



Regionale Klimamodellierung

*Diana Rechid, Marcus Breil, Daniela Jacob, Christoph Kottmeier,
Juliane Petersen, Susanne Pfeifer und Claas Teichmann*

Inhaltsverzeichnis

- 4.1 Methoden der regionalen Klimamodellierung – 32**
 - 4.1.1 Dynamische Regionalisierung – 32
 - 4.1.2 Statistische Regionalisierung – 33
- 4.2 Bestandteile regionaler Klimamodelle – 34**
- 4.3 Modellvalidierung – 35**
- 4.4 Ensembles und Bandbreiten regionaler Klimaprojektionen – 36**
- 4.5 Projizierte Veränderungen von Temperatur und Niederschlag im 21. Jahrhundert²⁻³⁸**
- 4.6 Kurz gesagt – 41**
 - Literatur – 42

Regionale Klimamodelle liefern räumlich detaillierte Informationen zu den Ausprägungen globaler Klimaänderungen in einzelnen Regionen, welche vielfach als Basis für die Forschung zu Klimafolgen, Vulnerabilität und Anpassung dienen. Für regionale Klimaprojektionen werden die Ergebnisse globaler Klimaänderungssimulationen als Startbedingung sowie als Randbedingung des regionalen Modellgebiets verwendet. Globale Klimamodelle sind geeignet, natürliche und menschenbeeinflusste Änderungen des Klimas in Jahrzehnten bis Jahrhunderten abzubilden. Dazu gehören auch die Wechselwirkungen innerhalb und zwischen den Komponenten des Klimasystems: der Atmosphäre, dem Wasser und Eis, der Vegetation und dem Boden (zur globalen Klimamodellierung ► Kap. 2). Die Ergebnisse globaler Klimamodelle können dann mittels regionaler Klimamodelle für kleinere Gebiete verfeinert (regionalisiert) werden. Mit den Ergebnissen lassen sich Anwendungsfragen, etwa aus der Wasserwirtschaft (► Kap. 10), oder z. B. Fragen nach extremen Wetterereignissen mit Relevanz für die Versicherungswirtschaft (► Kap. 24) und die Landwirtschaft (► Kap. 18) besser beantworten als mit den Ergebnissen globaler Modelle. Die Ergebnisse regionaler Modellrechnungen für die Vergangenheit lassen sich auch direkter mit Beobachtungen vergleichen. Im Folgenden werden die Ergebnisse solcher Modellrechnungen im Vergleich mit Beobachtungen und für zukünftige Zeiträume dieses Jahrhunderts dargestellt. Die eher methodischen Aspekte (► Abschn. 4.1) können von Leserinnen und Lesern mit vorrangig allgemeinem Interesse am Klimawandel übergangen werden.

4.1 Methoden der regionalen Klimamodellierung

Es werden dynamische regionale Klimamodelle und statistische Regionalisierungsverfahren unterschieden. Mit beiden Methoden können die räumlich gröber aufgelösten Informationen globaler Klimasimulationen regional höher aufgelöst dargestellt werden.

Die dynamische Regionalisierung erfolgt mit dynamischen regionalen Klimamodellen wie *COSMO model in CLimate Mode* (COSMO-CLM; Rockel et al. 2008; Berg et al. 2013), ICON-CLM (Pham et al., 2021), REMO (Jacob und Podzun 1997; Jacob et al. 2012), WRF-CLIM (Skamarock et al. 2008) oder RegCM (Giorgi et al. 2012). Mithilfe dieser Modelle können unterschiedliche globale Klimasimulationen, die mit verschiedenen globalen Klimamodellen und für unterschiedliche Emissionsszenarien erstellt wurden, regional verfeinert werden. In der Vergangenheit wurden zahlreiche globale Klimasimulationen für Europa und Deutschland dynamisch regionalisiert.

Dies umfasst zum einen Klimaprojektionen (Simulationen des zukünftigen Klimas für unterschiedliche Emissionsszenarien) bis ins Jahr 2100 in einer räumlichen Auflösung von ca. 12,5 km (EURO-CORDEX; Jacob et al. 2020), aber auch dekadische Klimavorhersagen in einer räumlichen Auflösung von 25 km (Feldmann et al. 2019; Reyers et al. 2019). Dekadische Klimavorhersagen versuchen, für das kommende Jahrzehnt klimatische Tendenzen über längere Zeiträume (z. B. Vierjahresmittel) abzuschätzen und als Abweichungen von einem Normalzustand darzustellen. Aufgrund technologischer Fortschritte im Bereich der Hochleistungsrechner werden in den letzten Jahren auch vermehrt Klimasimulationen in räumlichen Auflösungen von 3 km bis 1 km durchgeführt (z. B. Prein et al. 2015; Coppola et al. 2019; Purr et al. 2021). Einen Überblick zur historischen Entwicklung regionaler Klimamodelle hin zu regionalen Erdsystemmodellen gibt Giorgi (2019). Die Bedeutung hochaufgelöster Klimainformationen als Grundlage zur Bereitstellung von physikalisch robusten Klimainformationen für gesellschaftliche Entscheidungsträger wird u. a. in Gutowski et al. (2020) herausgestellt. Darin werden wissenschaftliche Fragen aufgezeigt, deren Beantwortung einen verstärkten Einsatz regionaler Klimamodelle erfordert.

Bei der statistischen oder statistisch-dynamischen Regionalisierung kommen unterschiedlichste Ansätze zum Einsatz (Maraun und Widmann 2017; Gutiérrez et al. 2018), wie beispielsweise die statistischen Modelle WETTREG (Kreienkamp et al. 2013), STARS (Gerstengarbe et al. 2013) und EPISODES (Kreienkamp et al. 2019). Da diese Methoden im Vergleich zur dynamischen Regionalisierung einen geringeren Rechenaufwand bedeuten, sind sie sehr gut dazu geeignet, große Ensembles von Globalmodellen zu regionalisieren.

4.1.1 Dynamische Regionalisierung

Die Modelle zur dynamischen Regionalisierung berechnen Klimaänderungen in einem dreidimensionalen Ausschnitt der Atmosphäre – nur mit höherer räumlicher Auflösung als die Globalmodelle. Hierbei wird auf einem Gitter das zugrundeliegende Gleichungssystem numerisch gelöst. Die Gleichungen repräsentieren die Erhaltungssätze für Energie, Impuls und Masse von Luft sowie Wasser und Wasserdampf. Ein solches dynamisches Regionalmodell wird mit den Ergebnissen eines globalen Klimamodells initialisiert und an seinen Modellgebietsgrenzen angetrieben. Mit diesem Verfahren lassen sich aus globalen Klimamodelltdaten regionale Klimabedingungen hochaufgelöst und physikalisch konsistent darstellen. Dafür werden zunächst die bekannten Klimazustände der Vergangenheit

nachsimuliert, um zu überprüfen, wie gut die regionalisierten Daten mit Beobachtungsdaten übereinstimmen. Zu diesem Zweck werden regionale Klimamodelle mit globalen Reanalysedaten des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMWF) angetrieben. Anschließend können mit dem so validierten Klimamodell durch Antrieb mit Ergebnissen globaler Klimamodelle regionale Klimasimulationen für die Vergangenheit und die Zukunft erstellt und daraus regionale Klimaänderungssignale abgeleitet werden.

Aufgrund der höheren räumlichen Auflösung der regionalen Klimamodelle lassen sich Eigenschaften der Erdoberfläche wie Orografie, Landbedeckung und Küstenlinien besser abbilden als mit Globalmodellen. Atmosphärische Prozesse, die von diesen Eigenschaften der Erdoberfläche beeinflusst werden, wie Land-Atmosphären-Wechselwirkungen, Land-See-Wind-Systeme und Gebirgsüberströmungen, aber auch die Wolken- und Niederschlagsbildung können dadurch besser beschrieben werden.

Da der räumlichen Auflösung von Klimainformationen eine besondere Bedeutung bei vielen ökologischen und sozioökonomischen Fragestellungen zukommt, werden immer häufiger sehr hochaufgelöste (< 4 km) Klimasimulationen durchgeführt (Prein et al. 2015). Bei diesen räumlichen Auflösungen können Konvektionsprozesse explizit in den Klimamodellen aufgelöst werden, wodurch sich vor allem konvektive Niederschlagsbildung und Extremniederschläge (Fosser et al. 2015) besser erfassen und abbilden lassen. Solche hochaufgelösten Simulationen schließen dadurch die Lücke zwischen grob aufgelösten Klimamodellinformationen und anwendungsorientierten Impactmodellen (z. B. Warszawski et al. 2014). Um im Rahmen dieser hochaufgelösten Klimasimulationen großen Auflösungssprüngen an den Rändern und damit verbundenen numerischen Problemen vorzubeugen, wird durch ein sogenanntes Nesting die Auflösung schrittweise von Simulation zu Simulation erhöht. Um zukünftig in der Lage zu sein, konvektionsauflösende Simulationen auf der Klimazeitskala von mehreren Dekaden durchzuführen, sind weiterhin viele Herausforderungen zu adressieren, unter anderem die Grenzen der verfügbaren Rechenkapazitäten und der damit notwendigen großen Steigerung der Effizienz von Modellcodes sowie des verfügbaren Speicherplatzes für die sprunghaft ansteigenden Datenmengen (Schär et al. 2020).

Selbst bei hochaufgelösten regionalen Klimasimulationen können nicht alle Teilprozesse des Klimasystems explizit simuliert werden. Klimamodelle stellen stets ein vereinfachtes Abbild des realen Klimasystems dar, das mit gewissen Unsicherheiten verbunden ist. Um diese Modellunsicherheiten berücksichtigen und abschätzen zu können, werden Multimodellensembles verwendet. Dabei werden durch

eine Kombination verschiedener globaler und regionaler Klimamodelle, Simulationen für den gleichen Zeitraum und die gleiche Modellregion durchgeführt (► Abschn. 4.4). Im Gegensatz zu globalen Modellensembles kann mit solchen regionalen Multimodellansätzen die Variabilität physikalischer Prozesse auf der regionalen Skala besser abgebildet werden¹. Für die Abschätzung der zukünftigen Klimaentwicklung spielt neben der Modellunsicherheit die Unsicherheit über die Entwicklung zukünftiger Treibhausgasemissionen die zentrale Rolle. Diese Unsicherheit wird durch Ensembles von Klimasimulationen mit unterschiedlichen Emissionsszenarien (RCPs und SSPs) berücksichtigt (► Kap. 3).

4.1.2 Statistische Regionalisierung

Mit statistischer Regionalisierung lassen sich ebenfalls Simulationsdaten globaler Klimamodelle räumlich verfeinern. Für Deutschland wurden regionale Klimaprojektionen vor allem mit den statistischen Modellen WETTREG (WETTERlagen-basierte REGIONalisierung; Kreienkamp et al. 2013), STARS (*STATistical Regional model*; Gerstengarbe et al. 2013) und EPISODEs (Kreienkamp et al. 2019) erstellt. Dabei untersucht man die Zusammenhänge zwischen den großräumigen Wetterlagen oder globalen Zirkulationsmustern und den lokalen Klimadaten. WETTREG unterscheidet zehn Wetterlagen für die Temperatur und acht Wetterlagen für Feuchte im Frühling, Sommer, Herbst und Winter. Über eine Wetterlagenklassifikation werden die gefundenen Zusammenhänge auf die Projektionen mit einem globalen Klimamodell übertragen. Alternativ geben die Projektionsläufe dynamischer Klimamodelle Auskunft darüber, wie häufig ein Zirkulationsmuster auftritt. Bei STARS werden beobachtete oder modellierte Zeitreihen von Klimavariablen umsortiert, um vorgegebene lineare Trends zu berücksichtigen. EPISODEs ist wiederum eine statistische Regionalisierungsmethode, bei der die Phasenbeziehungen zu den großskaligen Prozessen in Globalmodellen durch eine tageweise Regionalisierung der globalen Simulationsergebnisse erhalten bleiben.

Es entstehen synthetische vergleichbare Zeitreihen meteorologischer Größen an den Orten der Messstationen. Diese Zeitreihen basieren auf den von dynamischen Klimamodellen projizierten Änderungen in der großräumigen Zirkulation. Da statistische Modelle einen vergleichsweise geringen Rechenaufwand erfordern, können sie auch für viele Regionalisierungen und regionale Ensembleansätze genutzt werden.

1 CORDEX White Paper. ► <https://cordex.org/publications/white-paper>

Strahlung absorbiert, transformiert und als turbulente Energieflüsse (sensible und latente Wärmeflüsse) wieder in die Atmosphäre abgegeben. Die kleinskaligen Eigenschaften des Bodens und der Vegetation steuern somit den atmosphärischen Energieeintrag und sind von zentraler Bedeutung für die Dynamik des regionalen Klimasystems.

In regionalen Klimamodellen werden diese Wechselwirkungen zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre in Land-Atmosphären-Modellen parametrisiert. Beispiele für solche Modelle sind TERRA (Heise et al. 2003), VEG3D (Breil und Schädler 2017), CLM (Oleson et al. 2013), NoahMP (Niu et al. 2011) und REMO-iMOVE (Wilhelm et al. 2014). Die Modelle simulieren dabei den Wärme- und Wasserfluss im Boden und der Vegetation und deren Kopplung zur Atmosphäre. Dabei unterscheiden die Modelle verschiedene Boden- und Landnutzungsarten, denen wiederum unterschiedliche jahreszeitabhängige physikalische Parameter zugeordnet und die in einigen Modellen in Abhängigkeit von den atmosphärischen Bedingungen dynamisch berechnet werden. Des Weiteren werden Schnee-, Gefrier- und Schmelzprozesse berücksichtigt. In modernen Land-Atmosphären-Modellen ist darüber hinaus die Modellierung der regionalen Kohlenstoffbilanz und damit auch die Abbildung der Wechselwirkung zwischen biogeochemischen und biophysikalischen Prozessen möglich (Oleson et al. 2013; Wilhelm et al. 2014).

Zukünftig sollte die menschliche Komponente durch regionale Erdsystemmodelle interaktiv einbezogen werden (z. B. Giorgi 2019). Bisher wurden anthropogene Antriebe z. B. durch Emissionen oder Landnutzungsänderungen basierend auf Szenarien extern vorgegeben. Der Mensch reagiert auf die dadurch verursachten Änderungen z. B. durch Anpassungs- und Vermeidungsmaßnahmen, die wiederum auf das Klimasystem zurückwirken. Die Modellierung solcher wechselseitigen Interaktionen ist eine äußerst schwierige Aufgabe, da verschiedene sozioökonomische und umweltbedingte Faktoren dazu beitragen, die menschlichen Reaktionen zu bestimmen. Regionale Erdsystemmodelle bieten dafür einen besonders guten Rahmen, für die noch erheblicher Entwicklungsbedarf besteht.

4.3 Modellvalidierung

Um die Güte eines Modells beurteilen und es verbessern zu können, werden zur Validierung Modellergebnisse mit Beobachtungen verglichen. Hierzu wird das Regionalmodell mit globalen Reanalyse-daten angetrieben. Durch die Randwerte von Temperatur, Druck, Feuchte und Strömungsgeschwindigkeit aus einem globalen Reanalysedatensatz wird

das globale Klima berücksichtigt. Reanalysedaten werden mit Modellen der globalen Zirkulation unter Einbezug von täglichen Beobachtungen erstellt und sind damit nahe am beobachteten Klima. Sie bilden somit bestmöglich und physikalisch konsistent den Verlauf des vergangenen Klimas ab und bieten daher optimale Randbedingungen für die Validierung. Ein so angetriebenes regionales Klimamodell bildet die Prozesse auf regionaler Skala gut ab und simuliert dabei die Wetterlagen in ihrer zeitlichen Abfolge.

Zur Validierung des Regionalmodells werden beobachtete meteorologische Größen wie Temperatur und Niederschlag, für die es ein großflächiges, dichtes Messnetz gibt, mit den Modellergebnissen verglichen. Typischerweise werden in klimatologisch relevanten Zeiträumen von 30 Jahren Vergleiche durchgeführt. In diesen Simulationen, angetrieben mit Reanalysedaten, können auch einzelne Jahre und Jahreszeiten großräumig mit Beobachtungen in Bezug gesetzt werden.

Das validierte Regionalmodell wird unter Vorgabe von Randwerten eines globalen Klimamodells eingesetzt, um das global simulierte Klima im Referenzzeitraum (z. B. 1971–2000) zu regionalisieren. Hier können einzelne Jahre nicht mit beobachteten Jahren in Beziehung gesetzt werden, da ein globales Klimamodell eine eigene zeitliche Abfolge von Wetterlagen und jährlichen Schwankungen simuliert.

Vergleicht man jedoch das Klima über längere Zeiträume von mindestens 30 Jahren, ist die Erwartung, dass das simulierte Klima dem beobachteten entspricht, wobei Schwankungen, die sich über mehrere 10-Jahres-Perioden erstrecken (sogenannte multi-dekadische Schwankungen), auch bei 30-Jahres-Mitteln zu Unterschieden führen können.

Manche Impaktmodelle reagieren sehr empfindlich auf systematische Abweichungen zwischen dem simulierten und dem tatsächlich beobachteten Klima, auf dessen Basis sie kalibriert und validiert werden. Der Antrieb mit systematisch von Beobachtungsdaten abweichenden Klimamodell-daten kann zu starken Abweichungen und unrealistischen Ergebnissen der Impaktmodellierung führen. Eine mögliche Lösung ist die Erzeugung *bias*-angepasster Klimamodell-daten (Maraun und Widmann 2017). Dabei geht es um einzelne, für das entsprechende Wirkmodell relevante Klimagrößen. Die Anpassungen werden über den gemeinsamen Zeitraum kalibriert und dann auf die Klimaläufe für die Zukunft übertragen. Die Qualität der *Bias*-Anpassung hängt von der Qualität des eingehenden Beobachtungsdatensatzes und der *Bias*-Anpassungsmethode und auch der Länge des zur Kalibrierung verwendeten Zeitraums ab. Generell sind die Methoden von *Bias*-Anpassungen und ihre Auswirkung in Bezug auf die Eingaben für Impaktmodelle Gegenstand aktueller Forschung (z. B. Gobiet et al. 2015; Galmarini et al. 2019).

Eine gute Übersicht zu verschiedenen Evaluierungsmethoden und der Quantifizierung von Ungenauigkeiten regionaler Klima- und Klimaänderungssimulationen in Mitteleuropa findet sich z. B. in Keuler (2006; Jacob et al. 2012; Gutiérrez JM et al. 2018). Neben den nationalen Evaluierungsaktivitäten wurden zahlreiche international koordinierte Modellevaluierungen auf europäischer und auch globaler Ebene durchgeführt. Eine Evaluierung auf europäischer und globaler Ebene hat den Vorteil, dass das regionale Klimamodell unter verschiedenen Klimabedingungen mit dem beobachteten Klima verglichen werden kann und somit die numerische Darstellung der physikalischen Prozesse einer breiteren Überprüfung unterzogen wird. Außerdem können durch die Evaluierung innerhalb einer großen Modellierergemeinschaft verschiedene Aspekte und Indikatoren untersucht werden, da viele Wissenschaftler aus unterschiedlichen Modelliergruppen dasselbe regionale Ensemble evaluieren.

Diese Evaluierung auf internationaler Ebene erfolgte z. B. in den europäischen Projekten PRUDENCE (Christensen et al. 2002) und ENSEMBLES (Hewitt und Griggs 2004) sowie innerhalb der EURO-CORDEX Community (Jacob et al. 2019). Die Evaluierung der Simulationen mit den Regionalmodellen RegCM, REMO und COSMO-CLM im Rahmen der neuen CORDEX-CORE-Initiative für unterschiedliche Regionen weltweit mit einer räumlichen Auflösung von 25 km zeigt die Robustheit und Anwendbarkeit der Regionalmodelle unter verschiedensten klimatischen Bedingungen für Klimaänderungs- und Wirkstudien (Remedio et al. 2019; Ciarlo et al. 2021; Sørland et al. 2021). Für Europa wurden Klimasimulationen mit ca. 12,5 km Auflösung im Rahmen der EURO-CORDEX-Initiative erstellt (Jacob et al. 2014). In der Studie von Vautard et al. (2013) wird untersucht, wie gut Hitzewellen von den EURO-CORDEX-Modellen simuliert werden. In der Studie von Kotlarski et al. (2014) wird die zu der Zeit erreichbare Genauigkeit regionaler Klimasimulationen für Europa quantifiziert.

Bei der Modellvalidierung wird außerdem die Unsicherheit berücksichtigt, die den Beobachtungsdaten anhaftet, indem verschiedene Beobachtungsdatensätze für dieselbe Region betrachtet werden. Die Unterschiede verschiedener Beobachtungsdatensätze ist in der Regel klein im Vergleich zur Bandbreite der Modellsimulationen, kann jedoch für bestimmte Kennwerte in manchen Regionen vergleichsweise groß werden (Kotlarski et al. 2019).

Der Prozess der breiten Evaluierung ermöglicht es außerdem, den Mehrwert der regionalen räumlich hochaufgelösten Simulationen zu analysieren. Einen klaren Mehrwert zeigen z. B. Prein et al. (2016) für mittlere und extreme Niederschläge für Simulationen mit 50 km und 12,5 km Auflösung. Die höher aufgelösten Simulationen liefern auch bei einem Vergleich

auf dem 50 km Gitter eine bessere Darstellung der Niederschläge, vor allem in orografisch stark strukturierten Gebieten wie der Alpenregion.

Ein ähnliches Ergebnis zeigen auch Ciarlo et al. (2021) auf globaler Ebene. Die Studie belegt eine verbesserte Simulation des täglichen Niederschlags in den meisten der untersuchten Regionen gegenüber den antreibenden Globalmodellen für Simulationen der CORDEX-CORE-Initiative und der EURO-CORDEX-Simulationen. Diese Verbesserung wird besonders für sehr hohe Niederschlagsmengen und in geografisch stark strukturierten Gegenden ersichtlich.

In einer der ersten CORDEX-Flagschiff-Pilotstudien (FPS) werden seit 2016 „Konvektive Phänomene mit hoher Auflösung über Europa und dem Mittelmeerraum“ (FPS-CONV) mit einem Multimodellensemble untersucht. Erste Tests auf der konvektionsauflösenden Skala um die 3 km zeigen eine realitätsgetreuere Reproduktion extremer Niederschlagsereignisse in Bezug auf die Niederschlagsintensität und die räumliche Verteilung (Coppola et al. 2020). Die Auswertung der mit ERA-Interim angetriebenen zehnjährigen Simulationen im größeren Alpenraum zeigen im Vergleich zu Simulationen auf der 12,5 km-Skala gegenüber Beobachtungsdaten realistischere Abbildungen der Niederschläge, insbesondere von Starkniederschlägen sowie täglichen als auch stündlichen Niederschlagsintensitäten (Ban et al. 2021), was einen klaren Mehrwert konvektionsauflösender regionaler Klimamodellsimulationen aufzeigt.

Im Zuge solcher Projekte werden die Modelle weiterentwickelt und stellen das gegenwärtige Klima immer besser und detailreicher dar. Dadurch steigt auch das Vertrauen in die mit den Modellen errechneten Klimaprojektionen für mögliche zukünftige Klimaentwicklungen (z. B. Sørland et al. 2018). Außerdem wird mittels höherer Modellauflösungen eine neue Qualität erreicht, was die Abbildung der zeitlichen und räumlichen Genauigkeit des regionalen Klimas betrifft. So wurden auf der konvektionsauflösenden Skala zehnjährige Zeitscheiben unter zukünftigen Klimabedingungen simuliert, die im Vergleich zu gröber aufgelösten Simulationen stärker ausgeprägte Änderungen von Niederschlagsextremen projizieren (Pitchelli et al. 2021). Langendijk et al. (2021) zeigen einen deutlichen Mehrwert konvektionsauflösender Simulationen zur Abbildung von Stadt-Land-Kontrasten und bodennahen Feuchtigkeitsextremen auf.

4.4 Ensembles und Bandbreiten regionaler Klimaprojektionen

Zunehmend werden mit regionalen Klimamodellen international koordinierte Multimodellensembles erstellt, um die Unsicherheiten der Modellierung zu

berücksichtigen und die Bandbreiten möglicher regionaler Klimaentwicklungen systematisch abzubilden (z. B. Déqué et al. 2007; Jacob et al. 2012; Moseley et al. 2012; Jacob et al. 2014, Rechid et al. 2014, Giorgi und Gutowski 2016). Dazu werden mehrere regionale Klimamodelle mit Ergebnissen der Simulationen mehrerer globaler Klimamodelle unter jeweils unterschiedlichen Emissionsszenarien angetrieben und so regionale Klimaprojektionen erstellt. Im Rahmen der internationalen Initiative CORDEX (Giorgi et al. 2009; Giorgi und Gutowski 2016), werden koordinierte regionale Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert für Regionen weltweit erstellt. Die CORDEX-Experimente sind Teil des Weltklimaforschungsprogramms (WCRP), und die Ergebnisse dieser Simulationen werden derzeit auch im sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen verwendet (IPCC 2021).

Die neue Initiative CORDEX-CORE hat zum Ziel, für alle von Menschen bewohnten Kontinente eine vergleichsweise hochaufgelöste und einheitliche Basis an Klimainformationen zu schaffen. Dazu wurden Simulationen für ein Szenario mit starken Treibhausgasemissionen (RCP8.5) und für ein Szenario mit umfassenden Klimaschutzmaßnahmen (RCP2.6) durchgeführt. Für jedes Szenario wurden drei globale Klimasimulationen mit hoher, mittlerer und niedriger Klimasensitivität ausgewählt und mit jeweils zwei regionalen Klimamodellen für den Zeitraum 1970 bis 2100 in einer horizontalen Auflösung von $0,22^\circ$ (~ 25 km) für alle Kontinente weltweit regionalisiert (Remedio et al. 2019; Teichmann et al. 2020; Ciarlo et al. 2021). Die CORDEX-CORE-Daten werden frei über die Earth System Grid Federation (ESGF) zur Verfügung gestellt. Sie bilden eine wichtige Basis für Untersuchungen zu regionalen Klimaänderungen weltweit und sind Grundlage für Analysen zu Vulnerabilität, Klimafolgen und Anpassung.

Verschiedene Klimamodelle reagieren unterschiedlich empfindlich auf die veränderten Treibhausgaskonzentrationen. Diese methodischen Unsicherheiten beruhen auf strukturellen Merkmalen der Modelle, die sich beispielsweise in numerischen Lösungsmethoden, physikalischen Parametrisierungen und der Repräsentierung und Kopplung der Teilsysteme und Prozesse des Klimasystems unterscheiden. Das dadurch abgebildete Spektrum möglicher globaler Klimaänderungen wird auch in die Simulationen der regionalen Klimamodelle übernommen. Es bestimmt einen großen Anteil der simulierten Bandbreiten regionaler Klimaentwicklungen. Die Unterschiede durch verschiedene physikalische Parametrisierungen und Konfigurationen der Regionalmodelle erweitern das Spektrum gegebenenfalls weiter. So spielt es z. B. eine Rolle, wie die regionale in die globale Simulation eingebettet ist, wie groß der simulierte Gebietsausschnitt ist und

wo die geografischen Grenzen dieses räumlichen Ausschnittes liegen.

In regionalen Klimaprojektionen werden die in den Globalmodellen abgebildeten großskaligen Klimaschwankungen durch Regionalisierung mehrerer globaler Modellsimulationen erfasst. Die aus den globalen Simulationen übernommene interne Klimavariabilität prägt sich regional unterschiedlich aus. Auch im regionalen Klimasystem gibt es nichtlineare Prozesse, die in Regionalmodellen zusätzlich die interne Variabilität beeinflussen. Es wurden verschiedene Methoden verwendet, um den Anteil der internen Klimavariabilität, der allein von den Regionalmodellen simuliert wird, abzuschätzen (Alexandru et al. 2007; Lucas-Picher et al. 2008; Nikiéma und Laprise 2010; Sieck 2013). Diese zusätzliche Beeinflussung der internen Variabilität in Regionalmodellen spielt allerdings auf der Zeitskala von mehreren Jahrzehnten im Vergleich zu der in Globalmodellen abgebildeten großskaligen Variabilität im Klimasystem nur eine untergeordnete Rolle.

Insbesondere die Erforschung von Wetter- und Klimaextremen unter verschiedenen globalen Erwärmungsraten erfordert umfassende Ensemble-simulationen in zugleich räumlich hoher Auflösung. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Extremereignis durch den globalen Klimawandel verursacht wird, wurde im Rahmen der *Weather@Home*-Initiative ein Modellieransatz mittels umfassender Global-/Regionalmodellensembles entwickelt (Massey et al. 2015; Guillod et al. 2017). Mit dem kanadischen regionalen Klimamodell (CRCM5) wurde ein 50-Member-Ensemble des kanadischen Erdsystemmodells CanESM2 dynamisch für Nordamerika und Europa regionalisiert (Leduc et al. 2019). Die Simulationen liegen für den Zeitraum 1950 bis 2099 für das RCP8.5 vor und ermöglichen die Analyse der internen Klimavariabilität auf einer hohen räumlichen Auflösung von $12,5$ km z. B. auch im Vergleich zu Simulationen der EURO-CORDEX-Initiative (z. B. von Trentini et al. 2019). Eine regionale und sektorspezifische Analyse von unterschiedlichen Klimafolgen bei $1,5^\circ\text{C}$ und 2°C globaler Erwärmung wurde im Rahmen der internationalen Initiative *Half a degree Additional warming, Prognosis and Projected Impacts* (HAPPI) als Beitrag zum IPCC Sonderbericht über $1,5^\circ\text{C}$ globale Erwärmung (IPCC 2018) durchgeführt. Im HAPPI-De-Projekt wurde dazu eine neuartige Ensemblemethode entwickelt (Schleussner et al., 2018; Sieck et al. 2020). Mit dem regionalen Klimamodell REMO wurde ein Multi-Member Ensemble von 100 Simulationen pro Dekade für heutige, $1,5^\circ\text{C}$ und 2°C globale Erwärmungsraten erstellt, angetrieben von HAPPI-Simulationen der globalen Erdsystemmodelle MPI-ESM und NorESM. Das große Ensemble verbessert im Vergleich zu anderen Simulationsmethoden erheblich das Verhältnis von Signalen zum „Rauschen“ in Bezug auf

die interne Klimavariabilität, was für die Erkennung signifikanter Änderungen in Extremen sehr wichtig ist.

Neben den in globalen Modellen berücksichtigten Emissionsszenarien (Moss et al. 2010; Riahi 2017) und großskaligen Landnutzungsänderungen (Hurtt et al. 2011; Hurtt et al. 2020) können in regionalen Modellen zudem regionale und lokale Änderungen der Landnutzung und Landbewirtschaftung implementiert werden. Im Rahmen der CORDEX-Flagship-Pilotstudie *Land Use and Climate Across Scales* (LUCAS) werden erstmals mittels eines Multimodellansatzes koordinierte regionale Klimamodellexperimente mit Landnutzungsänderungen für Europa durchgeführt (Rechid et al. 2017). Die lokalen und regionalen biophysikalischen Auswirkungen extremer Landnutzungsänderungen in Europa werden basierend auf dem LUCAS-Ensemble analysiert. Die Ergebnisse zeigen zum Teil Übereinstimmungen, zum Teil große Unterschiede zwischen den Modellen (z. B. Davin et al. 2020; Breil et al. 2020). Das bedeutet, dass die Ergebnisse zu klimatischen Auswirkungen von Landnutzungsänderungen einzelner Modelle im Vergleich zu Ergebnissen weiterer Modelle zu betrachten sind, und unterstreicht die Bedeutung von Ensemblesimulationen zur Berücksichtigung der Modellunsicherheiten.

4.5 Projizierte Veränderungen von Temperatur und Niederschlag im 21. Jahrhundert²

Für Deutschland stehen zahlreiche regionale Klimasimulationen auf relativ hochaufgelösten Gittern mit Kantenlängen von etwa 25 km bis zu 3 km zur Verfügung. Viele der älteren Simulationen basieren noch auf den globalen SRES-Emissionsszenarien, vielfach dem A1B Szenario. Die Regionalisierungen der Projektionen des globalen Modellsystems ECHAM5-MPIOM mit dynamischen und statistischen Methoden (z. B. Spekat et al. 2007; Hollweg et al. 2008; Jacob et al. 2008; Orlovsky et al. 2008; Jacob et al. 2012; Kreienkamp et al. 2011; Wagner et al. 2013) dienen damals in vielen deutschen Projekten zur Klimafolgenforschung wie in KLIMZUG, KLIFF, KLIWA und KLIWAS als Grundlage.

Seit 2014 stehen mit der Initiative EURO-CORDEX hochaufgelöste Klimaänderungssimulationen für ganz Europa auf Rastern mit Kantenlängen von 12,5 km zur Verfügung. Sie regionalisieren in europa-weit koordinierten Modellexperimenten globale Klimasimulationen des CMIP5 in Multi-Global-/Regionalmodellensembles für verschiedene RCPs (Jacob et al. 2014). In den folgenden Jahren wurden diese durch Si-

mulationen im Projekt ReKliEs-DE (Bülow et al. 2019) ergänzt, welches für die Szenarien RCP8.5 und RCP2.6 auf dem EURO-CORDEX-Modellgebiet zusätzliche Regionalisierungen mit dynamischen Modellen bereitstellte. Für die Region Deutschland und nach Deutschland entwässernde Flusseinzugsgebiete wurden im Rahmen von ReKliEs-De auch Regionalisierungen mit den statistischen Modellen STARS und WETTREG erstellt (Hübener et al. 2017; Bülow et al. 2019).

Weitere dynamische Regionalisierungen auf dem EURO-CORDEX-Gebiet ergänzten im Rahmen des C3S³-Projektes PRINCIPLES das Ensemble der Simulationen, sodass nunmehr eine umfassende Datenbasis zur Analyse des zukünftigen Klimas zur Verfügung steht. Mit dem Episodes-Modell (Kreienkamp et al. 2019) stellt der DWD ein weiteres empirisch-statistisches Verfahren zur Verfügung, welches das Ensemble an Regionalisierungen auf dem EUR-11 Gitter ergänzt.

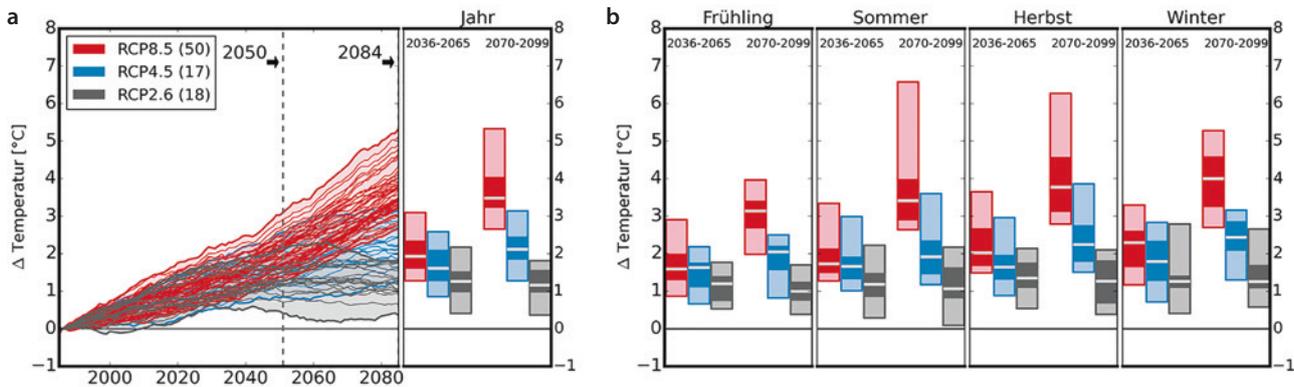
Im Folgenden werden wesentliche Ergebnisse, basierend auf 85 regionalen Klimasimulationen dynamischer Regionalmodelle der EURO-CORDEX-Initiative für die Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 vorgestellt. Dabei wurden die Klimaänderungen für alle Bundesländer sowie für Deutschland analysiert (Pfeifer et al. 2020a).

■ Abb. 4.2 zeigt für ein Ensemble von 85 regionalen Klimaprojektionen dynamischer Modelle den zeitlichen Verlauf der Änderungen der Jahresmitteltemperatur (links) sowie für die Mitte des 21. Jahrhunderts (2036–2065) und das Ende des 21. Jahrhunderts (2070–2099) jeweils die Verteilung des Ensembles mit Median, Minimum, Maximum, 20. und 80. Perzentil für das gesamte Jahr sowie die Jahreszeiten (Frühling: März, April, Mai; Sommer: Juni, Juli, August; Herbst: September, Oktober, November; Winter: Dezember, Januar, Februar) (rechts). Das Ensemble (Zusammensetzung s. Anhang des Buches) umfasst 50 Simulationen für RCP8.5, 17 Simulationen für RCP4.5 und 18 Simulationen für RCP2.6.

Im Gebietsmittel über Deutschland projizieren die dynamischen Regionalmodelle eine deutliche Temperaturzunahme, sowohl im Jahresmittel als auch in allen Jahreszeiten. Regional sind die mittleren Temperaturänderungen in Deutschland ähnlich. Es ergeben sich jedoch deutliche Unterschiede bei schwellwertbasierten Temperaturkennwerten wie z. B. Sommertagen, heißen Tagen und tropischen Nächten, insbesondere bei RCP8.5 und zum Ende des 21. Jahrhunderts. Aufgrund des generell höheren Temperaturniveaus im Sommer in den südlichen Regionen nehmen die jährlichen Sommertage, heißen Tage und tropischen Nächte im Süden Deutschlands stärker zu als im Norden (z. B. Pfeifer et al. 2020b, c). Im Verlauf des Jahrhunderts unterscheiden sich die für das RCP8.5-Szena-

² Liste der in diesem Abschnitt verwendeten Klimasimulationen ► „Klimasimulationen“ im Serviceteil des Buches

³ Copernicus Climate Change Service



■ **Abb. 4.2** a Zeitlicher Verlauf der projizierten Änderungen (im 30-jährigen gleitenden Mittel) der Jahresdurchschnittstemperatur in °C im Vergleich zur Referenzperiode von 1971–2000. Es ist jeweils die Mitte des 30-jährigen Zeitraums als Bezugspunkt in der Zeitreihendarstellung gewählt. Jede Linie zeigt die Ergebnisse einer Simulation des Ensembles. Änderungen zur Mitte des 21. Jahrhunderts und zum Ende des Jahrhunderts sind für die **a** jährlichen sowie die **b** saisonalen Änderungen in Form von Median (helle, waagerechte Linie), Minimum (untere Kante des Balkens), Maximum (obere Kante des Balkens), 20. und 80. Perzentil (untere und obere Grenze des dunklen Bereiches des Balkens) des Ensembles dargestellt. Farblich gekennzeichnet sind die unterschiedlichen RCP Szenarien: RCP8.5 rot, RCP4.5 blau, RCP2.6 grau

rio simulierten Temperaturen immer deutlicher von den Ergebnissen der RCP4.5- und RCP2.6-Szenarien. Das bedeutet, dass durch eine Verminderung der Treibhausgasemissionen und damit durch geringere Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre deutlich geringere Klimaänderungen zu erwarten sind. Ein Vergleich der statistischen und dynamischen Regionalisierungen ergab für die Temperaturkennwerte weitestgehend ähnliche Änderungssignale (Hübener et al. 2017).

Die mittleren Niederschlagsmengen schwanken erheblich von Jahr zu Jahr. Um auch für variable Größen, wie den Niederschlag valide Aussagen zu zukünftigen Änderungen treffen zu können, kann eine Analyse zur Robustheit der simulierten Änderungssignale z. B. nach Pfeifer et al. (2015) durchgeführt werden. Nach dieser Methode werden die Übereinstimmung der Modellergebnisse in der Richtung des Änderungssignals sowie die Signifikanz der Ergebnisse für jede Simulation untersucht und daraus eine Aussage zur Robustheit der projizierten Änderungen abgeleitet. Wenn zum Beispiel mindestens zwei Drittel der Simulationen eine Zunahme bzw. Abnahme und mindestens 50 % der Simulationen sogar eine signifikante Zunahme bzw. Abnahme zeigen, kann die Änderung als „robuste Zunahme bzw. Abnahme“ bezeichnet werden (nach Pfeifer et al. 2015, 2020a–c).

Gegen Ende des 21. Jahrhunderts zeigt sich für Deutschland insbesondere für RCP8.5 eine Zunahme des Jahresniederschlags. Saisonal steht einer leichten Abnahme des Sommerniederschlags eine stärkere Zunahme der Winterniederschläge entgegen, woraus die resultierende Zunahme des Jahresniederschlags erklärt werden kann. ■ **Abb. 4.3** zeigt den Verlauf der projizierten Niederschläge für Deutschland. Die Analyse der Robustheit ergibt in diesem Fall eine robuste Zunahme des Jahresniederschlags für RCP8.5 zum Ende des 21. Jahrhunderts.

Eine robuste Abnahme des Sommerniederschlags zeigt sich in den regionalen Analysen nur für das Saarland im Südwesten Deutschlands für RCP8.5 zum Ende des 21. Jahrhunderts (Pfeifer et al. 2021). Für den Winterniederschlag werden hingegen robuste Zunahmen gegen Ende des 21. Jahrhunderts für RCP8.5 in allen Regionen Deutschlands projiziert.

Für Klimakennwerte zu Niederschlagsextrema wie z. B. dem 95. oder 99. Perzentil der Tagesniederschläge oder der Anzahl der Tage pro Jahr mit Niederschlägen über 20 mm zeigt sich, dass die extremen Niederschlagsgrößen eine deutlichere Zunahme zeigen als der mittlere Niederschlag. Hier ergibt die Robustheitsanalyse für viele Regionen Deutschlands robuste Zunahmen bereits zur Mitte des 21. Jahrhunderts für RCP8.5 und RCP4.5.

Die projizierten Änderungen für Temperatur und Niederschlag für Deutschland sind in ■ **Tab. 4.1** und **4.2** zusammengefasst. Dabei sind als robust klassifizierte Änderungen in fetter Schrift dargestellt. Deutlich erkennbar ist hier der große Unterschied der Belastbarkeit der Projektionen für die unterschiedlichen Klimagrößen. Robuste Aussagen zur Änderung der Temperatur können für beide Zeitperioden, alle betrachteten RCP-Szenarien und alle Jahreszeiten ermittelt werden, während für den Niederschlag nach der verwendeten Methode lediglich für RCP8.5 (Winter, Frühling und im Jahresmittel) zum Ende des Jahrhunderts eine robuste Zunahme konstatiert werden kann. Allerdings zeigt sich auch für RCP4.5 eine Tendenz zu zunehmenden Niederschlägen zum Ende des Jahrhunderts, ebenfalls vor allem für die Winter- und Frühjahrsmonate. Robuste Abnahmen zeigen sich gar nicht.

Da die Verarbeitung und Analyse des gesamten verfügbaren Ensembles an regionalen Klimaprojektionen für viele Anwender in der Klimafolgenforschung nicht möglich ist, wurden Ansätze entwickelt, um die Menge

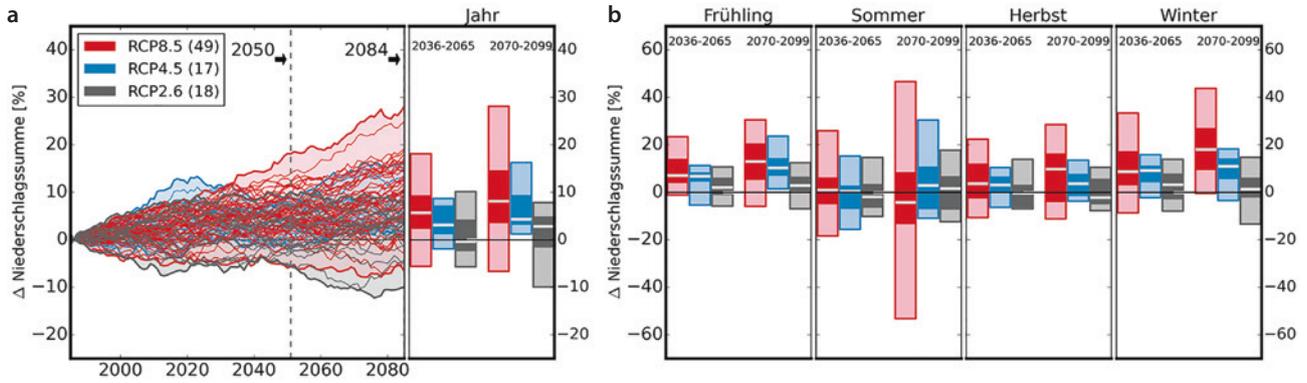


Abb. 4.3 a Zeitlicher Verlauf projizierter Änderungen (im 30-jährigen gleitenden Mittel) des durchschnittlichen jährlichen Niederschlags in Prozent im Vergleich zur Referenzperiode von 1971–2000. Es ist jeweils die Mitte des 30-jährigen Zeitraums als Bezugspunkt in der Zeitreihendarstellung gewählt. Jede Linie zeigt die Ergebnisse einer Simulation des Ensembles (Zusammensetzung s. Anhang des Buches). Änderungen zur Mitte des 21. Jahrhunderts (2036–2065) und zum Ende des Jahrhunderts (2070–2099) sind für die a jährlichen sowie b die saisonalen Änderungen in Form von Median (helle, waagerechte Linie), Minimum (untere Kante des Balkens), Maximum (obere Kante des Balkens), 20. und 80. Perzentil (untere und obere Grenze des dunklen Bereiches des Balkens) des Ensembles dargestellt. Farbige gekennzeichnet sind die unterschiedlichen RCP-Szenarien: RCP8.5 rot, RCP4.5 blau, RCP2.6 grau

Tab. 4.1 Projizierte Änderungen der jährlichen und saisonalen Temperatur in °C für Deutschland für 2036–2065 und 2070–2099 relativ zu 1971–2000. Angaben sind auf eine Nachkommastelle gerundet. Es werden ausschließlich Zunahmen projiziert, **alle Werte sind robust**. Kriterien der Robustheit nach Pfeifer et al. 2015 (Zusammensetzung des Ensembles: ► „Klimasimulationen“ im Serviceteil hinten im Buch)

Projizierte Klimaänderung relativ zu 1971–2000 [°C]		Mitte des Jahrhunderts: 2036–2065			Ende des Jahrhunderts: 2070–2099		
		Minimum	Median	Maximum	Minimum	Median	Maximum
RCP8.5	Jahresmitteltemperatur	1,3	1,9	3,1	2,7	3,5	5,3
	Frühlingstemperatur	0,9	1,6	2,9	2,0	3,1	4,0
	Sommertemperatur	1,3	1,7	3,3	2,6	3,4	6,6
	Herbsttemperatur	1,5	2,0	3,7	2,8	3,8	6,3
	Wintertemperatur	1,2	2,3	3,3	2,7	4,0	5,3
RCP4.5	Jahresmitteltemperatur	0,9	1,6	2,6	1,3	2,1	3,1
	Frühlingstemperatur	0,7	1,6	2,2	0,8	2,0	2,5
	Sommertemperatur	1,0	1,7	3,0	1,2	1,9	3,6
	Herbsttemperatur	0,9	1,6	3,0	1,5	2,2	3,9
	Wintertemperatur	0,7	1,8	2,8	1,3	2,4	3,2
RCP2.6	Jahresmitteltemperatur	0,4	1,3	2,2	0,4	1,2	1,8
	Frühlingstemperatur	0,5	1,2	1,8	0,4	1,0	1,7
	Sommertemperatur	0,3	1,2	2,2	0,1	1,1	2,2
	Herbsttemperatur	0,5	1,4	2,1	0,4	1,3	2,1
	Wintertemperatur	0,4	1,3	2,8	0,6	1,3	2,7

an Daten für dafür geeignete Anwendungen zu reduzieren. Dabei gibt es unterschiedliche Konzepte:

1. Reduzierung der Datenmenge durch Auswahl besonders „passender“ Simulationen. Grundlage hier ist eine Auswahl der Simulationen (globaler oder regionaler Klimamodelle) nach bestimmten Qualitäts-

kriterien, wie z. B. der Übereinstimmung von Simulationen des heutigen Klimas mit Beobachtungen. Dabei kann die Qualitätsprüfung an anwendungsspezifische Regionen und/oder Klimaparameter angepasst sein (z. B. Parding et al. 2020; Bayerisches Landesamt für Umwelt 2020).

Tab. 4.2 Projizierte Änderungen der jährlichen und saisonalen Niederschläge in Prozent für Deutschland für 2036–2065 und 2070–2099 relativ zu 1971–2000. Angaben sind auf eine Nachkommastelle gerundet. **Robuste Änderungen** sind durch Fettschrift hervorgehoben. Kriterien der Robustheit nach Pfeifer et al. 2015 (Zusammensetzung des Ensembles: ► „Klimasimulationen“ im Serviceteil hinten im Buch)

Projizierte Klimaänderung relativ zu 1971–2000 [%]		Mitte des Jahrhunderts: 2036–2065			Ende des Jahrhunderts: 2070–2099		
		Minimum	Median	Maximum	Minimum	Median	Maximum
RCP8.5	Jahresniederschlag	–5,6	5,7	18,1	–6,6	8,2	28,1
	Frühlingsniederschlag	–1,1	7,1	23,5	–5,9	13,1	30,5
	Sommerniederschlag	–18,4	0,9	26,0	–53,2	–4,2	46,7
	Herbstniederschlag	–10,6	3,7	22,4	–11,2	9,9	28,5
	Winterniederschlag	–8,6	8,8	33,3	–0,4	18,1	43,8
RCP4.5	Jahresniederschlag	–1,9	3,1	8,7	1,2	4,4	16,3
	Frühlingsniederschlag	–5,3	6,8	11,3	1,5	10,3	23,7
	Sommerniederschlag	–15,6	0,5	15,2	–10,9	2,9	30,4
	Herbstniederschlag	–6,4	3,2	10,4	–3,7	3,7	13,5
	Winterniederschlag	–2,2	9,2	15,8	–3,4	11,0	18,3
RCP2.6	Jahresniederschlag	–5,6	–0,3	10,2	–9,9	2,8	7,8
	Frühlingsniederschlag	–5,8	2,1	10,7	–7,0	3,0	12,5
	Sommerniederschlag	–10,2	–1,8	14,7	–12,3	1,6	17,7
	Herbstniederschlag	–6,9	–0,3	13,9	–7,7	–2,1	10,5
	Winterniederschlag	–7,9	2,2	13,9	–13,3	1,3	14,8

2. Reduzierung der Datenmenge durch Auswahl eines Subensembles, welches die Bandbreite der Änderungen des Gesamtensembles für einen oder mehrere Klimaparameter erhält. Auch diese Methoden können an anwendungsspezifische Regionen und/oder Klimaparameter angepasst werden (z. B. Dalelane et al. 2018; Mendlik und Gobiet 2015; Wilcke und Bärring 2016).

Für Deutschland hat der Deutsche Wetterdienst (DWD) basierend auf Methode 1 aus den verfügbaren regionalen Klimaprojektionen auf 0,11° für Europa ein Referenzensemble von Projektionen definiert, welches sich durch einen Ansatz nach Dalelane et al. (2018) mit Methode 2 weiter reduzieren lässt auf ein Kernensemble (DWD-Referenzensemble, Stand 2018). Das Bund-Länder-Fachgespräch, ein regelmäßiges Austauschforum zwischen Spezialisten von Bund und Ländern in Deutschland, hat ein weiteres Referenzensemble bereitgestellt (Linke et al. 2020).

Zahlreiche Forschungsarbeiten untersuchen die Auswirkungen einer globalen Erwärmung von 1,5 °C im Vergleich zu 2 °C (und 3 °C) als Beitrag zum IPCC-Sonderbericht über 1,5 °C globale Erwärmung (IPCC 2018). Der Ansatz besteht darin, aus den globalen Modellsimulationen Zeitperioden zur Analyse auszuwählen, zu denen die im jeweiligen Modell simulierte

globale Erwärmung einen bestimmten Schwellwert relativ zum präindustriellen Klima überschritten hat, d. h., es wird für jedes Modell der 30-Jahreszeitraum untersucht, in dem die globale Erwärmungsrate von z. B. 1,5 °C oder 2 °C in diesem Modell erreicht wird (Jacob et al. 2018). Damit können die Bandbreiten, die sich aus den unterschiedlichen zeitlichen Verläufen der in den globalen Klimamodellen abgebildeten internen Klimavariabilität sowie Modellunsicherheiten ergeben, reduziert werden und die regionalen Klimaänderungen und die damit verbundene Ausprägung von Extremen unter verschiedenen globalen Erwärmungsraten untersucht werden (Jacob et al. 2018; Kjellström et al. 2018; Teichmann et al. 2018; Pfeifer et al. 2019).

4.6 Kurz gesagt

Regionale Klimamodelle liefern räumlich detaillierte Informationen zu den Ausprägungen globaler Klimaänderungen in einzelnen Regionen, welche vielfach als Basis für die Forschung zu Klimafolgen, Vulnerabilität und Anpassung dienen. Viele Fragen, etwa nach der Verfügbarkeit von Wasser oder der Änderung von Wetterextremen, lassen sich eher mit räumlich hochaufgelösten Daten regionaler Klimamodelle beantworten als mit den Ergebnissen globaler Klimamodelle.

Die Standardauflösung für multidekadische regionale Klimaprojektionen für Europa im 21. Jahrhundert beträgt derzeit 12,5 km. Die Ergebnisse der zur Verfügung stehenden EURO-CORDEX-Ensemblesimulationen (Stand 2020) zeigen für Deutschland im Jahresmittel einen möglichen Anstieg der bodennahen Lufttemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zur Referenzperiode 1971 bis 2000 um 0,4 bis 1,8 °C für RCP2.6, um 1,3 bis 3,1 °C für RCP4.5 und um 2,7 bis 5,3 °C für RCP8.5.

Die simulierten Niederschlagsänderungen unterscheiden sich je nach Gebiet und weisen eine zeitlich hohe Variabilität auf. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts zeigen die meisten Simulationen für Deutschland im Vergleich zur Referenzperiode 1971 bis 2000 im Winter einen Trend der Niederschlagszunahme mit einer Bandbreite für RCP4.5 von etwa –3 bis +18 % und für RCP8.5 von –0,5–44 %. Im Sommer, sowie für RCP2.6 auch im Winter, zeigen etwa gleich viele Simulationen Zunahmen wie Abnahmen, sodass kein Trend für eine Änderung des mittleren Sommerniederschlags abgeleitet werden kann.

Konvektionsauflösende Modelle auf der Kilometer-skala besitzen ein hohes Potenzial zur zukünftig weiter verbesserten Abbildung insbesondere von Niederschlägen und Extremen. Es besteht erheblicher Forschungsbedarf zum interaktiven Einbezug der menschlichen Komponente in regionale Erdsystemmodelle, auch zur Abbildung von Vermeidungs- und Anpassungsmaßnahmen und ihrer Wechselwirkungen mit dem regionalen Klimasystem.

Literatur

- Alexandru A, de Elia R, Laprise R (2007) Internal variability in regional climate downscaling at the Ssasonal scale. *Mon Weather Rev* 135:3221–3238
- Ban N, Caillaud C, Coppola E, Pichelli E, Sobolowski S, Adinolfi M et al (2021) The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: evaluation of precipitation. *Clim Dyn*. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05708-w>
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2020) (Hg.) Das Bayerische Klimaprojektionsensemble – Audit und Ensemblebildung. 55 Seiten. Broschüre. ► <https://www.lfu.bayern.de/publikationen/>. Zugegriffen: 21. Febr 2021
- Berg P, Wagner S, Kunstmann H, Schädler G (2013) High resolution regional climate model simulations for Germany: Part 1 – validation. *Clim Dyn* 40:401–414
- Breil M, Schädler G (2017) Quantification of the uncertainties in soil and vegetation parameterizations for regional climate simulations in Europe. *J Hydrometeorol* 18(5):1535–1548
- Breil M, Rechid D, Davin EL, de Noblet-Ducoudré N, Katragkou E, Cardoso RM, Hoffmann P, Jach LL, Soares PMM, Sofiadis G, Strada S, Strandberg G, Tölle MH, Warrach-Sagi K (2020) The opposing effects of re/af-forestation on the diurnal temperature cycle at the surface and in the lowest atmospheric model level in the European summer. *J. Climate* 1–58. ► <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0624.1>
- Bülow K, Huebener H, Keuler K, Menz C, Pfeifer S, Ramthun H, Spekat A, Steger C, Teichmann C, Warrach-Sagi K (2019) User tailored results of a regional climate model ensemble to plan adaptation to the changing climate in Germany. *Adv Sci Res* 16:241–249. ► <https://doi.org/10.5194/asr-16-241-2019>
- Ciarlo JM, Coppola E, Fantini A et al. (2021) A new spatially distributed added value index for regional climate models: the EURO-CORDEX and the CORDEX-CORE highest resolution ensembles *Climate Dynamics*
- Christensen JH, Carter TR, Giorgi F (2002) PRUDENCE employs new methods to assess European climate change. *Eos, Trans Am Geophys Union* 83:147–147
- Coppola E, Sobolowski S, Pichelli E, Raffaele F, Ahrens B, Anders I et al (2020) A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean. *Clim Dyn* 55(1–2):3–34. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4521-8>
- Dalelane C, Früh B, Steger C, Walter A (2018) A pragmatic approach to build a reduced regional climate projection ensemble for Germany using the EURO-CORDEX 8.5 Ensemble. *J Appl Meteorol Climatol* 57(3): 477–491
- Davin EL, Rechid D, Breil M et al (2020) Biogeophysical impacts of forestation in Europe: First results from the LUCAS regional climate model intercomparison. *Earth Syst Dynam* 11:183–200. ► <https://doi.org/10.5194/esd-11-183-2020>
- Déqué M, Rowell PD, Lüthi D, Giorgi F, Christensen JH, Rockel B, Jacob D, Kjellström E, De Castro M, van den Hurk BJJM (2007) An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Clim Chang* 8:53–70
- DWD Referenzensemble (2018) ► https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtsl_rcp-datensatz_node.html. Zugegriffen: 15. Sept 2021
- Feldmann H, Pinto JG, Laube N, Uhlig M, Moemken J, Pasternack A, Früh B, Pohlmann H, Kottmeier C (2019) Skill and added value of the MiKlip regional decadal prediction system for temperature over Europe. *Tellus A: Dyn Meteorol Oceanogr* 71(1):1618678
- Fosser G, Khodayar S, Berg P (2015) Benefit of convection permitting climate model simulations in the representation of convective precipitation. *Clim Dyn* (2015)44:45–60. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2242-1>.
- Furusho-Pericot C, Goergen K, Hartick C, Kulkarni K, Keune J, Kollet S (2019) Pan-European groundwater to atmosphere terrestrial systems climatology from a physically consistent simulation. *Sci data* 6(1):1–9
- Galmarini S, Cannon A, Ceglar A et al (2019) Adjusting climate model bias for agricultural impact assessment: How to cut the mustard. *Clim Serv Elsevier BV* 13:65–69. ► <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2019.01.004>
- Gerstengarbe F-W, Werner PC, Österle H, Burghoff O (2013) Winter storm- and summer thunderstorm-related loss events with regard to climate change in Germany. *Theor Appl Climatol* 114:715–724. ► <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0843-y>
- Giorgi F, Jones C, Asrar G (2009) Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bulletin* 58:175–183
- Giorgi F, Coppola E, Solmon F et al (2012) RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Clim Res* 52:7–29
- Giorgi F, Gutowski WJ (2016) Coordinated experiments for projections of regional climate change. *Curr Clim Change Rep* 2:202–210. ► <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0046-6>
- Giorgi F (2019) Thirty years of regional climate modeling: Where are we and where are we going next? *J Geophys Res Atmos* 124:5696–5723. ► <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>
- Gobiet A, Suklitsch M, Heinrich G (2015) The effect of empirical-statistical correction of intensity-dependent model errors on the

- temperature climate change signal. *Hydrol Earth Syst Sci Copernicus GmbH* 19:4055–4066. ► <https://doi.org/10.5194/hess-19-4055-2015>
- Guillod BP, Jones RG, Bowery A, Haustein K, Massey NR, MitchellDM, OttoFEL, Sparrow SN, Uhe P, Wallom DCH, Wilson S, Allen MR (2017) weather@home 2: validation of an improved global–regional climate modelling system. *Geosci Model Dev* 10:1849–1872. ► <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1849-2017>
- Gutiérrez JM, Maraun D, Widmann M et al (2018) An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment. *Int J Climatol*. ► <https://doi.org/10.1002/joc.5462>
- Gutowski WJ, Ullrich PA, Hall A (2020) The ongoing need for high-resolution regional climate models: Process Understanding and Stakeholder Information. *Bull Amer Meteor Soc* 101:E664–E683. ► <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0113.1>
- Heise E, Lange M, Ritter B, Schrodin R (2003) Improvement and validation of the multilayer soilmodel. *COSMO Newsl* 3:198–203. ► <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/newsLetters/default.htm>
- Hewitt CD, Griggs DJ (2004) Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts (ENSEMBLES). *Eos Trans AGU* 85:566. ► <https://doi.org/10.1029/2004EO520005>
- Hollweg H-D, Böhm U, Fast I, Hennemuth B, Keuler K, Keup-Thiel E, Lautenschlager M, Legutke S, Radtke K, Rockel B, Schubert M, Will A, Woldt M, Wunram C (2008) Ensemble simulations over Europe with the regional climate model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios. Technical Report 3, Modelle und Daten at the Max Planck Institute for Meteorology: 150
- Hübener H, Bülow K, Fooker C et al (2017) ReKliEs-De Ergebnisbericht, Tech. rep., Hessian Agency for Nature, Environment and Geology (HLNUG). ► <http://reklies.hlnug.de/fileadmin/tmp/reklies/dokumente/ReKliEs-De-Ergebnisbericht.pdf>
- Hurttt GC, Chini LP, Frolick S et al (2011) Harmonization of land-use scenarios for the period 1500–2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest and resulting secondary lands. *Clim Chang* 109:117–161
- Hurttt GC, Chini L, Sahajpal R et al (2020) Harmonization of global land use change and management for the period 850–2100 (LUH2) for CMIP6. *Geosci Model Dev* 13:5425–5464. ► <https://doi.org/10.5194/gmd-13-5425-2020>
- IPCC (2018) Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner HO, Roberts D, Skea J, Shukla PR, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R, Connors S, Matthews JBR, Chen Y, Zhou X, Gomis MI, Lonnoy E, Maycock T, Tignor M, Waterfield T (Hrsg)]. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 3–24, ► <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>
- IPCC (2021) *Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A et al (Hrsg)]. Cambridge University Press. In Press
- Jacob D, Podzun R (1997) Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorol Atmos Phys* 63:119–129. ► <https://doi.org/10.1007/BF01025368>
- Jacob D, Göttel H, Kotlarski S, Lorenz P, Sieck K (2008) *Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland mit dem Klimamodell REMO*. Forschungsbericht, 204 41 138 Teil 2, iA des UBA Dessau
- Jacob D, Bülow K, Kotova L, Moseley C, Petersen J, Rechid D (2012) *Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble Simulationen für die Klimafolgenforschung*. CSC Report, Bd. 6. Climate-Service-Center, Hamburg
- Jacob D, Petersen J, Eggert B et al (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Envir Changes* 14:563–578. ► <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Jacob D, Kotova L, Teichmann C, Sobolowski SP, Vautard R, Donnelly C, Koutroulis AG, Grillakis MG, Tsanis IK, Damm A, Sakalli A, van Vliet MTH (2018) Climate impacts in Europe under +1.5°C global warming. *Earth's Future* [Online Ressource] 6(2):264–285. ► <https://doi.org/10.1002/2017EF000710>
- Jacob, D, Teichmann, C, Sobolowski, S et al. (2020) *Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community*. Regional Environmental Change, Springer Science and Business Media LLC, 20
- Karlický J, Huszár P, Halenka T, Belda M, Žák M, Pišoft P, Mikšovský J (2018) Multi-model comparison of urban heat island modelling approaches. *Atmos Chem Phys* 18:10655–10674. ► <https://doi.org/10.5194/acp-18-10655-2018>
- Keuler K (2006) Quantifizierung von Ungenauigkeiten regionaler Klima- und Klimaänderungssimulationen (QUIRCS) QUIRCS Abschlussbericht, 156 pp. ► <http://www.tu-cottbus.de/meteo/Quircs/forschung/abschlussbericht.pdf>
- Kjellström E, Nikulin G, Strandberg G, Bøssing Christensen O, Jacob D, Keuler K, Lenderink G, Van Meijgaard E, Schär C, Somot S, Lund Sørland S, Teichmann C, Vautard R (2018) European climate change at global mean temperature increases of 1.5 and 2 °C above pre-industrial conditions as simulated by the EURO-CORDEX regional climate models. *Earth Syst Dyn* 9(2):459–478. ► <https://doi.org/10.5194/esd-9-459-2018>
- Kotlarski S, Keuler K, Christensen OB, Colette A, Déqué M, Gobiet A, Goergen K, Jacob D, Lüthi D, van Meijgaard E, Nikulin G, Schär C, Teichmann C, Vautard R, Warrach-Sagi K, Wulfmeyer V (2014) Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geosc Model Dev* 7:1297–1333
- Kotlarski S, Szabó P, Herrera S et al (2019) Observational uncertainty and regional climate model evaluation: A pan-European perspective *International Journal of Climatology* 39:3730–3749
- Kreienkamp F, Spekat A, Enke W (2011) *Ergebnisse regionaler Szenarienläufe für Deutschland mit der statistischen Methode WETTREG auf der Basis der SRES-Szenarien A2 und B1 modelliert mit ECHAM5/MPI-OM*. Bericht: Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH, finanziert vom Climate-Service-Center. Eigenverlag der GmbH, Hamburg
- Kreienkamp F, Spekat A, Enke W (2013) The weather generator used in the empirical statistical downscaling method wettreg. *Atmosphere* 4:169–197
- Kreienkamp F, Paxian A, Früh B et al (2019) Evaluation of the empirical–statistical downscaling method EPISODES. *Clim Dyn* 52:991–1026. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4276-2>
- Langendijk GS, RechidD SK, Jacob D (2021) Added value of convection-permitting simulations for understanding future urban humidity extremes: case studies for Berlin and its surroundings. *Weather Clim Extrem* 33:100367
- Leduc M, Mailhot A, Frigon A, Martel J-L, Ludwig R, Brietzke GB, Giguère M, Brissette F, Turcotte R, Braun M, Scinocca J (2019) KlimEx project: a 50-member ensemble of climate change projections at 12-km resolution over Europe and northeastern North America with the Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *J Appl Meteorol Climatol*. ► <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-18-0021.1>
- Linke C et al (2020) Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder- Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Potsdam, Nov. 2020. ► <https://>

- lfu.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Leitlinien-Klima-modelldaten.pdf. Zugegriffen: 17. Sept 2021
- Lucas-Picher P, Caya D, de Elia R, Laprise R (2008) Investigation of regional climate models' internal variability with a ten-member ensemble of 10-year simulations over a large domain. *Clim Dyn* 31:927–940. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0384-8>
- Maraun D, Widmann, (2017) Statistical downscaling and bias correction for climate research. Cambridge University Press. ► <https://doi.org/10.1017/9781107588783>
- Massey N, Jones R, Otto FEL et al (2015) Weather@home—development and validation of a very large ensemble modelling system for probabilistic event attribution. *Q J R Meteorol Soc* 141(690):1528–1545. ► <https://doi.org/10.1002/qj.2455>
- Mendlik T, Gobiet A (2015) Selecting climate simulations for impact studies based on multivariate patterns of climate change. *Clim Change* 135(3–4):381–393
- Moseley C, Panferov O, Döring C, Dietrich J, Haberlandt U, Ebermann V, Rechid D, Beese F, Jacob D (2012) Klimaentwicklung und Klimaszenarien. In: Empfehlung für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Regierungskommission Klimaschutz, Hannover
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA et al (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747–756
- Nikiéma O, Laprise R (2010) Diagnostic budget study of the internal variability in ensemble simulations of the Canadian RCM. *Clim Dyn* 36:2313–2337. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0834-y>
- Niu GY, Yang ZL, MitchellKE, ChenF, Ek MB, Barlage M, KumarA, ManningK, NiyogiD, Rosero E, Tewari M, Xia Y (2011) The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *J Geophys Res Atmos* 116(D12)
- Oleson KW, Lawrence DM, Bonan GB et al. (2013) Technical description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM), Boulder, CO
- Orlowsky B, Gerstengarbe FW, Werner PC (2008) A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theor Appl Climatol* 92:209–223
- Parding KM, Dobler A, McSweeney CF, Landgren OA, Benestad R, Erlandsen HB, Mezghani A, Gregow H, Rätty O, Viktor E, El Zohbi J, Christensen OB, Loukos H, Meval GC (2020) An interactive tool for evaluation and selection of climate model ensembles. *Clim Serv* 18:100167. ► <https://doi.org/10.1016/j.climserv.2020.100167>
- Pham TV, Steger C, Rockel B, Keuler K, Kirchner I, Mertens M, Rieger D, Zängl G, and Früh B (2021) ICON in Climate Limited-area Mode (ICON release version 2.6.1): a new regional climate model. *Geosci. Model Dev.*, 14, 985–1005. ► <https://doi.org/10.5194/gmd-14-985-2021>
- Pfeifer S, Rechid D, Bathiany S (2020a) Klimaausblick Deutschland. Climate Service Center Germany (GERICS). ► https://www.gerics.de/products_and_publications/fact_sheets/climate_fact_sheets/detail/088906/index.php.de
- Pfeifer S, Rechid D, Bathiany S (2020b) Klimaausblick Schleswig-Holstein, Climate Service Center Germany (GERICS). ► https://www.gerics.de/products_and_publications/fact_sheets/climate_fact_sheets/detail/088906/index.php.de
- Pfeifer S, Rechid D, Bathiany S (2020c) Klimaausblick Baden-Württemberg, Climate Service Center Germany (GERICS). ► https://www.gerics.de/products_and_publications/fact_sheets/climate_fact_sheets/detail/088906/index.php.de
- Pfeifer S, Rechid D, Bathiany S (2021) Klimaausblick Saarland. Climate Service Center Germany (GERICS).
- Pfeifer S, Bülow K, Gobiet A, Häsler A, Mudelsee M, Otto J, Rechid D, Teichmann C, Jacob D (2015) Robustness of ensemble climate projections analyzed with climate signal maps: seasonal and extreme precipitation for Germany. *Atmosphere* 6:677–698
- Pfeifer S, Rechid D, Reuter M, Viktor E, Jacob D (2019) 1.5°, 2°, and 3° global warming: visualizing European regions affected by multiple changes. *Reg Environ Change* 19(6):1777–1786. ► <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01496-6>
- Pietikäinen J-P, Markkanen T, Sieck K, Jacob D, Korhonen J, Räisänen P, Gao Y, Ahola J, Korhonen H, Laaksonen A, Kaurola J (2018) The regional climate model REMO (v2015) coupled with the 1-D freshwater lake model FLake (v1): Fenno-Scandinavian climate and lakes. *Geosci Model Dev* 11:1321–1342. ► <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1321-2018>
- Prein AF, Langhans W, Fosser G, Ferrone A, Ban N, Goergen K, Keller M, Tölle M, Gutjahr O, Feser F, Brisson E, Kollet S, Schmidli J, van Lipzig NPM, Leung R (2015) A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Rev Geophys* 53(2):323–361
- Prein A, Gobiet A, Truhetz H, Keuler K, Goergen K, Teichmann C, Fox Maule C, van Meijgaard E, Déqué M, Nikulin G, Vautard R, Colette A, Kjellström E, Jacob D (2016) Precipitation in the EURO-CORDEX 0.11° and 0.44° simulations: high resolution, high benefits? *Climate Dyn Springer, Berlin Heidelberg* 46:383–412
- Primo C, Kelemen FD, Feldmann H, Akhtar N, Ahrens B (2019) A regional atmosphere–ocean climate system model (CCLMv5.0clm7-NEMOv3.3-NEMOv3.6) over Europe including three marginal seas: on its stability and performance. *Geoscientific Model Dev* 12(12):5077–5095
- Purr C, Brisson E, Ahrens B (2021) Convective rain cell characteristics and scaling in climate projections for Germany. *Int J Climatol* 41(5):3174–3185. ► <https://doi.org/10.1002/joc.7012>
- Rechid D, Petersen J, Schoetter R, Jacob D (2014) Klimaprojektionen für die Metropolregion Hamburg. Berichte aus den KLIMZUG-NORD Modellgebieten, Bd. 1. TuTech Verlag, Hamburg
- Rechid D, Davin E, de Noblet-Ducoudré N, Katragkou E, LUCAS Team (2017) CORDEX Flagship Pilot Study "LUCAS - Land Use & Climate Across Scales" – a new initiative on coordinated regional land use change and climate experiments for Europe. Solicited presentation. *Geophys Res Abstracts* 19:EGU2017–13172. EGU General Assembly 2017
- Remedio AR, Teichmann C, Buntmeyer L, Sieck K, Weber T, Rechid D, Hoffmann P, Nam C, Kotova L (2019) Jacob D (2019) Evaluation of new CORDEX simulations using an updated Köppen-Trewartha climate classification. *Atmosphere* 10:726. ► <https://doi.org/10.3390/atmos10110726>
- Reyers M, Feldmann H, Mieruch S, Pinto JG, Uhlrig M, Ahrens B, Früh B, Modali K, Laube N, Moemken J, Müller WA, Schädlér G, Kottmeier K (2019) Development and prospects of the regional MiKlip decadal prediction system over Europe: Predictive skill, added value of regionalization and ensemble size dependency. *Earth Syst Dyn* 10:171–187
- Riahi K, van Vuuren DP, Kriegler E, Edmonds J, O'Neill B, Fujimori S, Bauer N, Calvin K et al (2017) The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Glob Environ Chang* 42:153–168. ► <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Rockel B, Will A, Hense A (2008) The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorol Z* 17(4):347–348
- Schädler G (2007) A comparison of continuous soil moisture simulations using different soil hydraulic parameterisations for a site in Germany. *J Appl Meteorol Clim* 46:1275–1289. ► <https://doi.org/10.1175/JAM2528.1>
- Schär C, Fuhré O, Arteaga A et al (2020) Kilometer-scale climate models: prospects and challenges. *Bull Am Meteor Soc* 101(5):E567–E587. ► <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0167.1>

- Schleussner C-F, Saeed F, Nauels A, Trautmann T, Sieck K, Petersen J, Legutke S, Lierhammer L (2018) Klimafolgen bei 1,5°C und 2°C – Ergebnisse des HAPPI-DE Konsortiums. ► https://climateanalytics.org/media/happi_report_2018.11.26.pdf. Zugegriffen: 28. Febr. 2021
- Sein DV, Mikolajewicz U, Gröger M, Fast I, Cabos W, Pinto JG, Hagemann S, Semmler T, Izquierdo A, Jacob D (2015) Regionally coupled atmosphere-ocean-sea ice-marine biogeochemistry model ROM: 1. Description and validation. *J Adv Model Earth Sy*. ► <https://doi.org/10.1002/2014MS000357>
- Sieck K (2013) Internal Variability in the Regional Climate Model REMO. *Berichte zur Erdsystemforschung*, Bd. 142. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg
- Sieck K, Nam C, Bouwer LM, Rechid D, Jacob D (2020) Weather extremes over Europe under 1.5°C and 2.0°C global warming from HAPPI regional climate ensemble simulations. *Earth Syst Dynam Discuss* ► <https://doi.org/10.5194/esd-2020-4>
- Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Duda MG, Huang X-Y, Wang W, Powers JG (2008) A description of the advanced research WRF version 3, NCAR technical note NCAR/TN-475+STR. National Center for Atmospheric Research, Boulder
- Sørland SL, Schär C, Lüthi D, Kjellström E (2018) Bias patterns and climate change signals in GCM-RCM model chains. *Environ Res Lett* 13:07401
- Sørland SJ, Brogli R, Pothapakula PK et al (2021) COSMO-CLM regional climate simulations in the CORDEX framework: a review. *Geosci Model Dev Discuss* ► <https://doi.org/10.5194/gmd-2020-443>
- Spekat A, Enke W, Kreienkamp F (2007) Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63 L31 2010–2100 für die SRES-Szenarien B1, A1B und A2. Endbericht. Umweltbundesamt, Dessau
- Teichmann C, Bülow K, Otto J, Pfeifer S, Rechid D, Sieck K, Jacob D (2018) Avoiding extremes: benefits of staying below +1.5 °C compared to +2.0 °C and +3.0 °C global warming. *Atmosphere (Basel)* 9(4):1–19. ► <https://doi.org/10.3390/atmos9040115>
- Teichmann C, Jacob D, Remedio AR et al (2020) Assessing mean climate change signals in the global CORDEX-CORE ensemble. *Clim Dyn*. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05494-x>
- Vautard R, Gobiet A, Jacob D et al (2013) The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. *Clim Dyn* 41:2555–2575
- von Trentini F, Leduc M, Ludwig R (2019) Assessing natural variability in RCM signals: comparison of a multi model EURO-CORDEX ensemble with a 50-member single model large ensemble. *Clim Dyn*. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04755-8>
- Wagner S, Berg P, Schädler G, Kunstmann H (2013) High resolution regional climate model simulations for Germany: Part II-projected climate changes. *Clim Dyn* 40:415–427. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1510-1>
- Warszawski L, Frieler K, Huber V, Piontek F, Serdeczny O, Schewe J (2014) The inter-sectoral impact model intercomparison project (ISI-MIP): project framework. *Proc Natl Acad Sci* 111(9):3228–3232
- Wilhelm C, Rechid D, Jacob D (2014) Interactive coupling of regional atmosphere with biosphere in the new generation regional climate system model REMO-iMOVE. *Geosci Model Dev* 7:1093–1114. ► <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1093-2014>
- Wilcke RAI, Barring L (2016) Selecting regional climate scenarios for impact modelling studies. *Environ Model Softw* 78(2016):191–201. ► <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.01.002>
- Will A, Akhtar N, Brauch J, Breil M, Davin EL, Ho-Hagemann H, Maisonnaive E, Thürow M, Weiher S (2017) The COSMO-CLM 4.8 regional climate model coupled to regional ocean, land surface and global earth system models using OASIS3-MCT: description and performance. *Geoscientific Model Dev* 10(4):1549–1586

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

