



Regionale Klimainformationen für Bremen

Überprüfung, Erweiterung, Anwendung

CITY SERIES 02



Titelbild: © Fotolia / costadelsol

Zitierhinweis: Bender, S., Groth, M. Pfeifer, S. & Raub, T. (2018): Regionale Klimainformationen für Bremen – Überprüfung, Erweiterung, Anwendung. – City Series 02, Climate Service Center Germany, Hamburg

Erscheinungsdatum: Oktober 2018

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

Regionale Klimainformationen für Bremen

Überprüfung, Erweiterung, Anwendung

Autoren: Steffen Bender, Markus Groth, Susanne Pfeifer, Thomas Raub

Oktober 2018

Inhaltsverzeichnis

0. Zusammenfassung	3
1. Einleitung	5
2. Regionale Klimaprojektionen	7
2.1. Bewertung der Klimaveränderungen (Klimaänderungsszenarien)	7
2.1.1. Methodischer Ansatz	8
2.1.2. Modellerte 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 Bremen	21
3.1. Klimaparameter – zukünftige Trends.....	21
3.2. Hitze in der Stadt: Klimafolgen und Maßnahmen	23
3.3. Lokaler Wasserhaushalt: Klimafolgen und Maßnahmen	24
4. Literatur.....	25
Anhang 1: EURO-CORDEX – Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment – European Domain	26
Anhang 2: Überblick der verwendeten Klimamodelle für das EU-COR-Ensemble-Set	27
Anhang 3: Gegenüberstellung der Ergebnisse für Bremen aus der Klimaanpassungsstrategie für Bremen und Bremerhaven und dem EU-COR-Ensemble-Set für RCP8.5 (2012 – 2050).	28

Abbildungsverzeichnis

Abb.1 Beispiel für die ausgewählten Gitterboxen für den Bereich Bremen sowie der verwendeten Boxen aus dem E-OBS-Datensatz.	9
Abb.2 Schematische Darstellung der Bandbreitenermittlung aus den Ergebnissen der Klimaprojektionen der Anpassungsstrategie Bremen und Bremerhaven.	16
Abb.3 Vergleich der Bandbreiten des EURO-CORDOEX-Ensemble-Sets für Bremen mit den Ergebnissen der Klimaanpassungsstrategie Bremen und Bremerhaven	17
Abb.4 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.5 Temperatur und Vegetationsperiode – Gegenüberstellung der EU-COR-Ensemble-Set Ergebnisse für die Zeiträume 1971 – 2000 und 2021 – 2050.	22
Abb.6 Niederschlag, Trockenheit und Windstärke – Gegenüberstellung der EU-COR-Ensemble-Set Ergebnisse für die Zeiträume 1971 – 2000 und 2021 – 2050.	23

Tabellenverzeichnis

Tab.1 Übersicht und Erläuterung der verwendeten Klimaindizes und –variablen	7
Tab.2 Beobachtungsdaten und modellierte historische Daten des EU-COR-Ensemble-Sets	10
Tab.3 Berechnete Variablen und Indizes des EU-COR-Ensemble-Sets: historischer Zeitraum (1971 – 2000) und Zukunftsszenario RCP2.6 (2021 – 2050).	11
Tab.4 Berechnete Variablen und Indizes des EU-COR-Ensemble-Sets: historischer Zeitraum (1971 – 2000) und Zukunftsszenario RCP4.5 (2021 – 2050).	13
Tab.5 Berechnete Variablen und Indizes des EU-COR-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. Zusammenfassung

Der Temperaturanstieg als Folge des Klimawandels ist auch im Norden Deutschlands messbar. Seit dem Beginn der Temperaturoaufzeichnungen im Jahr 1881 ist das Jahresmittel der Lufttemperatur in Bremen um rund 1,3°C angestiegen (DWD 2016). Darüber hinaus wurden sieben der zehn wärmsten Jahre Bremens seit dem Jahr 2000 gemessen (DWD 2016). Das Jahr 2014 war hierbei mit 11,0°C mittlerer Jahrestemperatur das bisher wärmste gemessene Jahr, mit einem Plus von 2,2 Grad im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961 – 1990.

Regionale Klimaprojektionen für Europa zeigen, dass sich dieser Trend noch weiter fortsetzen wird. Doch nicht nur höhere mittlere Temperaturen sorgen für weitere Herausforderungen, sondern auch Hitzewellen (wie 1994, 2003, 2006, 2010, 2015 und 2018) oder Starkniederschläge (wie 2011, 2016, 2018) in Verbindung mit urbanen Überschwemmungen. Durch die küstennahe Lage und die tidebeeinflussten Gewässer besteht darüber hinaus eine besondere Exposition Bremens gegenüber dem steigenden Meeresspiegel.

Um die Wettbewerbsfähigkeit der Region auch zukünftig unter den sich verändernden Klimabedingungen zu gewährleisten, hat die Freie und Hansestadt Bremen als eines der ersten Bundesländer einen gesetzlichen Rahmen für die Anpassung an die Folgen des Klimawandels geschaffen. Mit Beschluss des Klimaschutz- und Energiegesetzes hat die Bremische Bürgerschaft den Bremer Senat im März 2015 beauftragt, eine Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels zu entwickeln. Diese wurde im Frühjahr 2018 durch den Senat der Freien Hansestadt Bremen und durch die Stadtverordnetenversammlung Bremerhaven beschlossen.

Die klimawissenschaftliche Grundlage für die neue Anpassungsstrategie für Bremen und Bremerhaven (Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr; SUBV 2018) bilden die Klimainformationen des Nationalen Klimareports des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2016). Diese betrachten ausschließlich das „Business-as-usual“-Szenario (RCP8.5). Um eine optimale Entwicklung klimawandeltauglicher Maßnahmen zu ermöglichen, werden im vorliegenden Bericht alle verfügbaren regionalen Klimainformationen überprüft, mit neuen Ergebnissen ergänzt und daraus Auswirkungen für Bremen abgeleitet.

Die hier angewandte Methodik basiert auf dem Vorgehen, das im Report zum „GERICS-Stadtbaukasten“ für das Modul „Klimawandeltaugliche Kompensationsmaßnahmen“ (Bender et al. 2017a) beschrieben und ebenfalls bereits für Bremerhaven (Bender et al. 2018) angewandt wurde.

Dank

Vielen Dank an Irene Fischer-Bruns, Peer Seipold, Kevin Sieck und Claas Teichmann für den internen Review.

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

Ungeachtet aller Maßnahmen zum Klimaschutz werden weltweit immer noch große Mengen an Treibhausgasen emittiert, so dass klimatische Veränderungen, die sich auf unsere Lebens- und Arbeitsbedingungen auswirken, unausweichlich sein werden. Generell erhöht sich durch die steigende räumliche Konzentration wirtschaftlicher Wertschöpfung auch die Vulnerabilität im urbanen Raum, ebenso wie durch das Bevölkerungswachstum und eine zunehmende Abhängigkeit von der Funktionsfähigkeit kritischer Infrastrukturen. In gleichem Maße wächst die Bedeutung von Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Die Umsetzung dieser Maßnahmen hingegen ist keineswegs trivial, da Städte komplexe Systeme sind, bei deren Management sowohl klimatisch als auch nicht-klimatisch bedingte Treiber sowie deren Wechselwirkungen zu berücksichtigen sind (Bender et al. 2016).

In Bremen weisen der Anstieg der jährlichen Durchschnittstemperatur (seit 1881 um 1,3°C, DWD 2016), die Zunahme von Hitzewellen (wie 1994, 2003, 2006, 2010, 2015 und 2018) oder Starkniederschlägen (wie 2011, 2016, 2018) immer häufiger auf die neuen Herausforderungen hin, denen es sich zu stellen gilt.

Dabei sind nahezu alle Handlungsfelder betroffen, wobei sich das Ausmaß der Beeinflussung, je nach Art der Klimawandelfolge, unterschiedlich darstellt. So erhöht steigender Hitzestress die Anforderungen an den Gesundheits- und den Bausektor. Die Zunahme von urbanen Überflutungen betrifft gleichermaßen private Gebäude oder gewerbliche Anlagen, aber auch unterschiedliche Bereiche der kritischen Infrastruktur (Energieversorgung, Wasserversorgung, Verkehrsanlagen). Darüber hinaus können die Folgen des Klimawandels auch in Veränderungen des lokalen Wasserkreislaufs bestehen, was insbesondere den Bodenschutz und die Wasserwirtschaft vor neue Herausforderungen stellt. Längere Trockenperioden in Verbindung mit höheren Temperaturen bedeuten eine langfristige Veränderung der Lebensbedingungen des heimischen Stadtgrüns. Durch die küstennahe Lage und die tidebeeinflussten Gewässer besteht darüber hinaus eine besondere Exposition Bremens gegenüber dem steigenden Meeresspiegel (SUBV 2018).

Mit der Entwicklung der Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels für Bremen wurde gleichzeitig begonnen, die Rahmenbedingungen zum Klimaschutz und zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels so zu gestalten, dass das Ziel der Klimaresilienz (Widerstandsfähigkeit gegen Klimaveränderungen) gestärkt wird. Als Basis dafür, sich frühzeitig den Herausforderungen stellen zu können, dienten unter anderem die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten (KLIMZUG)“ – insbesondere dem Teilprojekt „nordwest2050“ – aus dem Projekt „KlimaAnpassungsStrategie - Extreme Regenereignisse (KLAS)“ sowie aus dem „Fachkonzept für Anpassungsstrategien an die Folgen des Klimawandels in Bremen“.

Mit dem Projekt „Interkommunale Koordinierungsstelle Klimaanpassung (InKoKa)“ wurden darüber hinaus Kommunen der Region auf ihrem Weg zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels unterstützend begleitet.

Im Januar 2016 fand die Auftaktveranstaltung zur Erarbeitung von zwei Teilkonzepten zur Klimaanpassung für die Städte Bremen und Bremerhaven unter der Leitung des Büros „MUST Städtebau“ statt. Das Ziel dieser Konzepte war es, Wege und Maßnahmen zur Anpassung an die projizierten Klimaveränderungen – unter besonderer Berücksichtigung des Stadtklimas, des Wasserhaushaltes und der Biodiversität – zu erarbeiten. Am 18.01.2018 wurde die Anpassungsstrategie durch die Deputation für Umwelt, Bau, Verkehr, Stadtentwicklung, Energie und Landwirtschaft beschlossen, am 07.02.2018 durch den Magistrat Bremerhaven, am 03.04.2018 durch den Senat der Freien Hansestadt Bremen und am 12.04.2018 durch die Stadtverordnetenversammlung Bremerhaven. Die Befassung der Bremischen Bürgerschaft erfolgte vom 29. bis 31. Mai 2018.

Mit diesem Bericht wird die Anpassungsstrategie um die neuesten Ergebnisse regionaler Klimaprojektionen erweitert, wobei auch die sich daraus ergebenden Konsequenzen aufgezeigt werden. Dazu werden die modellierten Klimaänderungen für die Stadt Bremen, basierend auf einem Ensemble regionaler Klimaprojektionen der EURO-CORDEX-Initiative, vorgestellt und mit den Ergebnissen der klimatologischen Grundlagen der „Klimaanpassungsstrategie für Bremen und Bremerhaven“ (SUBV 2018) für Bremen verglichen. Hierzu werden die Methoden des modularen, sektor-übergreifenden „GERICS-Stadtbaukasten“ mit seiner Modulgruppe „Spezifische Klimainformation“ verwendet (Bender et al. 2017b).

2. Regionale Klimaprojektionen

2.1. Bewertung der Klimaveränderungen (Klimaänderungsszenarien)

Als Grundlage zur Abschätzung der Folgen des Klimawandels für die Stadt Bremen werden die nachfolgend skizzierten Klimaparameter verwendet (Tab.1).

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

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) und in Anhang 1 dargelegt sind. Eine Übersicht der im Zuge dessen verwendeten Klimamodelle findet sich ergänzend in Anhang 2. Nachfolgend wird für dieses Ensemble die Bezeichnung „EU-COR-Ensemble-Set“ verwendet.

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 EU-COR-Ensemble-Set beinhaltet Simulationen sechs unterschiedlicher regionaler Klimamodelle (RCM), die von acht verschiedenen globalen Klimamodellen (GCM) beziehungsweise GCM-Realisierungen angetrieben wurden.

Box 1 Die „Repräsentativen Konzentrationspfade“ (RCP)

Die RCP Szenarien (sogenannte "Repräsentative Konzentrationspfade") wurden für den 5. Sachstandsbericht des IPCC entwickelt. Das Szenario RCP2.6 schließt sehr ambitionierte Maßnahmen zur Verringerung von Treibhausgasemissionen ein, was zu einem Strahlungsantrieb – Maß für die Veränderung der Energiebilanz der Erdatmosphäre durch externe Faktoren wie Sonneneinstrahlung oder CO₂ – von ca. 3 W pro m² um das Jahr 2040 führt, 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 zu einem Strahlungsantrieb von 8.5 W pro m² führt. 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: 08/2018).

Die Modelle berechnen die Klimaindizes und -variablen auf einem Gitter (Box 2). Für den lokalen Fokus auf die Region werden die Klimaänderungsinformationen aus allen Simulationen für die Gitterboxen im Bereich Bremerhaven ausgewählt (Abb.1). Basierend auf dem jeweiligen Flächenanteil der Geländeoberfläche pro Gitterbox wird ein gewichtetes Mittel der Klimaänderungen berechnet (GERICS 2017). Die dadurch erhaltenen Informationen sind somit nicht punktspezifisch, sondern beschreiben einen Mittelwert.

Box 2 Simulationsgitterbox

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

In regionalen Klimamodellen wird nur ein Ausschnitt berechnet, allerdings mit einem feineren Gitter, um regionale meteorologische Prozesse besser abbilden zu können.

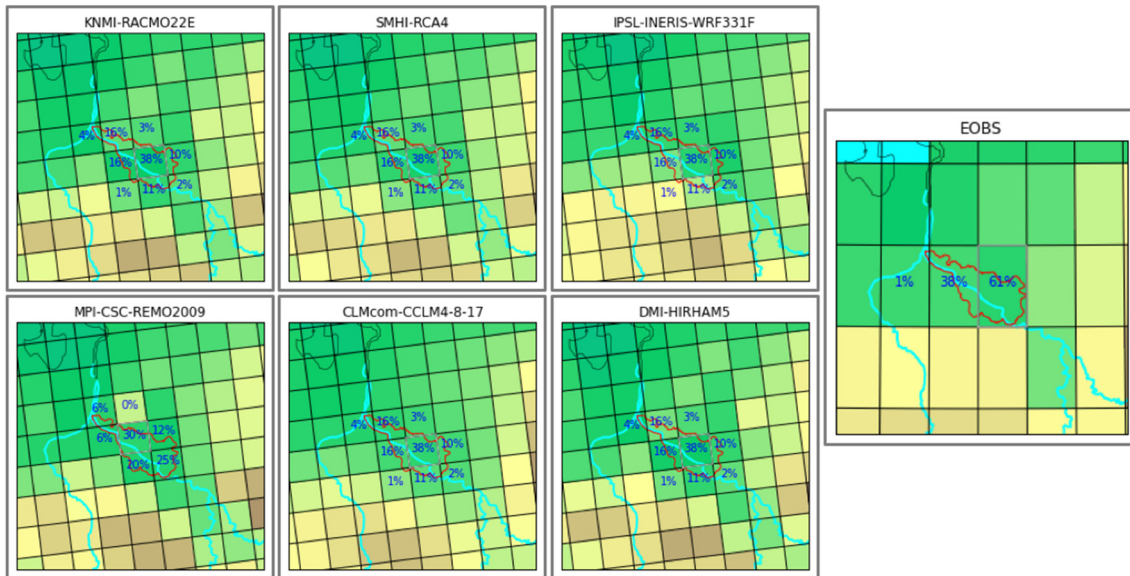


Abb.1 Beispiel für die ausgewählten Gitterboxen aus sechs Klimasimulationen für den Bereich Bremen (Flächenanteil der Gitterbox mit Prozentangabe) sowie der verwendeten Boxen aus dem E-OBS-Datensatz.

Für jeden simulierten Klimaparameter werden nachfolgende Tests durchgeführt:

- Validierung gegen Beobachtungsdaten: Simulationen des EU-COR-Ensemble-Sets für den historischen Zeitraum (hier: 1971 – 2000) werden mit dem gegittert vorliegenden E-OBS-Datensatz (Version 16.0; siehe Box 3) 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 – Beobachtungsdatsatz des ENSEMBLES-Projektes) enthält Niederschlag- und Temperaturmessungen mit täglicher Auflösung. Er wurde im Rahmen des EU-Projektes ENSEMBLES entwickelt (Haylock et al. 2008). Für weitere Informationen siehe auch: <http://www.ecad.eu/e-obs>.

2.1.2. Modellierte historische Klimabedingungen

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

Tab.2 Beobachtungsdaten „E-OBS-Datensatz“ und modellierte historischen Daten des EU-COR-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 (EU-COR- Ensemble-Set) (1971 – 2000)		
		P17	P50	P83
Mittlere Jahrestemperatur [°C]	9,1	7,9	8,2	9,2
Mittl. Temp./Winter (DJF) [°C]	2,0	0,5	1,3	2,3
Mittl. Temp./Frühling (MAM) [°C]	8,4	6,4	7,4	8,8
Mittl. Temp./Sommer (JJA) [°C]	16,6	15,0	16,1	17,3
Mittl. Temp./Herbst (SON) [°C]	9,3	8,2	8,9	9,6
Mittlere Windstärke [m/s]	k. A.	3,8	4,3	5,2
Anzahl Sommertage [#a]	23,4	7,1	12,7	25,5
Anzahl Hitzetage [#a]	3,5	0,4	1,8	4,1
Mittlerer jährl. Niederschlag [mm/d]	1,9	1,9	2,5	2,8
Mittl. Nds./Winter (DJF) [mm/d]	1,7	2,1	2,4	2,8
Mittl. Nds./Frühling (MAM) [mm/d]	1,6	1,7	2,2	2,7
Mittl. Nds./Sommer (JJA) [mm/d]	2,2	2,1	3,0	3,6
Mittl. Nds./Herbst (SON) [mm/d]	2,0	2,0	2,4	2,6
Anzahl Starkregenereignisse [#a]	0,8	0,8	1,5	2,2
Dauer längste Trockenperiode [d]	33	27	29	33
Anzahl Trockenperioden [#a]	13,4	8,4	9,1	10,8
Mittl. Start der Vegetationsperiode [d]	60,9	59,9	82,4	92,4
Mittlere Länge Vegetationsperiode [d]	265,4	223,3	239,6	268,6

Für die mittleren Niederschlagsmengen liegen die modellierten Werte für den Winter und Frühling über den Beobachtungswerten, ansonsten im Bereich des 17. Perzentils. Die beobachtete Anzahl der Starkregenereignisse, Sommertage und Hitzetage sowie die Dauer der längsten Trockenperiode sowie der mittlere Start und die mittlere Länge der Vegetationsperiode werden von den Modellwerten gut wiedergegeben. Die Modellergebnisse unterschätzen allerdings die Anzahl der Trockenperioden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Beobachtungswerte gut von den Modellwerten wiedergegeben werden. 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) stehen vier Klimaprojektionen zur Verfügung. Daher 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 EU-COR-Ensemble-Sets: historischer Zeitraum (1971 – 2000) und Zukunftsszenario RCP2.6 (2021 – 2050).

Klimaparameter	Modellierte historische Daten (EU-COR-Ensemble-Set) (1971 – 2000)			RCP2.6 (EU-COR-Ensemble-Set) (2021 – 2050)		
	P17	P50	P83	MIN	P50	MAX
Mittlere Jahrestemperatur [°C]	7,9	8,2	9,2	9,0	9,8	10,6
Mittl. Temp./Winter (DJF) [°C]	0,5	1,3	2,3	2,2	2,4	3,2
Mittl. Temp./Frühling (MAM) [°C]	6,4	7,4	8,8	7,9	9,1	10,2
Mittl. Temp./Sommer (JJA) [°C]	15,0	16,1	17,3	16,0	17,6	17,9
Mittl. Temp./Herbst (SON) [°C]	8,2	8,9	9,6	9,6	10,4	11,0
Mittlere Windstärke [m/s]	3,8	4,3	5,2	3,6	3,7	5,0
Anzahl Sommertage [#a]	7,1	12,7	25,5	13,2	24,5	29,5
Anzahl Hitzetage [#a]	0,4	1,8	4,1	2,2	3,8	5,6
Mittlerer jährl. Niederschlag [mm/d]	1,9	2,5	2,8	2,3	2,7	2,8
Mittl. Nds./Winter (DJF) [mm/d]	2,1	2,4	2,8	2,3	2,6	3,0
Mittl. Nds./Frühling (MAM) [mm/d]	1,7	2,2	2,7	2,1	2,4	2,6
Mittl. Nds./Sommer (JJA) [mm/d]	2,1	3,0	3,6	2,6	3,0	3,1
Mittl. Nds./Herbst (SON) [mm/d]	2,0	2,4	2,6	2,1	2,6	2,7
Anzahl Starkregenereignisse [#a]	0,8	1,5	2,2	1,2	1,4	2,3
Dauer längste Trockenperiode [d]	27	29	33	26	28	36
Anzahl Trockenperioden [#a]	8,4	9,1	10,8	8,8	8,8	9,7
Mittl. Start der Vegetationsperiode [d]	59,9	82,4	92,4	41,7	50,9	68,7
Mittlere Länge Vegetationsperiode [d]	223,2	239,6	268,6	260,4	275,5	302,4

Bei der Bewertung der Veränderungen zwischen den modellierten historischen Werten und den Ergebnissen des RCP2.6-Ensembles muss beachtet 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. Somit ist theoretisch im letztgenannten Fall eine größere Bandbreite der Ergebnisse zu erwarten.

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 den mittleren Temperaturen im Winter und Herbst erkennbar, da sich die Bandbreiten nicht, beziehungsweise nur minimal, überlappen. Genauso verhält es sich beim Anstieg der zukünftigen Anzahl der Sommertage beziehungsweise Hitzetage.

Änderungen bei den Niederschlagsmengen und bei der Anzahl der Starkregenereignisse sind nur geringfügig ausgeprägt. 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. Bei der mittleren Windstärke sind keine Veränderungen erkennbar.

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 erkennbare Erhöhung der mittleren Jahrestemperatur. Bei saisonaler Betrachtung zeigt insbesondere der Herbst eine deutlich steigende Tendenz. Im Frühling, Sommer und Winter ist dieser Trend schwächer ausgeprägt (Tab. 4). Auch bei den Sommer- und Hitzetagen ist eine tendenzielle Verschiebung zu einer größeren Anzahl möglich. Im ungünstigsten Fall könnte sich die Anzahl der Tage über 30°C aber deutlich erhöhen.

Bei allen betrachteten Niederschlagsmengen – jährlich und saisonal – sowie bei der Anzahl der Starkregenereignisse zeigen sich nur geringfügige Veränderungen. 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 verlängert.

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

Klimaparameter	Modellierte historische Daten (EU-COR-Ensemble-Set) (1971 – 2000)			RCP4.5 (EU-COR-Ensemble-Set) (2021 – 2050)		
	P17	P50	P83	P17	P50	P83
Mittlere Jahrestemperatur [°C]	7,9	8,2	9,2	9,1	9,4	10,6
Mittl. Temp./Winter (DJF) [°C]	0,5	1,3	2,3	1,7	2,5	3,1
Mittl. Temp./Frühling (MAM) [°C]	6,4	7,4	8,8	7,3	8,5	9,6
Mittl. Temp./Sommer (JJA) [°C]	15,0	16,1	17,3	16,1	17,0	18,1
Mittl. Temp./Herbst (SON) [°C]	8,2	8,9	9,6	9,4	10,3	10,9
Mittlere Windstärke [m/s]	3,8	4,3	5,2	3,7	4,3	5,1
Anzahl Sommertage [#a]	7,1	12,7	25,5	11,9	20,0	31,8
Anzahl Hitzetage [#a]	0,4	1,8	4,1	1,3	2,9	6,4
Mittlerer jährl. Niederschlag [mm/d]	1,9	2,5	2,8	2,0	2,7	2,9
Mittl. Nds./Winter (DJF) [mm/d]	2,1	2,4	2,8	2,2	2,7	2,9
Mittl. Nds./Frühling (MAM) [mm/d]	1,7	2,2	2,7	1,8	2,3	2,8
Mittl. Nds./Sommer (JJA) [mm/d]	2,1	3,0	3,6	2,3	2,9	3,5
Mittl. Nds./Herbst (SON) [mm/d]	2,0	2,4	2,6	1,9	2,4	2,7
Anzahl Starkregenereignisse [#a]	0,8	1,5	2,2	1,1	1,6	2,4
Dauer längste Trockenperiode [d]	27	29	33	24	32	38
Anzahl Trockenperioden [#a]	8,4	9,1	10,8	8,1	8,8	10,9
Mittl. Start der Vegetationsperiode [d]	59,9	82,4	92,4	50,2	66,2	76,7
Mittlere Länge Vegetationsperiode [d]	223,2	239,6	268,6	250,2	267,7	287,2

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

Die Ergebnisse des **RCP8.5-Ensembles** unterscheiden sich nur geringfügig von denen des moderaten Emissionsszenarios. Die projizierte mittlere Jahrestemperatur ist erkennbar erhöht. Für alle Jahreszeiten zeigt sich eine steigende Tendenz der mittleren Temperatur (Tab. 5). Die Anzahl der Sommertage und der Hitzetage weisen tendenziell ebenfalls einen Anstieg auf.

Demgegenüber zeigen sich bei den Niederschlagsmengen – jährlich, saisonal und für die Anzahl der Starkregenereignisse – nur geringfügige Veränderungen. Während die Anzahl der Trockenperioden nur wenig variieren, verlängert sich die Dauer der längsten Trockenperiode im extremen Fall um über eine Woche. Bei der mittleren Windstärke sind nur minimale Veränderungen erkennbar.

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 verlängert.

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

Klimaparameter	Modellierte historische Daten (EU-COR-Ensemble-Set) (1971 – 2000)			RCP8.5 (EU-COR-Ensemble-Set) (2021 – 2050)		
	P17	P50	P83	P17	P50	P83
Mittlere Jahrestemperatur [°C]	7,9	8,2	9,2	9,1	9,5	10,6
Mittl. Temp./Winter (DJF) [°C]	0,5	1,3	2,3	1,8	2,6	3,1
Mittl. Temp./Frühling (MAM) [°C]	6,4	7,4	8,8	7,3	8,9	9,6
Mittl. Temp./Sommer (JJA) [°C]	15,0	16,1	17,3	16,0	17,1	18,3
Mittl. Temp./Herbst (SON) [°C]	8,2	8,9	9,6	9,7	10,3	11,2
Mittlere Windstärke [m/s]	3,8	4,3	5,2	3,8	4,3	5,1
Anzahl Sommertage [#a]	7,1	12,7	25,5	11,4	18,5	30,6
Anzahl Hitzetage [#a]	0,4	1,8	4,1	1,0	2,6	6,2
Mittlerer jährl. Niederschlag [mm/d]	1,9	2,5	2,8	2,0	2,7	2,9
Mittl. Nds./Winter (DJF) [mm/d]	2,1	2,4	2,8	2,1	2,6	2,9
Mittl. Nds./Frühling (MAM) [mm/d]	1,7	2,2	2,7	1,8	2,4	2,9
Mittl. Nds./Sommer (JJA) [mm/d]	2,1	3,0	3,6	2,2	2,9	3,4
Mittl. Nds./Herbst (SON) [mm/d]	2,0	2,4	2,6	1,8	2,5	2,9
Anzahl Starkregenereignisse [#a]	0,8	1,5	2,2	1,1	1,7	2,3
Dauer längste Trockenperiode [d]	27	29	33	26	32	43
Anzahl Trockenperioden [#a]	8,4	9,1	10,8	7,4	9,5	11,5
Mittl. Start der Vegetationsperiode [d]	59,9	82,4	92,4	44,5	61,6	73,1
Mittlere Länge Vegetationsperiode [d]	223,2	239,6	268,6	254,8	276,8	292,8

2.2. Bewertung der Klimaprojektionen in der Anpassungsstrategie

Grundlage der neuen Anpassungsstrategie für Bremen und Bremerhaven (SUBV 2018) sind die Klimainformationen des Nationalen Klimareports des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2016). In diesem Report 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 Folgen des Klimawandels werden acht Projektionen herangezogen. Diese basieren auf vier regionalen Klimamodellen, die mit fünf verschiedenen globalen Klimamodellen angetrieben wurden (Tab 6). Es wird jeweils das „Business-as-usual“-Szenario (RCP8.5) verwendet, das im Allgemeinen die größten Veränderungen zeigt. 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 regionales Klimamodell, GCM für globales Klimamodell)

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

Für die Region Bremen stehen allerdings noch weitere regionale Klimaprojektionen zur Verfügung, wobei deren Anzahl auch immer noch stetig wächst. Nachfolgend werden die Ergebnisse von 34 Klimaprojektionen der EURO-CORDEX-Initiative (Anhang 1) für die Region Bremen verwendet (EU-COR-Ensemble-Set), um die Ergebnisse der beiden Klimaprojektionen-Ensembles zu vergleichen. Für ausgesuchte Klimaparameter werden die zu beobachtenden Abweichungen aufgezeigt und diese hinsichtlich der sich daraus ergebenden Konsequenzen bewertet.

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 der nachfolgenden Abbildung 2 dargestellt. Die Ordinate beschreibt hierbei die prozentuale Veränderung des Klimaparameters gegenüber dem Mittelwert der Periode 1971 – 2000.

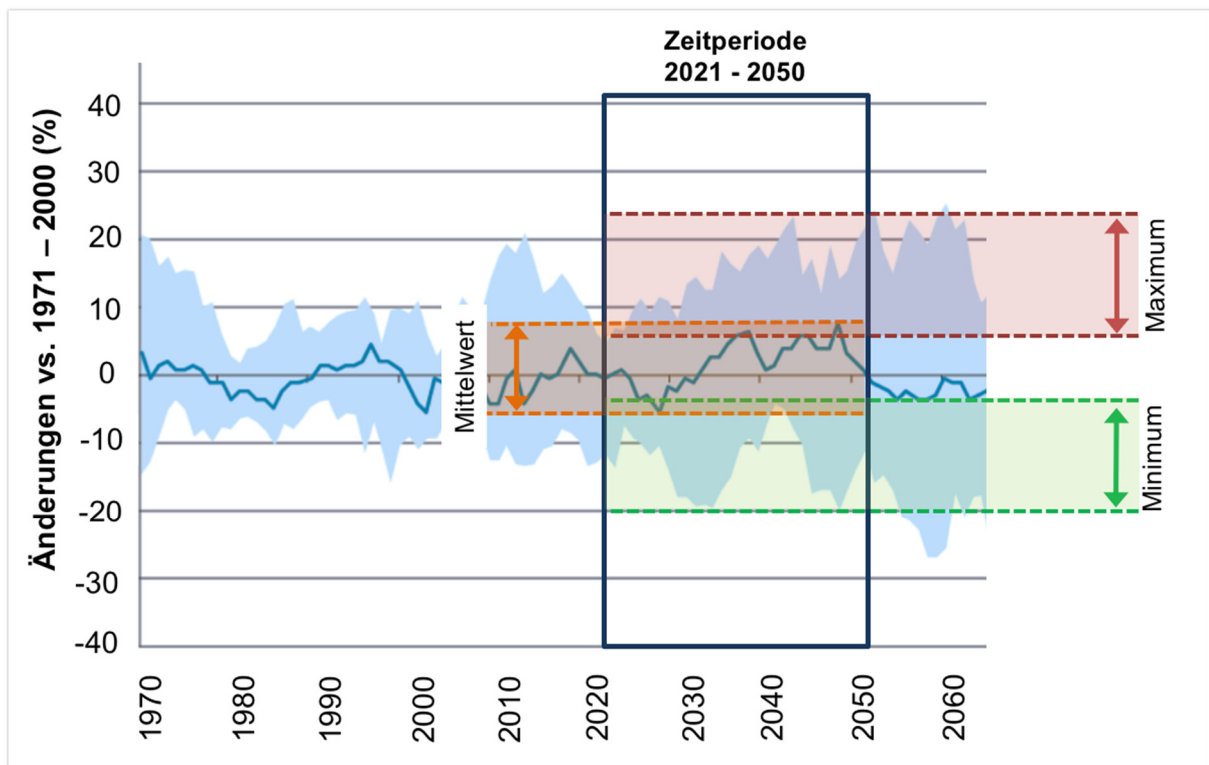


Abb.2 Schematische Darstellung der Bandbreitenermittlung für die Größen Mittelwert, Minimum und Maximum aus den Ergebnissen der Klimaprojektionen der Anpassungsstrategie Bremen und Bremerhaven (SUBV 2018).

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 Starkregenereignisse¹ 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 EU-COR-Ensemble-Sets für das „Business-as-usual“-Szenario (RCP8.5) (vgl. 2.1.5) bilden den Prüfdatensatz #2 (Anhang 3).

Zur Dokumentation der aus beiden Prüfdatensätzen abzuleitenden zukünftigen Entwicklungen werden folgende Bandbreiten angegeben (Abb.3):

- Modellierte historische Werte (EU-COR-Ensemble-Set; 1971 – 2000)
- E-OBS-Beobachtungswert (1971 – 2000)
- Bandbreite alle Klimaprojektionen: RCP 2.6, RCP4.5, RCP8.5 (EU-COR-Ensemble-Set; 2021 – 2050)
- Bandbreite Klimaprojektionen: RCP8.5 (EU-COR-Ensemble-Set; 2021 – 2050)
- Bandbreite der Ergebnisse basierend auf den Klimaprojektionen in der „Klimaanpassungsstrategie für Bremen und Bremerhaven“ für die Region Bremen: RCP8.5 (KASB-Ensemble; 2021 – 2050)

¹ Für einen „Starkregen-Tag“ werden hier unterschiedliche Starkregen-Indices betrachtet: KASB-Ensemble: Niederschlagsmenge ≥ 20 mm pro Tag (sehr starke Niederschläge); EU-COR-Ensemble-Set: Niederschlagsmenge ≥ 25 mm pro Tag (Extremniederschläge).

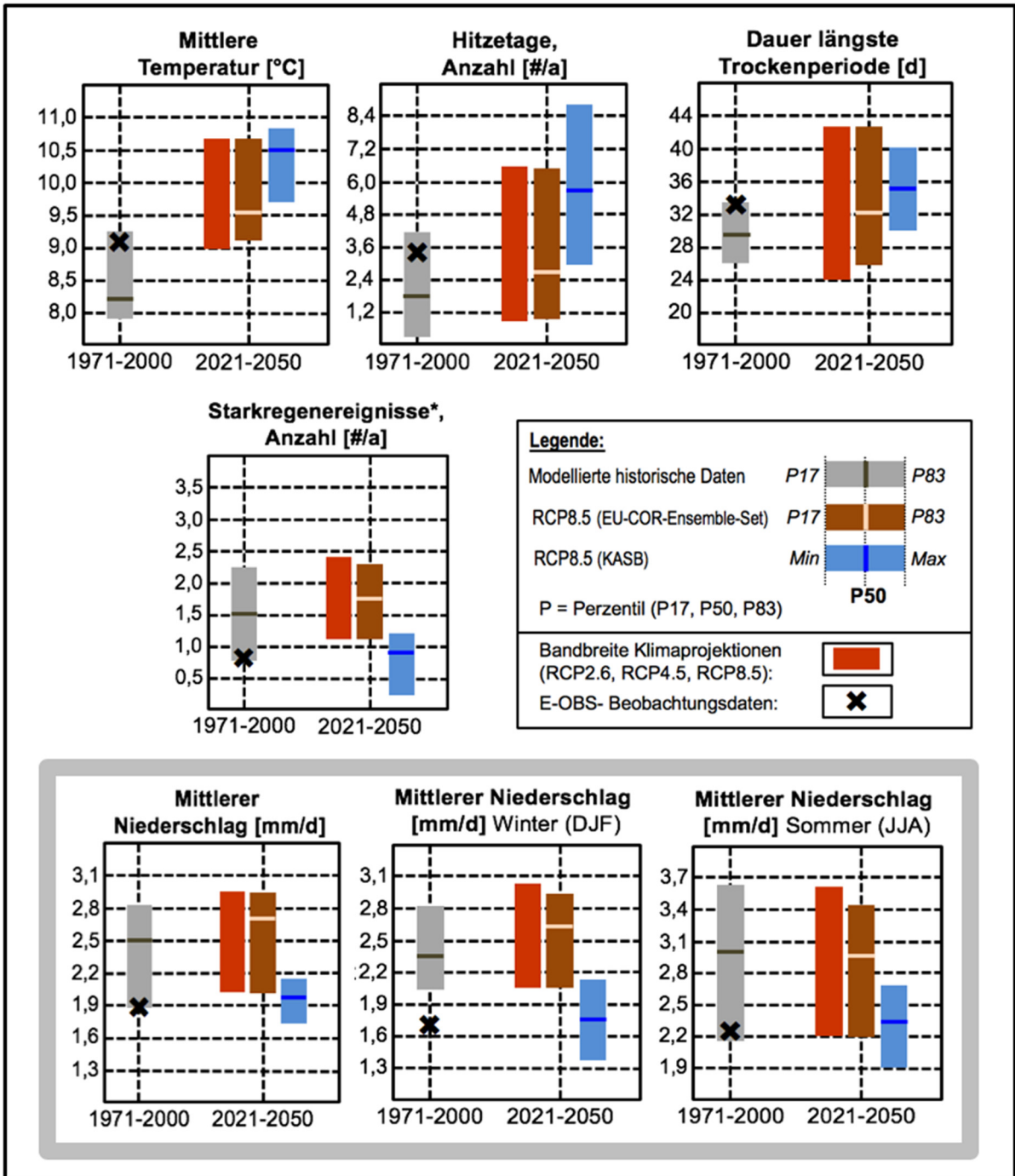


Abb.3 Vergleich der Bandbreiten des EURO-CORDEX-Ensemble-Sets (EU-COR-Ensemble-Set) für Bremen mit den Ergebnissen der Klimaanpassungsstrategie Bremen und Bremerhaven (KASB).

2.2.2. Temperaturzunahme und Hitze

Das Jahresmittel der Lufttemperatur in Bremen lag in den letzten Jahren (2000 bis 2017) zwischen 8,4 und 11,0 °C. Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes zeigen, dass das Jahresmittel im Zeitraum von 1881 bis 2017 um circa 1,3°C angestiegen ist. Zudem ist im Zeitraum von 1961 bis 2016 ein deutlicher Anstieg der heißen Tage zu erkennen (DWD & SUBV 2018).

Der Vergleich zwischen den Ergebnissen des EU-COR-Ensemble-Sets und dem KASB-Ensemble zeigt in beiden Fällen einen signifikanten Anstieg der mittleren Jahrestemperatur für die Periode 2021 – 2050. Dabei werden vom KASB-Ensemble leicht höhere Extremwerte erreicht. Das EU-COR-Ensemble-Set weist eine größere Bandbreite auf, was vor allem den Bereich einschließt, der eine geringere Temperaturerhöhung anzeigt. Bei den projizierten Hitzetagen zeigt sich ein großer Schnittbereich zwischen den modellierten historischen Daten und den beiden Ensemble-Datensätzen. Die Ergebnisse des KASB-Ensembles weisen hierbei die deutlich höheren Werte auf, die zu einem nennenswerten Anteil über dem 83. Perzentil des EU-COR-Ensemble-Sets liegen (Abb.3).

2.2.3. Niederschläge und Starkregen

Im Gegensatz zur Temperatur liefern die Projektionen 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 (Abb.4). Für die Niederschlagsänderungen im Sommer (Juni, Juli, August) variieren die Modellergebnisse bei der Betrachtung des 30-jährigen gleitenden Mittels (1986 – 2085) im Vergleich zur Referenzperiode (1971 – 2000) von zukünftig extrem trockenerem bis zu leicht feuchteren Verhältnissen.

Generell zeigen Simulationen, 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.

Box 4 Dynamische und statistische Regionalisierungsmethoden

Mit der dynamischen Regionalisierungsmethode wird ein dreidimensionaler Ausschnitt des Klimasystems (physikalische, 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).

Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes zeigen für Bremen im Zeitraum 1882 bis 2015 eine jährliche Niederschlagszunahme von im Mittel rund 100 mm, wobei der größte Anstieg im Winter (+55 mm) und Herbst (+30 mm) zu verzeichnen ist. Ein geringerer Anstieg, aber gleichwohl ein positiver Trend, ist für im Sommer (+10 mm) und Frühling (+5 mm) zu erkennen (SUBV 2018).

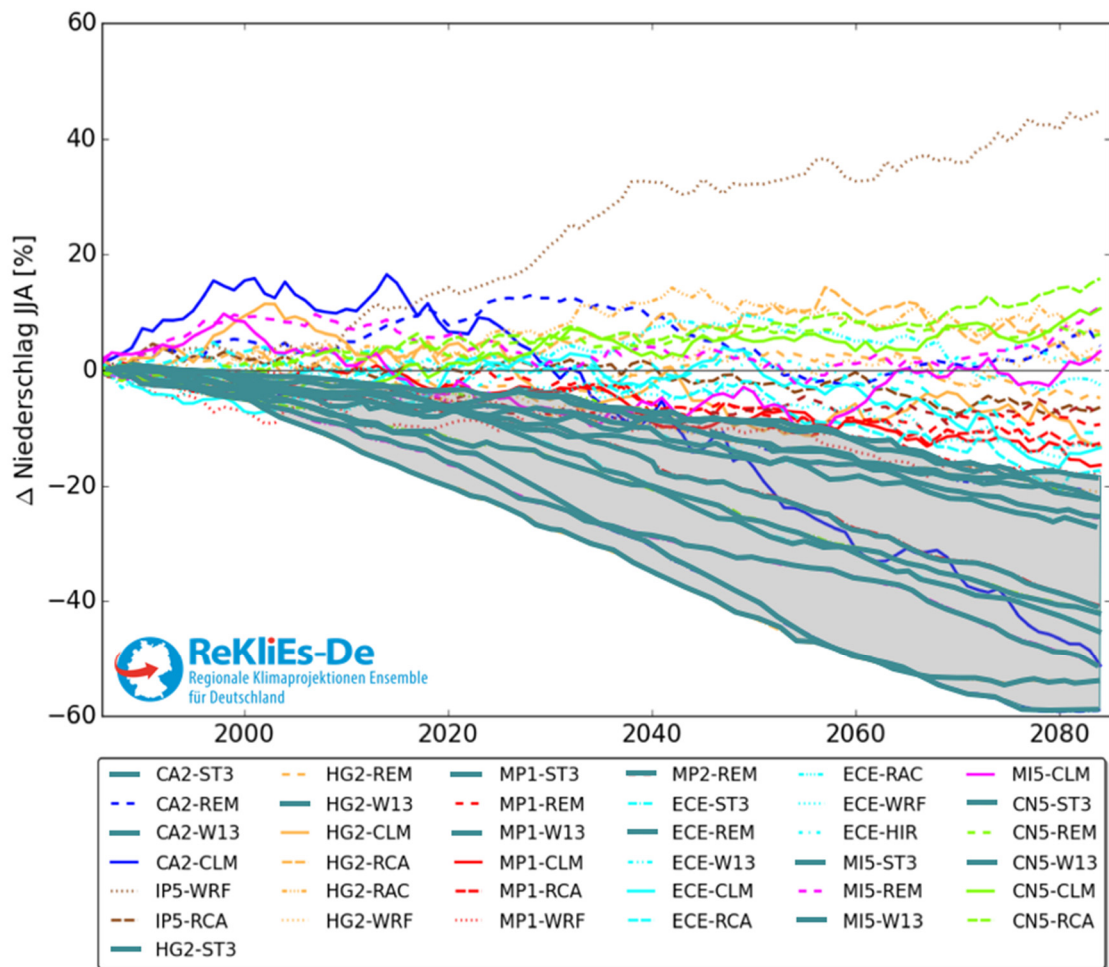


Abb.4 Vergleich der Klimaprojektionen aus dem ReKlies-De-Projekt (für Deutschland), Änderungen der Niederschlagsmengen im Sommer (1986 – 2085) für RCP8.5, 30-jähriges gleitendes Mittel (ReKlies-De 2017). Die Bandbreite der Klimaprojektionen statistischer Regionalmodelle ist grau hinterlegt.

Betrachtet man die zukünftigen Entwicklungen, so weisen die Ergebnisse des EU-COR-Ensemble-Sets im Vergleich zum KASB-Ensemble eine deutliche Tendenz zu höheren Niederschlagsmengen auf – sowohl im jährlichen Mittel, als auch im Sommer und Winter. Zudem ist die Bandbreite größer. Die Ergebnisse des KASB-Ensembles bewegen sich im Bereich des am Standort Bremen beobachteten Durchschnittswertes (1971 – 2000; E-OBS-Datensatz). Im Vergleich zu den modellierten historischen Werten zeigen die Klimaprojektionen für die Periode 2021 – 2050 beim EU-COR-Ensemble-Set nur geringe Veränderungen (Abb.3).

Beim Vergleich der projizierten Veränderungen hinsichtlich der Anzahl der Starkregenereignisse muss beachtet werden, dass unterschiedliche Klimaindices existieren, mit denen man Starkregenereignisse beschreiben kann. Beim vorliegenden Vergleich wird die Anzahl der Tage mit sehr starken Niederschlägen (KASB-Ensemble, Niederschlagsmenge ≥ 20 mm/d) der Anzahl der Tage mit Extremniederschlägen (EU-COR-Ensemble-Set, Niederschlagsmenge ≥ 25 mm/d) gegenübergestellt.

Prinzipiell ist zu erwarten, dass beim KASB-Ensemble eine größere Anzahl an Starkregentagen erfasst ist. Das Ergebnis zeigt jedoch, dass bei dem EU-COR-Ensemble-Set eine deutlich höhere Anzahl an Starkregentagen projiziert wurde. Allerdings weisen die Bandbreiten der modellierten historischen Daten und des EU-COR-Ensemble-Sets einen großen Überlappungsbereich auf, so dass daraus kein eindeutiger Trend abgeleitet werden kann.

2.2.4. Fazit des Vergleichs

Generell weisen die Ergebnisse des EU-COR-Ensemble-Set eine größere Bandbreite auf. Das liegt unter anderem daran, 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, so dass hier nur den extremen Klimaveränderungen Rechnung getragen wird. Somit können unter Umständen die Folgen des Klimawandels überschätzt werden. Dies könnte bei der Planung und Implementierung von Anpassungsmaßnahmen höhere Kosten nach sich ziehen, als eigentlich notwendig.

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.4) 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 potenziellen Klimaveränderungen bei der Planung berücksichtigen zu können.

3. Zusammenfassende Bewertung für Bremen

3.1. Klimaparameter – zukünftige Trends

Vergleicht man die bisher für Anpassungsmaßnahmen verwendeten regionalen Klimainformationen (SUBV 2018) mit den Ergebnissen des EU-COR-Ensemble-Sets, so zeigt sich eine größere Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen. Dies ist für alle Planungsprozesse von hoher Relevanz, um mögliche Veränderungen sowohl im Bereich des Maximums als auch am unteren Rand der Bandbreite zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen (EU-COR-Ensemble-Set) für alle Emissionsszenarien zeigen für die Stadt Bremen – für die Zeitperiode 2021 – 2050, im Vergleich zu dem Zeitraum 1971 – 2000 – die nachfolgend zusammengefassten Veränderungen (Tab.7, Abb.5, Abb.6).

Tab.7 Zusammenfassung der Veränderungen ausgesuchter Klimaparameter für Bremen (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]	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
Mittlerer Niederschlag, Winter [°C]	UNVERÄNDERT
Mittlerer Niederschlag, Frühling [°C]	UNVERÄNDERT bis ZUNAHME
Mittlerer Niederschlag, Sommer [°C]	UNVERÄNDERT
Mittlerer Niederschlag, Herbst [°C]	UNVERÄNDERT bis ZUNAHME
Anzahl Starkregenereignisse [#a]	UNVERÄNDERT
Anzahl Trockenperioden [#a]	ABNAHME bis ZUNAHME
Dauer längste Trockenperiode [d]	ABNAHME bis ZUNAHME
Vegetationsperiode, Start [d]	UNVERÄNDERT bis FRÜHER
Vegetationsperiode, mittlere Länge [m/s]	UNVERÄNDERT bis ZUNAHME
Mittlere Windstärke [d]	UNVERÄNDERT

Generell ist für Bremen davon auszugehen, dass sich Klimaparameter moderat verändern werden. So zeigt sich für die Temperaturentwicklung eine deutliche Zunahme der mittleren Jahrestemperatur. Dieser Anstieg ist in allen Jahreszeiten, jedoch vor allem im Herbst möglich. Auch bei der Anzahl der Sommer- und Hitzetage ist eine ansteigende Tendenz möglich, so dass dem Themenkomplex „Hitze in der Stadt und mögliche Anpassungsmaßnahmen“ in zukünftigen Projekten von Beginn an eine zentrale Rolle zukommen sollte.

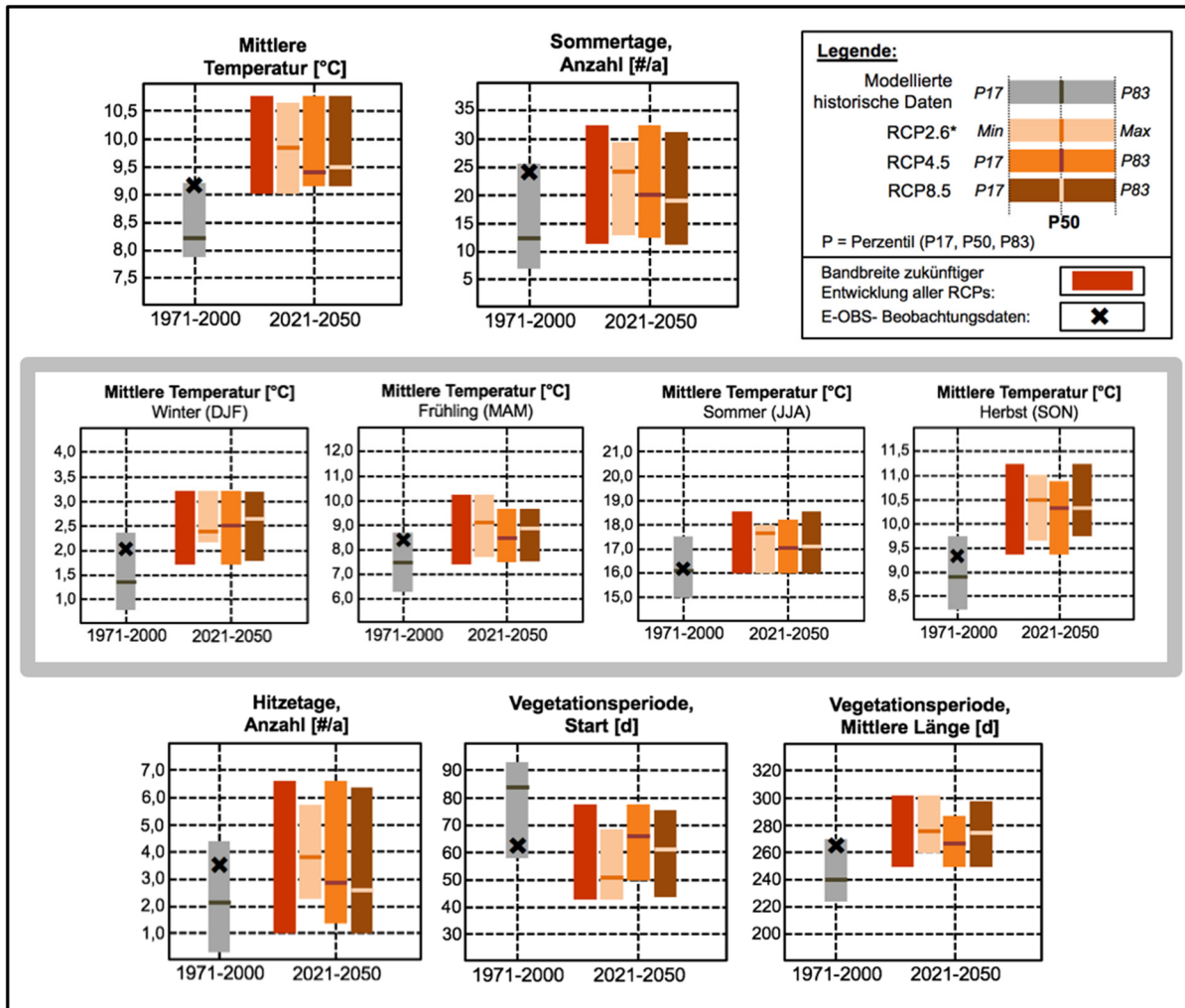


Abb.5 Temperatur und Vegetationsperiode – Gegenüberstellung der EU-COR-Ensemble-Set Ergebnisse für die Zeiträume 1971 – 2000 und 2021 – 2050 (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)

Demgegenüber zeigen die Modellergebnisse geringe Veränderungen bei den mittleren Niederschlagsmengen und der Anzahl der Starkregenereignisse auf. Der Trend der Veränderungen bei der Dauer und Anzahl von Trockenperioden ist jedoch 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.

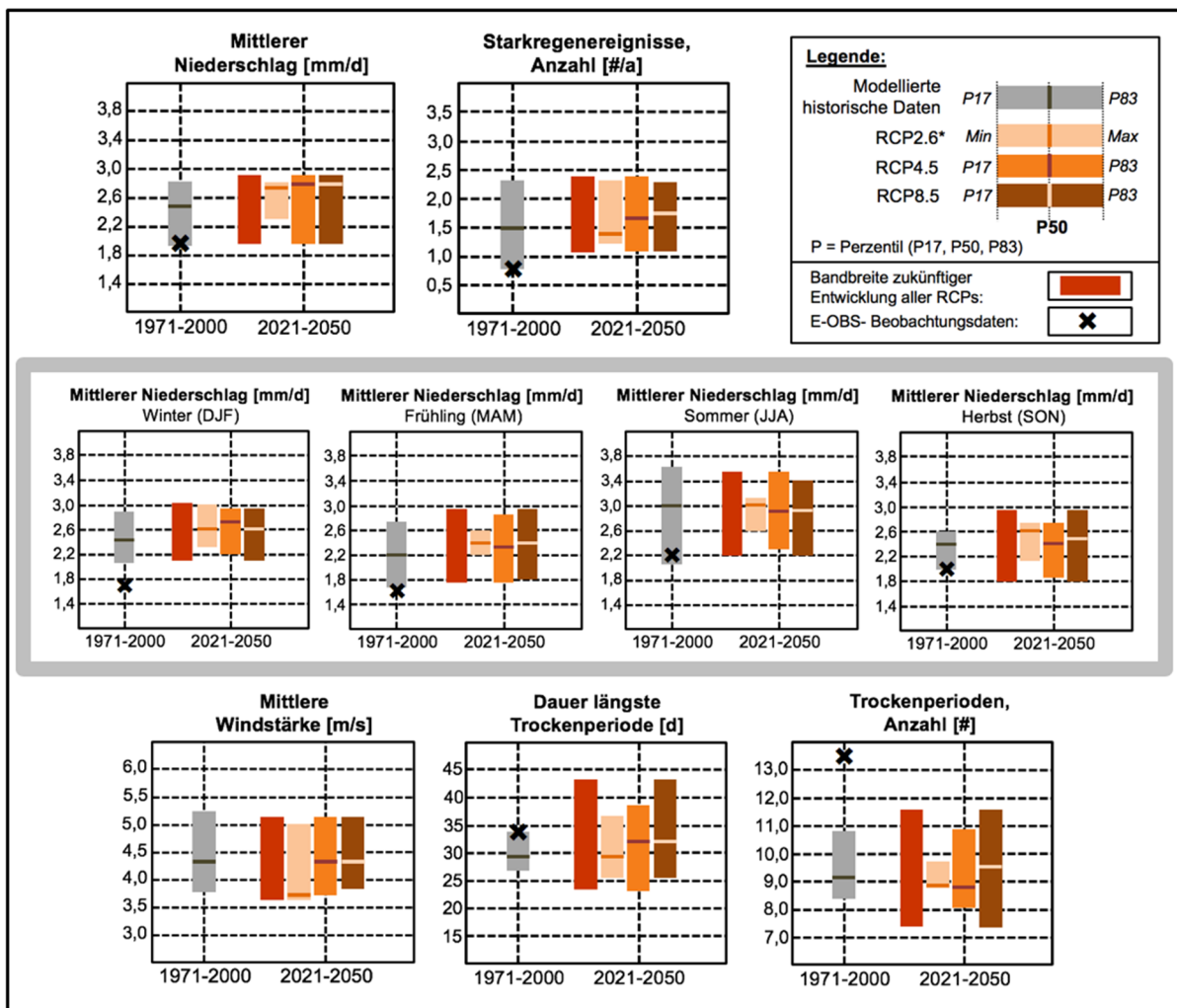


Abb.6 Niederschlag, Trockenheit und Windstärke – Gegenüberstellung der EU-COR-Ensemble-Set Ergebnisse für die Zeiträume 1971 – 2000 und 2021 – 2050 (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)

3.2. Hitze in der Stadt: Klimafolgen und Maßnahmen

Der Sommer 2018 gibt mit bisher 67 Sommertagen und 21 Hitzetagen für Bremen (Stand 21. August 2018, www.kachelmannwetter.com) einen Vorgeschmack darauf, welche Herausforderungen es zukünftig in der Stadt häufiger zu meistern gilt.

Da erwartet werden kann, dass die Wärmebelastung der Bürger durch Hitzewellen – besonders in dicht bebauten Stadtgebieten – enorm ansteigen wird, sind in der Stadt- und Raumplanung Ansätze notwendig, um der Wärmespeicherung in der Stadt entgegen zu wirken. Dies würde auch das zu einem besseren Raumklima beitragende Lüften von Räumen am Abend und frühen Morgen begünstigen.

So sollten bei der Planung und Genehmigung von Neubauten die gegenseitige Beschattung durch die Gebäude und die Einbindung grüner Fassaden mitgedacht und umgesetzt werden. Gleiches gilt für den konsequenten Erhalt oder die Neuschaffung von Grün- und Wasserflächen sowie von Kalt- und Frischluftschneisen, da auch diese Komponenten einen Beitrag zur Minderung der Wärmebelastung

liefern. Um die Funktionalität des Stadtgrüns auch zukünftig gewährleisten zu können, sollte bei Neuanpflanzungen beziehungsweise Neu- und Umgestaltungen von Parkflächen darauf geachtet werden, dass die neuen Flächen auch klimawandeltauglich sind (Brune et al. 2017, Bender et al. 2017a). Der Grund ist, dass auch Stadtbäume und andere Pflanzen unter der langen Trockenheit in Verbindung mit der Hitze zu leiden haben. Hierbei sind vor allem Jungbäume betroffen, deren Wurzeln noch nicht bis ins Grundwasser reichen und die daher häufiger gewässert werden müssen.

3.3. Lokaler Wasserhaushalt: Klimafolgen und Maßnahmen

Für alle wasserbezogenen Fragestellungen im Stadtgebiet 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 hinsichtlich der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen – und damit einhergehend Änderungen im Abflussverhalten und im Ausmaß urbaner Überflutungen – zu erwarten.

Höhere mittlere Temperaturen sowie der Trend zu einer gleichbleibenden beziehungsweise leicht steigenden Tendenz der jährlichen Anzahl der Sommertage werden zu höheren Verdunstungsraten führen. In Verbindung mit tendenziell gleichbleibenden Niederschlagsmengen, aber längeren Trockenperioden, wird sich der Jahrgang der Grundwasserneubildung verändern. Hinzu kommt eine Verlängerung der Vegetationsperiode um voraussichtlich über einen Monat, was ebenfalls einen Einfluss auf den lokalen Wasserbedarf haben wird. 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 Aussagen zur zeitlichen Entwicklung diesbezüglich sind anhand der vorliegenden Informationen derzeit noch nicht möglich.

Für den lokalen Wasserhaushalt spielen aber auch die Wasserstände der Nordsee und der Unterweser eine wichtige Rolle. Beobachtungen zeigen, dass der Meeresspiegel der Nordsee im Zeitraum von 1924 bis 2008 zwischen 1,6 und 1,8 mm pro Jahr angestiegen ist (Albrecht et al. 2011). Belastbare Aussagen über zukünftige Entwicklungen sind hier insbesondere als Folge von Unsicherheiten hinsichtlich zukünftiger Änderungen im Windklima noch nicht möglich (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 und differenziert ausgeprägt (Brasseur et al. 2017, Bender et al. 2017c). Bezogen auf den Gesamtabfluss zeigen einzelne Projektionen sowohl einen flächendeckenden Rückgang der Hochwasserereignisse (Hermann et al. 2013) als 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 sie sehr individuell auf verschiedene Einflussfaktoren wie Landnutzungsänderungen reagieren.

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., Groth, M. & Raub, T. (2018): Regionale Klimainformationen für Bremerhaven – Überprüfung, Erweiterung, Anwendung. – City Series 01, Climate Service Center Germany. Hamburg. 28 S.
- 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.
- Brune, M., Bender, S. & Groth, M. (2017): Gebäudebegrünung und Klimawandel – Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung. - GERICS-Report 30, 42 S.
- Brasseur, G., Jacob, D. & Schuck-Zöller, S. (2017) [Hrsg.]: Klimawandel in Deutschland - Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven, 348 S.
- DWD (2016): Nationaler Klimareport 2016, 2. Korr. Auflage, 44 S.
- DWD & SUBV (2018): Klimaanpassungsstrategie Bremen. Bremerhaven. – Begleitstudie Wetter und Klima im Land Bremen, 65 S., (Hrsg.: Deutscher Wetterdienst & Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr (Bremen)).
- 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. & Wendland, F. (2013): Quantifizierung und Bewertung des innerjährlichen Abflussschehens und der Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt in Niedersachsen und Bremen. – Bericht an das Niedersächsisches 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., Moeseley, 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: 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).

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 erstellen.

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 für RCP8.5 für weite Teile Deutschlands erhöht (signifikant und robust), mit Ausnahme von Norddeutschland. Für 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 Ereignisse von 5% bis 25% für den Winter in Ostdeutschland, den nördlichen Teil Nordrhein-Westfalens und für Teile Südost-Bayerns.

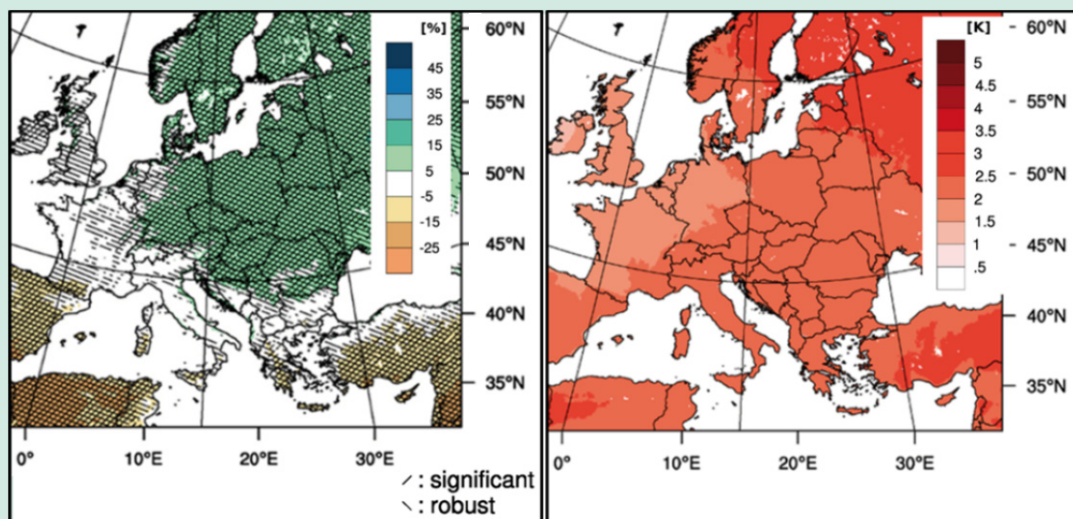


Abb. Projizierte Veränderungen des jährlichen mittleren Niederschlags (links) und der jährlichen mittleren Temperatur (rechts) für 2071 – 2100 (im Vergleich zu 1971 – 2000) für RCP4.5 (entnommen aus Jacob et al. 2014, S.567, verändert).

Anhang 2: Überblick der verwendeten Klimamodelle für das EU-COR-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 Bremen aus der Klimaanpassungsstrategie für Bremen und Bremerhaven (KASB-Ensemble) und dem EU-COR-Ensemble-Set für RCP8.5 (2012 – 2050).

	Beobachtung E-OBS- Datensatz (1971-2000)	Prüfdatensatz #1		Prüfdatensatz #2	
		Bandbreite KASB-Ensemble		Bandbreite EU-COR-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 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, Index „Starkregen-Tag“: KASB-Ensemble: Niederschlagsmenge ≥ 20 mm pro Tag (sehr starker Niederschlag); EU-COR-Ensemble-Set: Niederschlagsmenge ≥ 25 mm pro Tag (Extremniederschlag).



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