C]	6,1	7,1	8,5	7,2	8,2	9,2
Mittl. Temp./Sommer (JJA) [°C]	14,8	15,7	16,9	16,0	16,8	17,6
Mittl. Temp./Herbst (SON) [°C]	8,3	9,0	9,9	9,5	10,4	11,3
Mittlere Windstärke [m/s]	4,7	5,0	5,5	4,6	5,0	5,4
Anzahl Sommertage [#a]	5,1	9,4	15,9	9,0	14,1	19,9
Anzahl Hitzetage [#a]	0,07	1,1	2,3	0,7	2,1	3,8
Mittlerer jährli. Niederschlag [mm/d]	1,9	2,8	3,3	2,1	3,0	3,4
Mittl. Nds./Winter (DJF) [mm/d]	2,2	2,7	3,2	2,3	2,9	3,4
Mittl. Nds./Frühling (MAM) [mm/d]	1,7	2,1	2,6	1,7	2,2	3,0
Mittl. Nds./Sommer (JJA) [mm/d]	2,2	3,0	3,8	2,3	3,2	3,8
Mittl. Nds./Herbst (SON) [mm/d]	2,0	3,0	3,6	2,1	3,0	3,7
Anzahl Starkregenereignisse [#a]	0,6	1,9	3,0	1,1	2,3	4,1
Dauer längste Trockenperiode [d]	25	30	39	27	29	38
Anzahl Trockenperioden [#a]	8,0	8,9	11,3	7,5	8,7	11,1
Mittl. Start der Vegetationsperiode [d]	60,0	84,9	92,7	49,1	64,7	74,7
Mittlere Länge Vegetationsperiode [d]	221,3	235,6	250,7	234,5	268,2	281,9

2.1.5. „Business-as-usual“-Szenario (RCP8.5)

Die Ergebnisse der **RCP8.5-Ensembles** unterscheiden sich nur geringfügig von denen des moderaten Emissionsszenarios. Die mittlere Jahrestemperatur ist signifikant erhöht. Für alle Jahreszeiten ist eine steigende Tendenz der mittleren Temperatur erkennbar, wobei sich diese im Herbst und Winter am deutlichsten zeigt (Tab. 5). Die Anzahl der Sommertage und der Hitzetage weist tendenziell einen Anstieg auf.

Demgegenüber zeigen die mittleren Niederschlagsmengen sowohl jährlich als auch saisonal nur geringfügige Veränderungen. Für die Anzahl der Starkregenereignisse ist eine tendenzielle Zunahme projiziert. Die Anzahl der Trockenperioden bleibt ebenso wie die Dauer der längsten Trockenperiode nahezu unverändert. Dies gilt auch für die mittlere Windstärke.

Der Start der Vegetationsperiode verschiebt sich, wie auch beim niedrigen Emissionsszenario, tendenziell auf einen früheren Zeitpunkt, wodurch sich auch hier die mittlere Länge der Vegetationsperiode geringfügig verlängert.

Tab.5 Berechnete Variablen und Indizes des EC-Ensemble-Sets: historischer Zeitraum (1971 – 2000) und Zukunftsszenario RCP8.5 (2021 – 2050).

Klimaparameter	Modellierte historische Daten (EC-Ensemble-Set) (1971 – 2000)			RCP8.5 (EC-Ensemble-Set) (2021 – 2050)		
	P17	P50	P83	P17	P50	P83
Mittlere Jahrestemperatur [°C]	7,9	8,1	9,2	9,1	9,6	10,4
Mittl. Temp./Winter (DJF) [°C]	0,7	1,4	2,7	2,2	2,8	3,4
Mittl. Temp./Frühling (MAM) [°C]	6,1	7,1	8,5	7,1	8,5	9,4
Mittl. Temp./Sommer (JJA) [°C]	14,8	15,7	16,9	15,9	17,0	18,0
Mittl. Temp./Herbst (SON) [°C]	8,3	9,0	9,9	9,8	10,5	11,4
Mittlere Windstärke [m/s]	4,7	5,0	5,5	4,7	5,0	5,4
Anzahl Sommertage [#a]	5,1	9,4	15,9	8,4	14,1	22,6
Anzahl Hitzetage [#a]	0,07	1,1	2,3	0,5	2,0	4,0
Mittlerer jährli. Niederschlag [mm/d]	1,9	2,8	3,3	2,1	3,0	3,5
Mittl. Nds./Winter (DJF) [mm/d]	2,2	2,7	3,2	2,2	2,8	3,3
Mittl. Nds./Frühling (MAM) [mm/d]	1,7	2,1	2,6	1,8	2,4	3,0
Mittl. Nds./Sommer (JJA) [mm/d]	2,2	3,0	3,8	2,3	3,0	3,7
Mittl. Nds./Herbst (SON) [mm/d]	2,0	3,0	3,6	2,1	3,1	3,8
Anzahl Starkregenereignisse [#a]	0,6	1,9	3,0	1,1	2,2	5,3
Dauer längste Trockenperiode [d]	25	30	39	27	34	40
Anzahl Trockenperioden [#a]	8,0	8,9	11,3	7,2	9,3	11,2
Mittl. Start der Vegetationsperiode [d]	60,0	84,9	92,7	42,5	56,6	73,5
Mittlere Länge Vegetationsperiode [d]	221,3	235,6	250,7	239,3	266,8	292,1

2.2. Bewertung der Klimaprojektionen in der Anpassungsstrategie

Die klimawissenschaftliche Grundlage für die neue Anpassungsstrategie für Bremen und Bremerhaven (SUBV 2018) wird aus den Klimainformationen des Nationalen Klimareports des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2016) gebildet. Darin wird Deutschland in zwölf Modellregionen unterteilt, wobei die Ergebnisse für das „Nordwestdeutsche Tiefland“ für Bremen und Bremerhaven als hinreichend repräsentativ angesehen werden. Für zukünftig zu erwartende Klimaänderungen greift die Anpassungsstrategie auf regionalspezifische Analysen des Niedersächsischen Landesbetriebs für

Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) zurück. Zur Ermittlung möglicher Klimawandelfolgen werden acht Projektionen, durchgeführt mit vier regionalen Klimamodellen, die mit fünf verschiedenen globalen Klimamodellen angetrieben wurden, herangezogen (Tab 6). Es wird jeweils das „Business-as-usual“-Szenario (RCP8.5) verwendet. Die Ergebnisse werden in der Anpassungsstrategie in der Form von Zeitreihen unter Angabe von Bandbreiten dargestellt.

Tab.6 Verwendete Klimamodelle im Nationalen Klimareport des Deutschen Wetterdienstes. (RCM steht für regionale Klimamodell, GCM für globales Klimamodell)

Hohes Emissionsszenario (RCP8.5)	
Bezeichnung des RCM	Bezeichnung des antreibenden GCM
RCA4	CNRM-CM5
HIRHAM5	EC-EARTH
RACMO22E	EC-EARTH
RCA4	EC-EARTH
RCA4	HadGEM2-ES
RCA4	IPSL
CCLM	MPI-ESM
RCA4	MPI-ESM

Andererseits sind Ergebnisse von 34 Klimaprojektionen der EURO-CORDEX-Initiative (<http://www.euro-cordex.net>) (Anhang 1) für die Region Bremerhaven verfügbar, die zur Berechnung der Klimaparameter in diesem Report herangezogen werden (EC-Ensemble-Set). Um die Ergebnisse der beiden Ansätze einordnen und vergleichen zu können, werden nachfolgend die mit beiden Klimaprojektionen-Ensembles erreichten Aussagen gegenübergestellt.

2.2.1. Methodischer Ansatz des Vergleichs beider Ergebnisdatensätze

Für den Vergleich der beiden Datensätze wird ein 30-jähriger Vergleichszeitraum (hier: 2021 – 2050) ausgewählt. Basierend auf den Angaben der Anpassungsstrategie (SUBV 2018) werden die Bandbreiten für den Mittelwert, das Minimum und das Maximum ermittelt. Die Vorgehensweise ist exemplarisch am Beispiel der prozentualen Änderungen der mittleren Niederschlagssumme im Sommer für Bremen in Abbildung 3 dargestellt. Die Ordinate beschreibt hierbei die prozentuale Veränderung des Klimaparameters gegenüber dem Mittelwert der Periode 1971 – 2000.

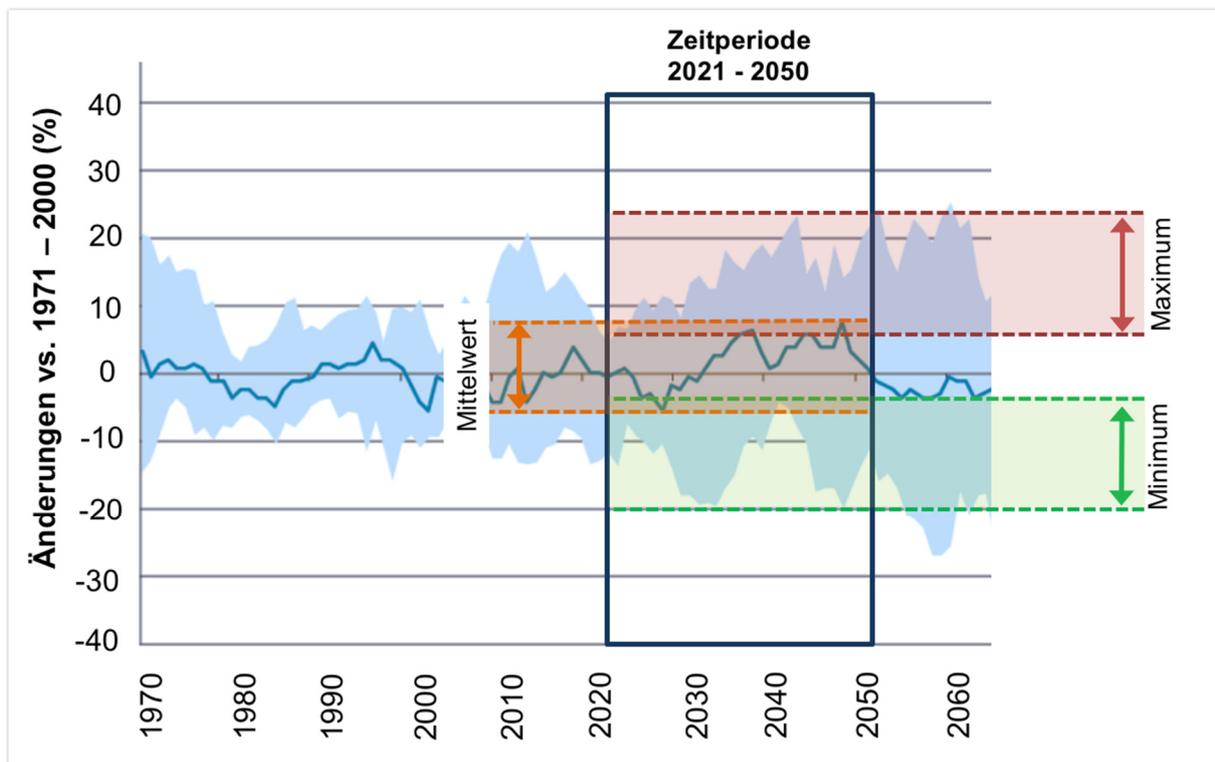


Abb.3 Schematische Darstellung der Bandbreitenermittlung für die Größen Mittelwert, Minimum und Maximum aus den Ergebnissen der Klimaprojektionen der Anpassungsstrategie Bremen und Bremerhaven (SUBV 2018).

Aus der Klimaanpassungsstrategie für Bremen und Bremerhaven SUBV (2018) werden folgende Klimaparameter für die Gegenüberstellung betrachtet: i) mittlere Temperatur, ii) Anzahl der Hitzetage, iii) Dauer der längsten Trockenperiode, iv) Anzahl der Starkregenereignisse und v) mittlere Niederschlagsmengen (jährlich, Sommer, Winter). Die jeweiligen Änderungsintervalle werden mit dem zugehörigen Beobachtungswert des E-OBS-Datensatzes addiert und bilden den Prüfdatensatz #1 (KASB-Ensemble). Die Ergebnisse der Klimaprojektionen des EC-Ensemble-Sets für das „Business-as-usual“-Szenarios (RCP8.5) (vgl. 2.1.5) bilden den Prüfdatensatz #2 (Anhang 3).

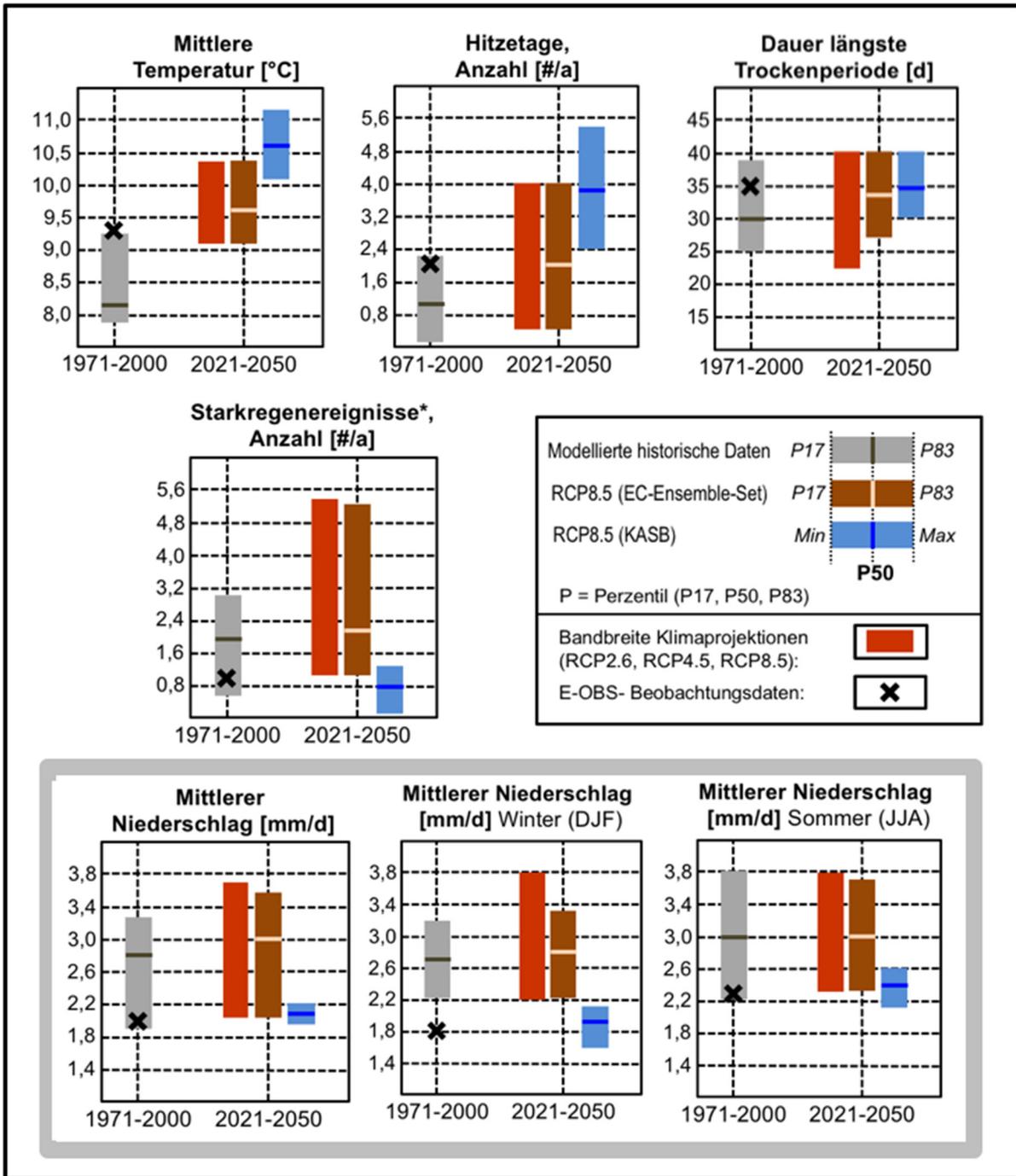


Abb.4 Vergleich der Bandbreiten des EC-Ensemble-Sets mit den Ergebnissen der Klimaanpassungsstrategie Bremen und Bremerhaven (KASB) (RCP8.5, 2021 – 2050).

*) Definition „Starkregen-Tag“: KASB-Ensemble: Niederschlagsmenge ≥ 20 mm pro Tag;
EC-Ensemble-Set: Niederschlagsmenge ≥ 25 mm pro Tag.

Zur Dokumentation der aus beiden Prüfdatensätzen abzuleitenden zukünftigen Entwicklungen werden folgende Bandbreiten angegeben (Abb.4):

- modellierte historische Werte (EC-Ensemble-Set; 1971 – 2000, RCP8.5)
- E-OBS-Beobachtungswert (1971 – 2000)
- Bandbreite über alle Klimaprojektionen (RCP 2.6, RCP4.5, RCP8.5; EC-Ensemble-Set; 2021 – 2050)
- Bandbreite der Klimaprojektionen nur für RCP8.5 (EC-Ensemble-Set; 2021 – 2050)
- Bandbreite der Ergebnisse basierend auf den Klimaprojektionen in der Klimaanpassungsstrategie für Bremen und Bremerhaven; KASB-Ensemble (RCP8.5; 2021 – 2050)

2.2.2. Temperaturzunahme und Hitze

Der Vergleich zwischen den Ergebnissen des EC-Ensemble-Sets und dem KASB-Ensemble zeigt in beiden Fällen einen signifikanten Anstieg der Temperatur. Dabei liegt der Anstieg des KASB-Ensembles deutlich höher und bewegt sich weitestgehend über dem 83. Perzentil des EC-Ensemble-Sets. Im direkten Vergleich weisen die Bandbreiten der projizierten Hitzetage einen größeren Schnittbereich auf, wobei das KASB-Ensemble auch hier extremere Veränderungen anzeigt (Abb.4).

2.2.3. Niederschläge und Starkregen

Im Gegensatz zur Temperatur liefern Klimaprojektionen regionaler Klimamodelle für zukünftige Niederschlagsmengen keine robusten Ergebnisse (Jacob et al. 2014). Dies wird besonders dann deutlich, wenn man die Ergebnisse regionaler Klimamodelle miteinander vergleicht. Für die Niederschlagsänderungen im Sommer (Juni, Juli, August) variieren die Modellergebnisse beispielsweise von extrem trockener bis zu leicht nasser. Generell gilt, dass die Ergebnisse statistischer Regionalmodelle stets trockener ausfallen als die Ergebnisse dynamischer Regionalmodelle (Box 4). Somit kann die gewählte Kombination aus globalen und regionalen Klimamodellen darüber entscheiden, welches Ergebnisintervall angezeigt wird (Abb.5).

Box 4 Dynamische und statistische Regionalisierungsmethoden

Mit der dynamischen Regionalisierungsmethode wird ein dreidimensionaler Ausschnitt des Klimasystems (physikalischen, chemische, und biologische Prozesse in der Atmosphäre und Wechselwirkungen mit der Erdoberfläche) mit einem regionalen Klimamodell simuliert.

Statistische Verfahren beruhen auf empirischen Zusammenhängen zwischen der beobachteten großräumigen Zirkulation in der Atmosphäre und dem lokalen Wettergeschehen an Messstationen.

(Meinke et al. 2017).

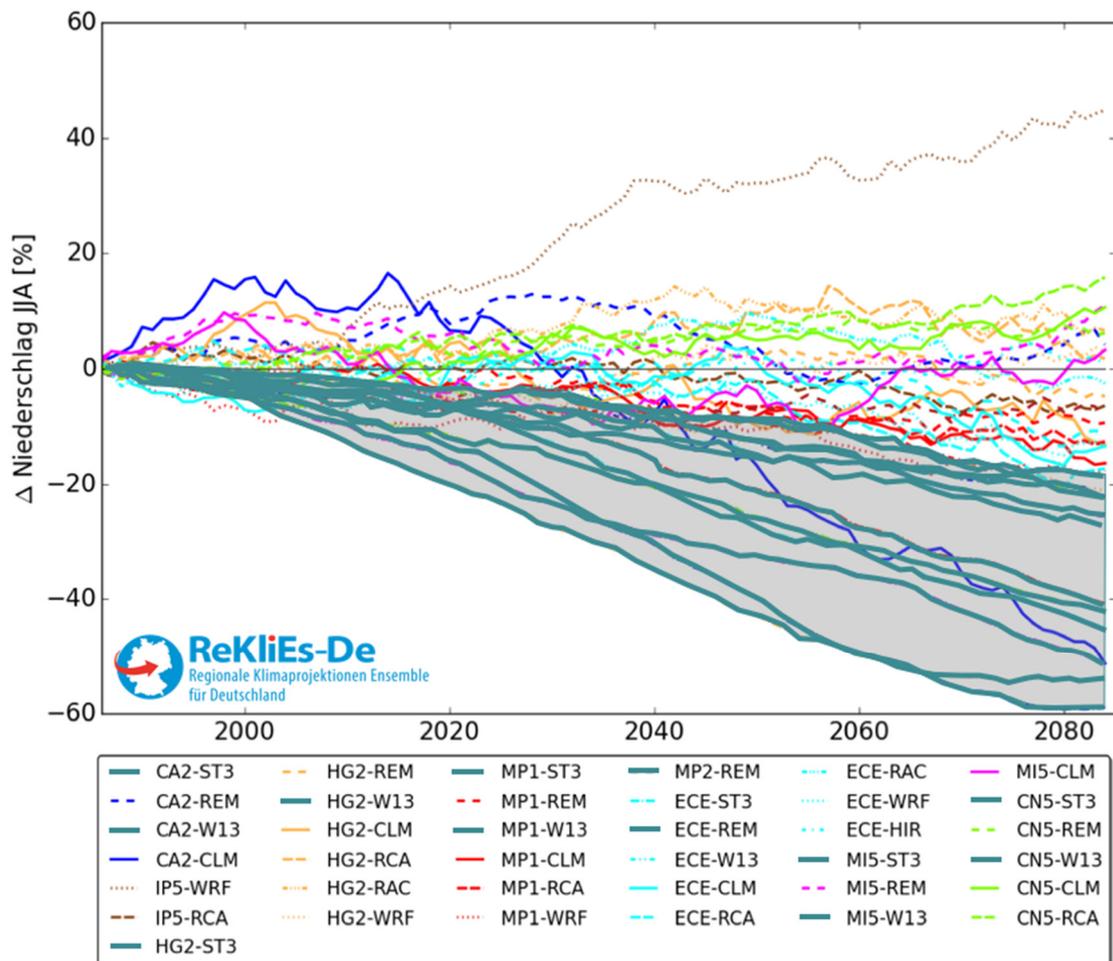


Abb.5 Vergleich der Klimaprojektionen aus dem ReKlies-De-Projekt (für Deutschland, Änderungen der Niederschlagsmengen im Sommer (1986 – 2085) für RCP8.5, 30-jähriges gleitendes Mittel (Quelle: ReKlies-De 2017). Die Bandbreite der Klimaprojektionen statistischer Regionalmodelle ist grau hinterlegt.

Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes zeigen für das Land Bremen im Zeitraum 1882 bis 2015 einen jährlichen Niederschlagszuwachs von im Mittel rund 100 mm, wobei der größte Zuwachs im Winter (+55 mm) und Herbst (+30 mm) auftraten. Aber auch im Sommer (+10 mm) und Frühling (+5 mm) war dieser Trend bisher positiv (SUBV 2018).

Betrachtet man die zukünftigen Entwicklungen so weisen die Ergebnisse des EC-Ensemble-Sets im Vergleich zum KASB-Ensemble eine deutliche Tendenz zu höheren Niederschlagsmengen, sowohl im jährlichen Mittel, als auch im Sommer und Winter auf. Zudem ist die Bandbreite größer. Die Ergebnisse des KASB-Ensembles bewegen sich im Bereich des am Standort Bremerhaven beobachteten Durchschnittswertes (1971 – 2000) (E-OBS-Datensatz). Im Vergleich zu den modellierten historischen Werten zeigen die Klimaprojektionen für die Periode 2021 – 2050 beim EC-Ensemble-Set nur geringe Veränderungen (Abb.4).

Beim Vergleich der projizierten Veränderungen hinsichtlich der Anzahl der Starkregenereignisse muss beachtet werden, dass unterschiedliche Definitionen für einen „Starkregentag“ verwendet werden. Ein Starkregentag ist beim EC-Ensemble-Set als Tag mit einer Niederschlagsmenge ≥ 25 mm/d definiert. Beim KASB-Ensemble liegt der Schwellenwert dagegen bei ≥ 20 mm/d. Folglich sollten im letztgenannten Ansatz eine größere Anzahl an Tagen erfasst werden. Es zeigt sich jedoch, dass bei dem EC-Ensemble-Set eine deutlich höhere Anzahl projiziert wurde. Allerdings ist die Bandbreite der Ergebnisse sehr groß, so dass kein eindeutiger Trend zu erkennen ist.

2.2.4. Fazit des Vergleichs

Generell weisen die Ergebnisse des EC-Ensemble-Set, eine größere Bandbreite auf. Das ist unter anderem damit begründet, dass neben dem „Business-as-usual“-Szenario (RCP8.5), auch ein moderates Szenario (RCP4.5) und das „Klimaschutz-Szenario“ (RCP2.6) verwendet werden. Das KASB-Ensemble geht dagegen von einer „Worst-Case-Betrachtung“ aus, wodurch nur den möglichen extremen Klimaveränderungen Rechnung getragen wird. Somit können unter Umständen die Folgen des Klimawandels überschätzt werden.

Die Ergebnisse des KASB-Ensembles liefern vor allem bei den Niederschlägen sehr „trockene“ Ergebnisse, was sich auch bei der Anzahl der Starkregenereignisse widerspiegelt.

Wie aus den Ergebnissen des ReKlies-De-Projektes (Abb.5) ersichtlich wird, weisen insbesondere die Ergebnisse regionaler Klimaprojektionen für Niederschlagsmengen große Schwankungsbreiten auf. Somit sollte für die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen immer eine möglichst große Anzahl von Klimasimulationen verwendet werden, um alle potentiellen Klimaveränderungen bei der Planung berücksichtigen zu können.

3. Zusammenfassende Bewertung für Bremerhaven

3.1. Klimaparameter – zukünftige Trends

Vergleicht man die bisher für Anpassungsmaßnahmen verwendeten regionalen Klimainformationen (SUBV 2018) mit den Ergebnissen des EC-Ensemble-Sets, so zeigt sich, eine größere Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen. Dies ist für alle weiteren Planungsprozesse von hoher Relevanz, um nicht nur die extremsten Veränderungen, zu berücksichtigen.

Tab.7 Zusammenfassung der Veränderungen ausgesuchter Klimaparameter für Bremerhaven (Trend bis 2050)
Kategorien: abnehmender, unveränderter und zunehmender Trend.

Klimaparameter [Temperatur]	Zukünftiger Trend bis 2050 (Abnahme – unverändert – Zunahme)
Mittlere Jahrestemperatur [°C]	ZUNAHME
Mittlere Temperatur, Winter [°C]	UNVERÄNDERT bis ZUNAHME
Mittlere Temperatur, Frühling [°C]	UNVERÄNDERT bis ZUNAHME
Mittlere Temperatur, Sommer [°C]	UNVERÄNDERT bis ZUNAHME
Mittlere Temperatur, Herbst [°C]	UNVERÄNDERT bis ZUNAHME
Anzahl der Sommertage [#a]	UNVERÄNDERT bis ZUNAHME
Anzahl der Hitzetage [#a]	UNVERÄNDERT bis ZUNAHME

Klimaparameter [Niederschlag]	Zukünftiger Trend bis 2050 (Abnahme – unverändert – Zunahme)
Mittlerer jährlicher Niederschlag [°C]	UNVERÄNDERT bis ZUNAHME
Mittlerer Niederschlag, Winter [°C]	UNVERÄNDERT bis ZUNAHME
Mittlerer Niederschlag, Frühling [°C]	UNVERÄNDERT bis ZUNAHME
Mittlerer Niederschlag, Sommer [°C]	UNVERÄNDERT
Mittlerer Niederschlag, Herbst [°C]	UNVERÄNDERT bis ZUNAHME
Anzahl Starkregenereignisse [#a]	UNVERÄNDERT bis ZUNAHME
Anzahl Trockenperioden [#a]	UNVERÄNDERT
Dauer längste Trockenperiode [d]	UNVERÄNDERT

Vegetationsperiode, Start [d]	UNVERÄNDERT bis FRÜHER
Vegetationsperiode, mittlere Länge [m/s]	UNVERÄNDERT bis ZUNAHME
Mittlere Windstärke [d]	ABNAHME bis UNVERÄNDERT

Die Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen (EC-Ensemble-Set) für alle Emissionsszenarien zeigen für die Stadt Bremerhaven für die Zeitperiode 2021 – 2050, im Vergleich zu dem Zeitraum 1971 – 2000, folgende Veränderungen (Tab.7, Abb.5, Abb.6).

Generell ist davon auszugehen, dass sich Klimaparameter moderat verändern werden. Es zeigt sich eine Zunahme der mittleren Jahrestemperatur. Dieser Anstieg ist tendenziell in allen Jahreszeiten möglich. Auch bei der Anzahl der Sommer- und Hitzetage ist eine ansteigende Tendenz möglich. Aus diesem Grund sollte der Themenkomplex „Hitze in der Stadt und mögliche Anpassungsmaßnahmen“ in zukünftigen Projekten stets miteinbezogen werden.

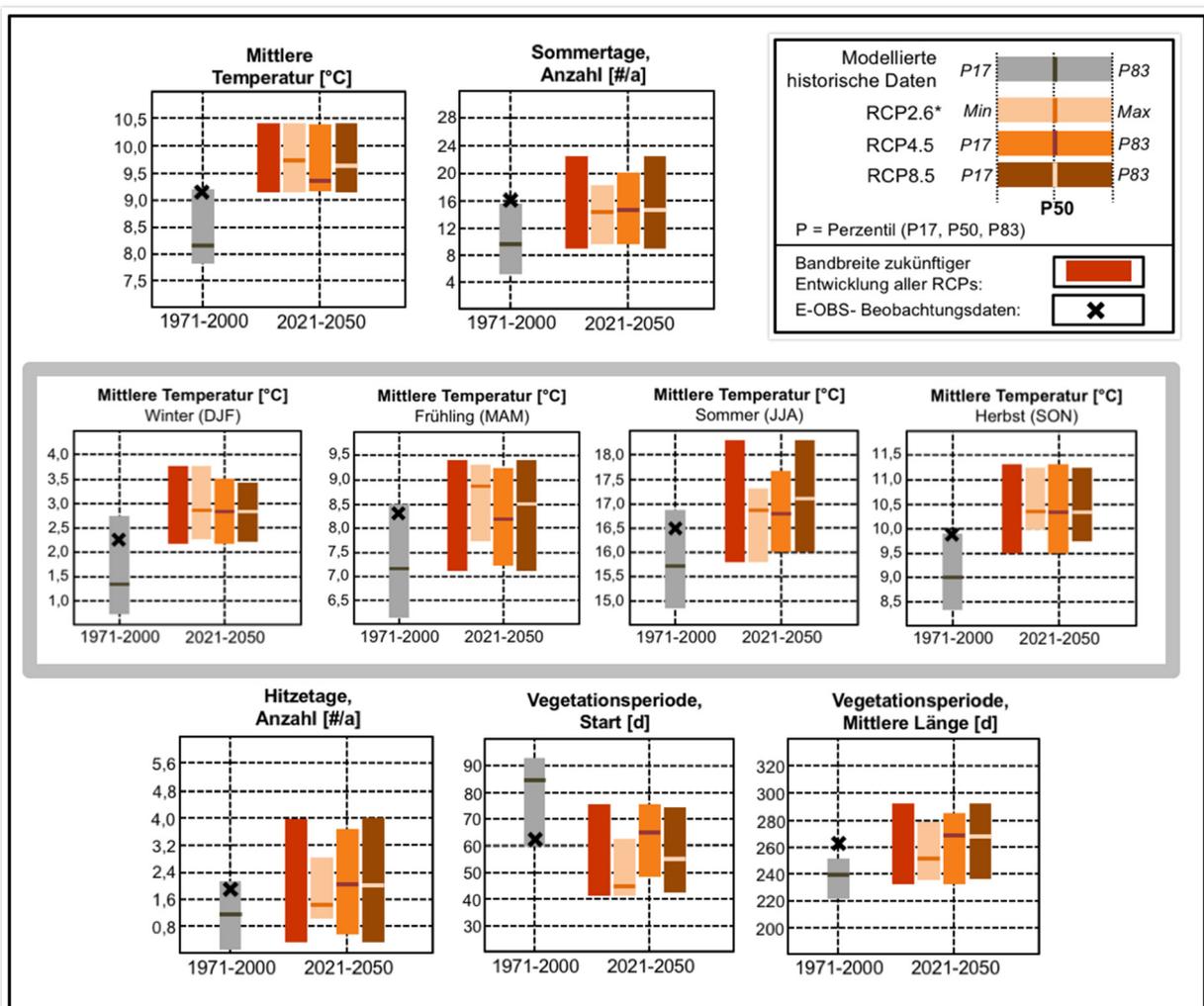


Abb.6 Temperatur und Vegetationsperiode – Gegenüberstellung der EC-Ensemble-Set Ergebnisse für die Zeiträume 1971 – 2000 und 2021 – 2050 (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)

Dagegen weisen die Modellergebnisse auf nur geringe Veränderungen bei den Niederschlagsmengen hin. Die tendenzielle Zunahme der Starkregenereignisse bei nahezu unveränderten Niederschlagsmengen ist ein Hinweis auf mögliche Veränderungen bei den Niederschlagsmustern. Diese Entwicklung würde sich auf den gesamten lokalen Wasserhaushalt auswirken.

Durch die Erhöhung der mittleren Temperatur besteht eine Tendenz zu einem früheren Start der Vegetationsperiode, wodurch sich auch ihre mittlere Länge vergrößern wird. In Bezug auf die mittlere Windstärke sind nur geringere Veränderungen zu erwarten.

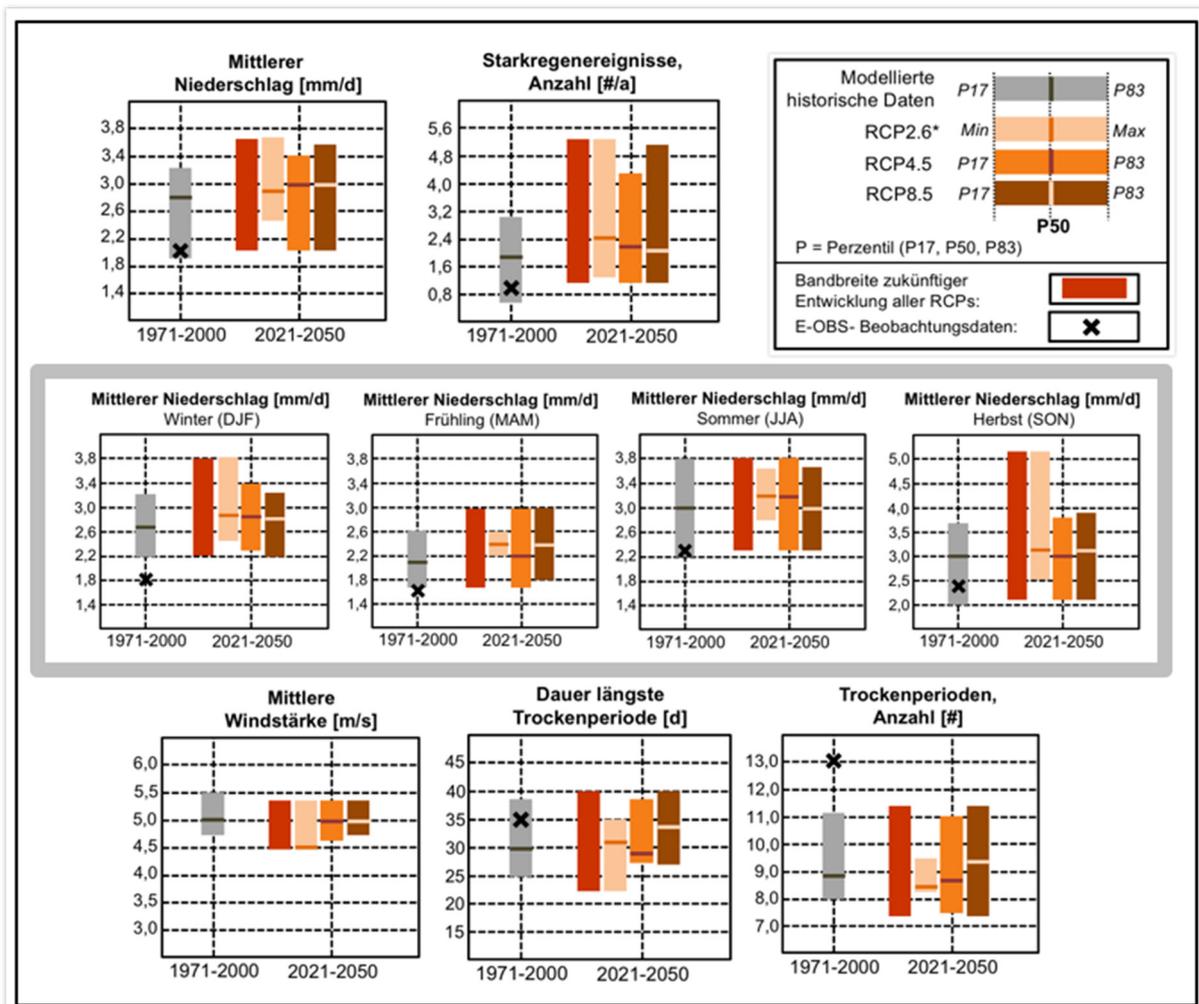


Abb.7 Niederschlag, Trockenheit und Windstärke – Gegenüberstellung der EC-Ensemble-Set Ergebnisse für die Zeiträume 1971 – 2000 und 2021 – 2050 (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)

3.2. Auswirkungen des Klimawandels auf den lokalen Wasserhaushalt

Für alle wasserbezogenen Fragestellungen im Bereich Bremerhaven gilt es zu beachten, dass die Auswirkungen des Klimawandels in vielfacher Weise den lokalen Wasserhaushalt beeinflussen können. Durch die globale Erwärmung wird sich der Wasserkreislauf intensivieren. Damit sind auch Änderungen bei der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen – und damit einhergehend von urbanen Überflutungen – zu erwarten.

Höhere mittlere Temperaturen – einschließlich der Trend zu einem Anstieg der jährlichen Anzahl der Sommertage – werden zu höheren Verdunstungsraten führen. In Verbindung mit einem gleichbleibenden bis steigenden Trend für die Anzahl der Starkregeneignisse – einschließlich einem erhöhtem

Oberflächenabfluss – wird sich dies insgesamt negativ auf den Jahresgang der Grundwasserneubildung auswirken. Bemerkbar machen kann sich dies in einer Erhöhung der Grundwasserschwankungsbreite und einer Verschiebung des mittleren Grundwasserstandes. Generell hängt das Ausmaß der Auswirkungen jedoch stark von den hydraulischen und hydrogeologischen Eigenschaften sowie der Mächtigkeit der Grundwasserleiter ab. Zuverlässige Angaben zur zeitlichen Entwicklung sind anhand der vorliegenden Informationen nicht möglich

Für den lokalen Wasserhaushalt spielen aber auch die Wasserstände der Nordsee und der Unterweser eine wichtige Rolle, da diese das Gefälle zu den Sielen, die zur Entwässerung der Küstenniederungsgebiete dienen, beeinflussen. Für die Nordsee zeigen Beobachtungen, dass der Meeresspiegel zwischen 1,6 und 1,8 mm pro Jahr ansteigt (Wahl et al. 2010, Albrecht et al. 2011). Es sind allerdings keine systematischen Veränderungen des Meeresspiegels über einen längeren Zeitraum erkennbar. Aussagen über zukünftige Entwicklungen sind sehr unsicher, insbesondere als Folge von Unsicherheiten hinsichtlich zukünftiger Änderungen im Windklima (Brasseur et al. 2017).

Während viele der großen Flüsse in Deutschland einen deutlich steigenden Trend der jährlichen Höchstabflüsse zeigen, ist dies bei der Weser weniger stark ausgeprägt (Brasseur et al. 2017). Bezogen auf den Gesamtabfluss zeigen einzelne Projektionen sowohl einen flächendeckenden Rückgang der Hochwasserereignisse (Hermann et al. 2013) wie auch eine Zunahme im Winter Schönwiese et al. (2006). Fasst man die Ergebnisse von Untersuchungen über das Abflussverhalten von Flüssen zusammen, so zeigt sich, dass Abflusscharakteristika stark von den lokalen Gegebenheiten geprägt werden und dass die Größen sehr individuell auf verschiedene Einflussfaktoren wie Landnutzungsänderungen reagieren (Bender et al. 2017c).

4. Literatur

- Albrecht, F., Wahl, T., Jensen, J., Weisse, R. (2011) Determining sea level change in the German Bight. *Ocean Dynamics* 61(12):2037–2050.
- Bender, S., Brune, M., Cortekar, J., Groth, M. & Remke, T. (2017a): Klimawandeltaugliche Kompensationsmaßnahmen. – Überprüfung der Funktionstüchtigkeit von Kompensationsmaßnahmen unter klimatisch veränderten Bedingungen am Beispiel der Stadt Kiel. – GERICS-Report 32, 73 S.
- Bender, S., Brune, M., Cortekar, J., Groth, M. & Remke, T. (2017b): Anpassung an die Folgen des Klimawandels in der Stadtplanung und Stadtentwicklung. - Der GERICS-Stadtbaukasten. – GERICS-Report 31, 73 S.
- Bender, S., Butts, M., Hagemann, S., Smith, M., Vereecken, H. & Wendland, F. (2017c): Der Einfluss des Klimawandels auf die terrestrischen Wassersysteme in Deutschland. Eine Analyse ausgesuchter Studien der Jahre 2009 bis 2013. Report 29. Climate Service Center Germany. Hamburg.
- Bender, S., Cortekar, C. & Jacob, D. (2016): Klimaresiliente Stadt - Was sagen Klimamodell-Projektionen über die Zukunft von Städten aus und wie können Städte diese Zukunft beeinflussen und meistern? - Gewässerschutz – Wasser – Abwasser, 239, 32/1 bis 32/14.
- Brasseur, G., Jacob, D. & Schick-Zöller, S. (2017) [Hrsg.]: Klimawandel in Deutschland-Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven, 348 S.
- DWD (2016): Nationaler Klimareport 2016, 2. Korr. Auflage, 44 Seiten
- GERICS (2017): Standort-charakteristisches Climate-Fact-Sheet Hafen Hamburg. – unveröffentl. Climate-Fact-Sheet, 11 S.
- Haylock, M.R., Hofstrata, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D. & New, M. (2008): A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. - *J. Geophys. Res (Atmospheres)*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201.
- Herrmann, F., Chen, S., Kunkel, R. und Wendland, F. (2013): Quantifizierung und Bewertung des innerjährlichen Abflussgeschehens und der Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt in Niedersachsen und Bremen. – Bericht an das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz Hannover, an das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) Hannover und den Geologischer Dienst der Hansestadt Bremen.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, A.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Deque, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Hännler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kroner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussanna, J-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research Regional Environmental Changes. Vol. 14, Issue 2, pp. 563-578.
- Meinke, I., Rechid, D., Tinz, B., Maneke, M., Lefebvre, C. & Isokeit, E. (2017): Klima der Region – Zustand, bisherige Entwicklung und mögliche Änderungen bis 2100. – In: v.Storch, H., Meinke, I. & Claußen, M. [Hrsg.]: Hamburger Klimabericht, 15-36.
- ReKliEs-De (2017): ReKliEs-De Ergebnisbericht, 56 S.
- Schönwiese, C.-D., Staeger, T. & Trömel, S. (2006): Klimawandel und Extremereignisse in Deutschland: Klimastatusbericht 2005, 7-17.
- SUBV (2018): Klimaanpassungsstrategie Bremen und Bremerhaven, 160 S. (Hrsg.: Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr) (Stand Januar 2018).
- Wahl T, Jensen J, Frank T (2010) On analysing sea level rise in the German Bight since 1844. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10:171–179. doi:10.5194/nhess-10-171-2010.

Anhang 1: EURO-CORDEX – Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment – European Domain

EURO-CORDEX ist der europäische Zweig der internationalen Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) Initiative. Diese wird durch das World Climate Research Programme (WRCP) mit dem Ziel gefördert, einen **international koordinierten** Rahmen zu schaffen, um verbesserte regionale Klimaprojektionen für alle Länderregionen weltweit zu produzieren.

Jacob et al. (2014) nutzen den ersten Satz von EURO-CORDEX Simulationen mit einer horizontalen Auflösung von 12,5 km für die Emissionsszenarien RCP4.5 und RCP8.5, um u.a. die Ergebnisse denen der SRES A1B Simulationen des ENSEMBLES-Projektes gegenüber zu stellen. Während sich die großflächigen Änderungsmuster für die mittlere Temperatur und den Niederschlag bei allen Szenarien ähnlich ausprägen, zeigen sich aufgrund der höheren räumlichen Auflösung der EURO-CORDEX Simulationen regionale Unterschiede. Darüber hinaus wurde der **Ensemble-Ansatz** dazu genutzt, Aussagen über Robustheit und Signifikanz der Ergebnisse zu erlangen. Die Robustheit wird über die Übereinstimmung der Simulationen in Richtung der projizierten Änderungen sowie den Anteil der Simulationen, die statistisch signifikante Änderungen projizieren, definiert (Pfeifer et al. 2015).

Die Ergebnisse von Jacob et al. (2014) zeigen für die Periode 2071 – 2100 (verglichen mit 1971 – 2000) einen robusten und signifikanten Anstieg der **mittleren jährlichen Temperatur** in Deutschland (+1,6° bis +3,2°C für RCP4.5 bzw. +3,7° bis +5,2°C für RCP8.5). Die **mittleren jährlichen Niederschlagssummen** zeigen sich bei RCP8.5 für weite Teile Deutschlands erhöht (signifikant und robust), mit Ausnahme von Norddeutschland, bzw. bei RCP4.5 variieren die Veränderungen zwischen -5% und +25% (signifikant und robust). Bei den **Starkregenereignissen** zeigen die Ergebnisse deutliche saisonale Unterschiede. Für RCP8.5 ergeben sich deutschlandweit im Winter robuste und signifikante Zunahmen der Anzahl (15 bis 35%), wohingegen im Sommer – bis auf Teile Bayerns – keine signifikanten Veränderungen simuliert wurden. Für RCP4.5 zeigen die Ergebnisse nur wenige signifikante und robuste Veränderungen. Ausnahmen bilden die Zunahme der Ereignisanzahl von 5% bis 25% für den Winter in Ostdeutschland, den nördlichen Teil Nordrhein-Westfalens und für Teile Südost-Bayerns.

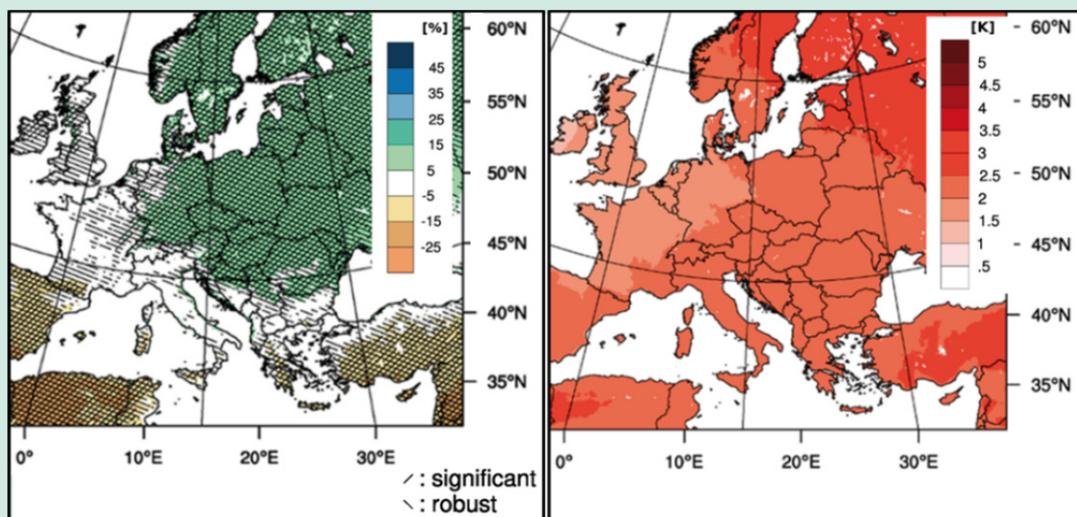


Abb. Projizierte Veränderungen des jährlichen mittleren Niederschlags (links) und der jährlichen mittleren Temperatur (rechts) für 2071 – 2100 (im Vergleich zu 1971 – 2000) für RCP4.5 (entnommen aus Jacob et al. 2014, S.567, verändert).

Anhang 2: Überblick der verwendeten Klimamodelle für das EC-Ensemble-Set

Niedriges Emissionsszenario (RCP2.6)		Moderates Emissionsszenario (RCP4.5)		Hohes Emissionsszenario (RCP8.5)	
Name des RCM	Name und Realisierung des antreibenden GCM	Name des RCM	Name und Realisierung des antreibenden GCM	Name des RCM	Name und Realisierung des antreibenden GCM
REMO	MPI-ESM; r1	REMO	MPI-ESM; r1	REMO	MPI-ESM; r1
REMO	MPI-ESM; r2	REMO	MPI-ESM; r2	REMO	MPI-ESM; r2
-	-	CCLM4.8	MPI-ESM; r1	CCLM4.8	MPI-ESM; r1
-	-	RCA4	MPI-ESM; r1	RCA4	MPI-ESM; r1
-	-	CCLM4.8	CNRM-CM5; r1	CCLM4.8	CNRM-CM5; r1
-	-	RCA4	CNRM-CM5; r1	RCA4	CNRM-CM5; r1
-	-	CCLM4.8	EC-EARTH; r12	CCLM4.8	EC-EARTH; r12
RCA4	EC-EARTH; r12	RCA4	EC-EARTH; r12	RCA4	EC-EARTH; r12
RACMO2.2	EC-EARTH; r1	RACMO2.2	EC-EARTH; r1	RACMO2.2	EC-EARTH; r1
-	-	HIRHAM5	EC-EARTH; r3	HIRHAM5	EC-EARTH; r3
-	-	WRF3.3.1	IPSL-CM5A; r1	WRF3.3.1	IPSL-CM5A; r1
-	-	RCA4	IPSL-CM5A; r1	RCA4	IPSL-CM5A; r1
-	-	CCLM4.8	HadGEM2; r1	CCLM4.8	HadGEM2; r1
-	-	RACMO2.2	HadGEM2; r1	RACMO2.2	HadGEM2; r1
-	-	RCA4	HadGEM2; r1	RCA4	HadGEM2; r1

Anhang 3: Gegenüberstellung der Ergebnisse für Bremerhaven aus der Klimaanpassungsstrategie für Bremen und Bremerhaven (KASB-Ensemble) und dem EC-Ensemble-Set für RCP8.5 (2012 – 2050).

	Beobachtung E-OBS-Datensatz (1971-2000)	Prüfdatensatz #1		Prüfdatensatz #2	
		Bandbreite KASB-Ensemble		Bandbreite EC-Ensemble-Set	
Mittlere Temperatur [°C]	9,3	Max.	11,1	P17	10,4
		P50	10,6	P50	9,6
		Min.	10,1	P85	9,1
Anzahl der Hitzetage [#a]	1,9	Max.	5,4	P17	4
		P50	3,9	P50	2
		Min.	2,4	P85	0,5
Dauer längste Trockenperiode [d]	35	Max.	40	P17	40
		P50	35	P50	34
		Min.	30	P85	27
Anzahl Starkregenereignisse* [#a]	0,9	Max.	1,3	P17	5,3
		P50	0,8	P50	2,2
		Min.	0,1	P85	1,1
Mittlerer Niederschlag [mm/d]	2,0	Max.	2,2	P17	3,5
		P50	2,1	P50	3,0
		Min.	2,0	P85	2,1
Mittlerer Niederschlag (Winter) [mm/d]	1,8	Max.	2,1	P17	3,3
		P50	1,9	P50	2,8
		Min.	1,6	P85	2,2
Mittlerer Niederschlag (Sommer) [mm/d]	2,3	Max.	2,6	P17	3,7
		P50	2,4	P50	3,0
		Min.	2,1	P85	2,3

P=Perzentil, Definition „Starkregen-Tag“: KASB-Ensemble: Niederschlagsmenge ≥ 20 mm pro Tag; EC-Ensemble-Set: Niederschlagsmenge ≥ 25 mm pro Tag.



Kontakt:

Climate Service Center Germany (GERICS)

Fischertwiete 1 | 20095 Hamburg | Germany
Tel +49 (0)40 226 338-0 | Fax +49 (0)40 226 338-163
www.climate-service-center.de

Eine Einrichtung des

 **Helmholtz-Zentrum
Geesthacht**

Zentrum für Material- und Küstenforschung

ISSN 2625-7408