

# Regionale Klimamodellierung

*Daniela Jacob, Christoph Kottmeier, Juliane Petersen, Diana Rechid,  
Claas Teichmann*

- 4.1 Methoden der regionalen Klimamodellierung – 28**
  - 4.1.1 Dynamische Regionalisierung – 28
  - 4.1.2 Statistische Regionalisierung – 28
- 4.2 Bestandteile regionaler Klimamodelle – 29**
- 4.3 Modellvalidierung und Evaluierung des Referenzklimas – 30**
- 4.4 Ensemble und Bandbreiten regionaler Klimaprojektionen – 31**
- 4.5 Projizierte Veränderungen von Temperatur und Niederschlag  
im 21. Jahrhundert – 31**
- 4.6 Kurz gesagt – 32**
  - Literatur – 33

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). Deshalb werden die Ergebnisse globaler Klimamodelle für kleinere Gebiete verfeinert (regionalisiert). Mit den Ergebnissen lassen sich Anwendungsfragen, etwa aus der Wasserwirtschaft (► Kap. 24), oder z. B. Fragen nach extremen Wetterereignissen mit Relevanz für die Versicherungswirtschaft (Teil II) und die Landwirtschaft (► Kap. 18) besser beantworten als mit den Ergebnissen globaler Modelle. Die Ergebnisse regionaler Modellrechnungen lassen sich auch direkter mit Beobachtungen vergleichen. Im Folgenden werden die Ergebnisse solcher Modellrechnungen im Vergleich mit Beobachtungen und für zwei zukünftige Zeiträume dieses Jahrhunderts dargestellt. Die eher methodischen Aspekte (z. B. in ► Abschn. 4.1) können von Anwendern mit nur allgemeinem Interesse am Klimawandel übergangen werden.

#### 4.1 Methoden der regionalen Klimamodellierung

Bei der Regionalisierung des globalen modellierten Klimawandels unterscheidet man statistische und dynamische Downscaling-Verfahren. Beide erfordern die Eingabe von Daten aus Globalmodellen. Vor dem jüngsten Weltklimabericht, dem Fünften IPCC-Sachstandsbericht, basierten Regionalisierungen auf Globalmodellen mit SRES-Szenarien, vielfach den Szenarien A1B und B1. Die Projektionen für diesen neuen Bericht stützen sich nun auf sogenannte *representative concentration pathways* (kurz RCPs; Moss et al. 2010). EURO-CORDEX, der europäische Teil des internationalen CORDEX-Programms, entwickelte für ganz Europa Regionalisierungen mit einer horizontalen Auflösung von etwa 12 km. Auch in Arbeiten zur dekadischen Klimavorhersage werden Regionalisierungen mit RCP-basierten Strahlungsantrieben berechnet (Mieruch et al. 2013).

Die dynamische Regionalisierung erfolgt heute vielfach mit dynamischen regionalen Klimamodellen: *COSMO Climate Model* (CCLM; Berg et al. 2013), den Modellen REMO (Jacob et al. 2012), WRF-CLIM (Skamarock et al. 2008; Wagner et al. 2013; Warrach et al. 2013) und HIRLAM (Christensen et al. 1997). In weiteren Projekten wurden Klimarechenläufe auch bis zu einer Auflösung von 7 km, teilweise 2,8 km verfeinert (Feldmann et al. 2013). In der Klimafolgenforschung und für verschiedene Anwendungen setzt man zudem statistische oder statistisch-dynamische Regionalisierungen globaler Modelle ein (Enke et al. 2005; Spekat et al. 2007, 2010; Kreienkamp et al. 2011a, 2013).

##### 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 zugrunde

liegende Gleichungssystem numerisch gelöst. Die Gleichungen repräsentieren die Erhaltungssätze für Energie, Impuls und Masse von Luft sowie Wasser und Wasserdampf. Das dynamische Regionalmodell startet mit den Ergebnissen eines globalen Klimamodells und erhält von ihm etwa alle 6 h neue Randwerte. Das Globalmodell prägt somit auch die langfristige Variabilität und großräumigen Abläufe in der Modellregion. Für diese berechnet man dann mit höherer horizontaler Auflösung das regionale Klima, und zwar schrittweise, um die großen Auflösungs-sprünge an den Rändern auszugleichen: erst 50 km Gitterweite, dann 10 oder 7 km bis teilweise 3 km und vereinzelt 1 km. Dynamische regionale Klimamodelle werden auch mit dynamischen Boden-Vegetationsmodellen gekoppelt (Schädler 2007), teilweise auch mit hochauflösenden Ozeanmodellen (Sein et al. 2015).

Mit der höheren räumlichen Auflösung lassen sich die Eigenschaften der Erdoberfläche wie etwa Höhenstruktur und Landbedeckung besser abbilden, ebenso Prozesse wie Gebirgsüberströmung, Wolken- und Niederschlagsbildung. Je nach Lage der Region und vorherrschender Wetterlage bestimmen entweder die großskaligen Strömungen des Globalmodells oder die lokalen Gegebenheiten und kleinräumigen Prozesse das simulierte regionale Klima.

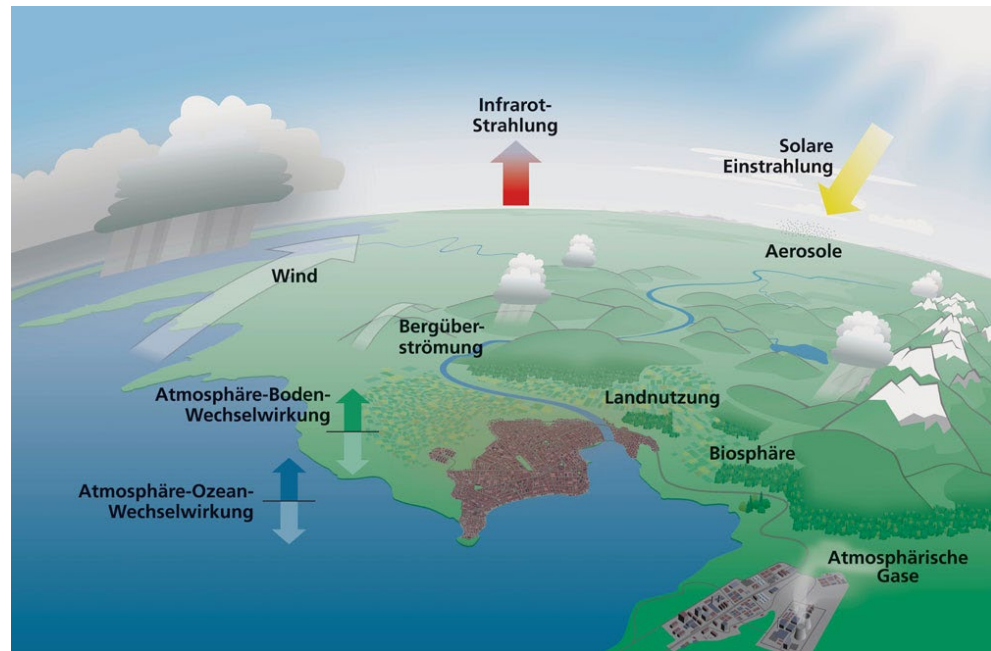
Dynamische Modellrechnungen dienen auch dazu, regionale Klimaänderungen zu ermitteln. Dafür werden zunächst 30 Jahre aus der Vergangenheit (oft 1971–2000) mit einem bekannten Klima simuliert, um zu überprüfen, wie gut die regionalisierten Daten mit den Daten aus Stationsbeobachtungen übereinstimmen. Dann werden 30 Jahre der Zukunft simuliert. Mit einem so überprüften Modell lässt sich das Klimaänderungssignal für die Vergangenheit und die Zukunft ableiten.

Selbst mit einem „perfekten“ Modell ergibt eine Simulation jedoch immer nur eine einzelne Realisierung vieler möglicher zukünftiger Klimazustände. Das liegt an den zufallsartigen Eigenschaften des Klimas. Deshalb werden sogenannte Ensembles von Realisierungen berechnet, wobei die Anfangs- oder Randbedingungen variiert werden. Die Wettervorhersage greift seit Längerem auf Ensembles zurück – das Wetter lässt sich jedoch täglich und damit besser überprüfen als das Klima. Ensemblekonstruktionen, entweder die genannten Sets aus Realisierungen oder auch Ensembles aus unterschiedlichen Klimamodellen (Multimodellansätze), und ihre Überprüfung stehen derzeit weit oben in der Forschung.

##### 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) und STARS (*STATistical Regional model*; Gerstengarbe et al. 2013) 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,

■ **Abb. 4.1** Systemkomponenten regionaler Klimamodelle. (KIT)



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.

Es entstehen also synthetische vergleichbare Zeitreihen meteorologischer Größen an den Orten der Messstationen. Diese Zeitreihen basieren auf den von dynamischen Klimamodellen projizierten Änderungen in der großräumigen Zirkulation. Die räumliche Dichte der Stationen, die Zeitreihen geliefert haben, bestimmt dabei die horizontale Auflösung. Da statistische Modelle einen vergleichsweise geringen Rechenaufwand erfordern, können sie auch für viele Regionalisierungen und regionale Ensembleansätze genutzt werden. Größere meteorologische Extreme, als sie in der Vergangenheit beobachtet wurden, können allerdings nicht direkt ermittelt werden.

## 4.2 Bestandteile regionaler Klimamodelle

Komplexe Atmosphärenmodelle beschreiben das regionale Klima. Diese Modelle werden mit einem Boden-Vegetationsmodell und teilweise bereits mit einem Ozeanmodell gekoppelt. Somit berücksichtigen sie die Atmosphäre, den Boden, die Vegetation und Landnutzung sowie Gletscher, Schneedecken und Eis im Boden (■ Abb. 4.1).

Neben den Hoch- und Tiefdruckgebieten prägen viele andere Prozesse die regionale Atmosphäre: die Überströmung flacher und gebirgiger Landschaften oder Wolkenbildung und Niederschläge. Temperaturkontraste sind verantwortlich für Land-Meer- und Berg-Tal-Winde. Die Wirbelstärke atmosphärischer Zirkulationen, auch in der mittleren und oberen Troposphäre, ist entscheidend für solche Prozesse. In Deutschland

und Zentraleuropa hängen die Vorgänge in der Atmosphäre auch von der geografischen Lage ab, also etwa Küstenferne oder Gebirgsnähe.

Das atmosphärische Klimamodell muss hoch aufgelöst sein, um solche Vorgänge richtig zu zeigen. Da Modelle für die Wettervorhersage grundsätzlich das gleiche leisten müssen und regelmäßig mit Beobachtungen verglichen werden, eignen sie sich gut als Ausgangspunkt für regionale Klimamodelle. Ein zusätzliches Erfordernis ist aber, dass systematische Modellfehler bei Klimamodellen sehr klein bleiben, da sich diese sonst über Jahre und Jahrzehnte zu großen Fehlern summieren können.

Für viele Modelle gibt es unterschiedliche Versionen. Die Modelle lösen auf einem dreidimensionalen Gitter die Gleichungen für Strömungen in einer wasserdampfhaltigen Atmosphäre. Je Gitterzelle erhält man einen gemittelten Wert, z. B. für die Temperatur, den Druck, die Windgeschwindigkeit, den Wasserdampf-, Flüssigwasser- und Eisgehalt der Atmosphäre sowie die Luftdichte. Kleinskalige Prozesse liegen unterhalb der Modellauflösung und müssen parametrisiert werden.

Die Vorgänge in der Atmosphäre, im Boden und in der Bestandsschicht sind eng verknüpft. Niederschlag und Verdunstung sowie Energieflüsse in Form von Wärmeleitung, Strahlung und Verdunstung koppeln das Land an die Atmosphäre. Vegetation, Versiegelung und Oberflächenbeschaffenheit des Landes spielen dabei eine wichtige Rolle. Wasser- und Energietransport im Boden beeinflussen die Wechselwirkungen an der Oberfläche. Der Wasserabfluss auf der Erdoberfläche muss ebenso berücksichtigt werden wie der Abfluss ins Grundwasser. Mit Boden-Vegetationsmodellen lassen sich Wechselwirkungen zwischen Vegetation, Boden und Atmosphäre abbilden. Sie heißen beispielsweise TERRA (Heise et al. 2003), VEG3D (Schädler 2007), CLM2 (Davín et al. 2011; Edouard et al. 2011) und REMO-iMOVE (Reick et al. 2013; Wilhelm et al. 2014).

Das Boden-Vegetationsmodell VEG3D enthält neben dem Boden, der in nach unten dicker werdende Schichten unterteilt

ist, und der Vegetation auch Elemente, mit denen sich die Dichte von Pflanzenwurzeln, Schnee sowie Gefrier- und Schmelzprozesse abbilden lassen (Rutter et al. 2009; Khodayar und Schädler 2013; Meißner 2008). Die Vegetation befindet sich zwischen der Erdoberfläche und der untersten Atmosphärenschicht. Die verschiedenen Arten der Vegetation und Oberflächen werden je nach Landnutzung klassifiziert. Jahreszeitliche Veränderungen der Vegetation werden ebenfalls berücksichtigt.

### 4.3 Modellvalidierung und Evaluierung des Referenzklimas

Um die Güte eines Modells beurteilen und es verbessern zu können, werden durch Validierung Modellergebnisse mit Beobachtungen verglichen. Hierzu wird das Regionalmodell mit sogenannten Reanalysedaten angetrieben. Durch die Randwerte von Temperatur, Druck, Feuchte und Strömungsgeschwindigkeit aus einem globalen Datensatz (in diesem Fall die Reanalysedaten) 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. Ein so angetriebenes regionales Klimamodell bildet die Prozesse auf regionaler Skala gut ab und simuliert dabei die Wetterlagen in ihrer zeitlichen Abfolge.

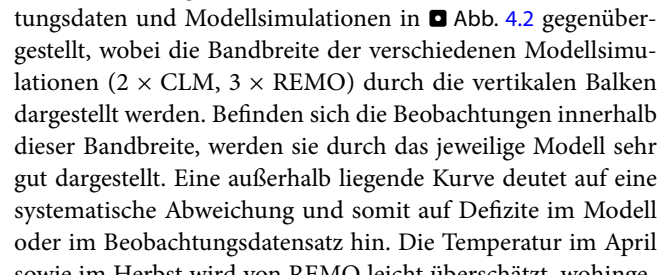
Zur Validierung des Regionalmodells werden beobachtete meteorologische Größen wie Temperatur und Niederschlag, für die es ein großflächiges, dichtes Messnetz gibt, mit den Modellergebnissen verglichen. Typischerweise werden klimatologisch relevante Zeiträume von 30 Jahren für den Vergleich herangezogen.

Das validierte Regionalmodell wird unter Vorgabe von Randwerten eines globalen Klimamodells eingesetzt, um das Klima im Referenzzeitraum (z. B. 1971–2000) zu beschreiben. Einzelne Jahre können nicht mit beobachteten Jahren in Bezug gesetzt werden. Vergleicht man jedoch das Klima über längere Zeiträume – typischerweise über 30 Jahre oder mehr –, kann man erwarten, dass das simulierte Klima dem beobachteten entspricht, wobei Schwankungen, die sich über mehrere 10-Jahres-Perioden erstrecken (sogenannte multidekadische Schwankungen) auch bei 30-Jahres-Mitteln zu Unterschieden führen können.

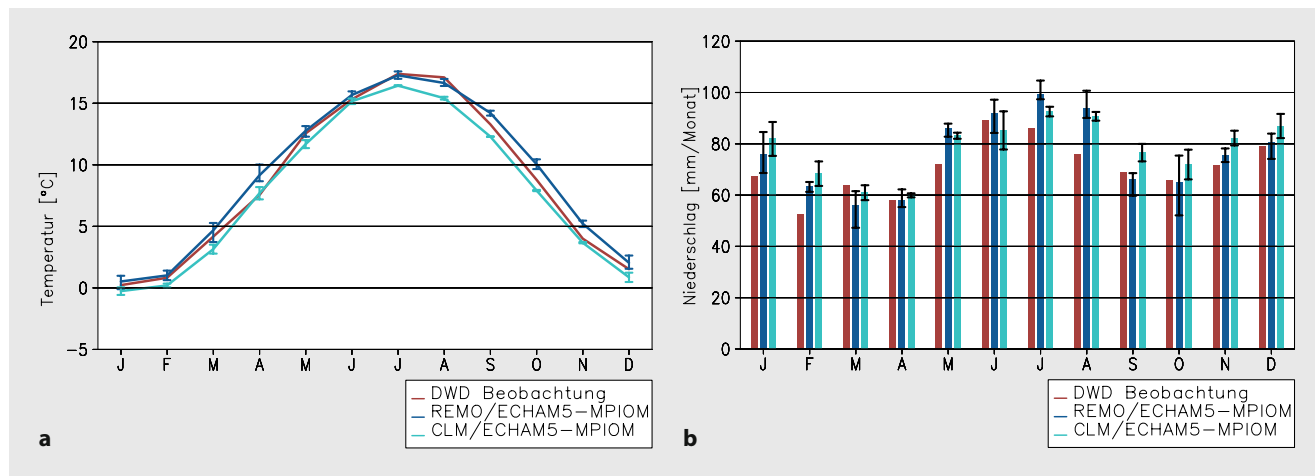
Manche Impaktmodelle reagieren sehr empfindlich auf systematische Abweichungen zwischen dem simulierten und dem tatsächlich beobachteten Klima, auf dessen Basis sie kalibriert und validiert werden. Eine mögliche Lösung ist die Erzeugung biaskorrigierter Klimamodelldaten. Die Korrekturen werden dann auf die Klimäläufe für die Zukunft übertragen. Die Qualität der Biaskorrektur hängt von der Qualität des eingehenden Beobachtungsdatensatzes und der Biaskorrekturmethode ab. Generell sind die Methoden von Biaskorrekturen und ihre Auswirkung auf die Konsistenz und Unschärfe der erzeugten Eingaben für Impaktmodelle Gegenstand aktueller Forschung.

In regionalen Studien werden Simulationen des Referenzklimas globaler und regionaler Klimamodelle evaluiert. Schoetter et al. (2012) zeigen anhand der hauptsächlich in Deutschland entwickelten Regionalmodelle (CLM und REMO) sowie des Globalmodells ECHAM5, dass Temperatur und Windgeschwindigkeit der Metropolregion Hamburg gut simuliert werden. Bei

der relativen Feuchte, der Bewölkung und dem Niederschlag gibt es in bestimmten Jahreszeiten größere Unterschiede zu den Beobachtungen. Beide Regionalmodelle wurden auch in Bezug auf Extremereignisse evaluiert. Früh et al. (2010) untersuchen, welche Niederschlagswerte nach bestimmten Zeitperioden im statistischen Mittel wieder auftreten. Diese Werte werden in den Modellen im Vergleich zu Beobachtungen eher überschätzt. Die Ergebnisse beider Modelle für den Niederschlag in Südwestdeutschland sind von Feldmann et al. (2008) mit ähnlichen Aussagen untersucht worden. Eine gute Übersicht zu verschiedenen Evaluierungsmethoden und der Quantifizierung von Ungenauigkeiten regionaler Klima- und Klimaänderungssimulationen in Mitteleuropa findet sich in Keuler (2006) sowie in Jacob et al. (2012).

Die mittleren Jahresgänge (1971–2000) von Temperatur und Niederschlag für Deutschland sind anhand von Beobachtungsdaten und Modellsimulationen in  **Abb. 4.2** gegenübergestellt, wobei die Bandbreite der verschiedenen Modellsimulationen (2 × CLM, 3 × REMO) durch die vertikalen Balken dargestellt werden. Befinden sich die Beobachtungen innerhalb dieser Bandbreite, werden sie durch das jeweilige Modell sehr gut dargestellt. Eine außerhalb liegende Kurve deutet auf eine systematische Abweichung und somit auf Defizite im Modell oder im Beobachtungsdatensatz hin. Die Temperatur im April sowie im Herbst wird von REMO leicht überschätzt, wohingegen sie vor allem im Sommer von CLM unterschätzt wird. Für den Niederschlag werden die Werte von REMO gut simuliert und liegen nur in der zweiten Winterhälfte und im Spätsommer über den Beobachtungen. Der Niederschlag wird von CLM im ganzen Jahresverlauf (bis auf März und Juni) überschätzt. Da auch die Messungen Unsicherheiten aufweisen, bedeuten Modellergebnisse innerhalb der Unsicherheiten der Beobachtungen ein Fehlen systematischer Unterschiede. Neben den nationalen Evaluierungsaktivitäten wurden auch international koordinierte Modellevaluierungen durchgeführt, z. B. in den europäischen Projekten PRUDENCE (Christensen et al. 2002) und ENSEMBLES (Hewitt und Griggs 2004). Im Rahmen der internationalen Initiative CORDEX (Giorgi et al. 2009) des Weltklimaforschungsprogramms (*World Climate Research Programme*, WCRP) werden koordinierte Simulationen mit einer Auflösung von ca. 50 km für alle wichtigen Regionen der Erde durchgeführt. Für Europa werden zusätzlich Simulationen mit ca. 12 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 derzeit erreichbare Genauigkeit regionaler Klimasimulationen für Europa quantifiziert.

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. Außerdem wird mittels höherer Modellauflösungen eine neue Qualität erreicht, was die zeitliche und räumliche Genauigkeit des regionalen Klimas betrifft.



■ **Abb. 4.2** Simulierter mittlerer Jahresgang von Temperatur [°C] (a) und Niederschlag [mm/Monat] (b) 1971–2000 in Deutschland als Mittelwert von drei REMO- und zwei CLM-Simulationen, jeweils angetrieben mit Simulationen des Globalmodells ECHAM5-MPIOM, in Balkendarstellung die Bandbreiten der jeweiligen Simulationen im Vergleich zu Beobachtungsdaten des DWD. (Grafiken erstellt nach Rechid et al. 2014)

#### 4.4 Ensemble und Bandbreiten regionaler Klimaprojektionen

Die Regionalisierung globaler Klimaprojektionen ermöglicht die Untersuchung der Auswirkungen globaler Klimaänderungen auf einzelne Regionen. Auch mit regionalen Klimamodellen werden zunehmend international koordinierte Multimodell-Ensembles erstellt, um die Bandbreiten möglicher regionaler Klimaentwicklungen systematisch abzubilden (z. B. Déqué et al. 2007; Jacob et al. 2012; Moseley et al. 2012; Rechid et al. 2014). Dabei werden Simulationen verschiedener Globalmodelle mit verschiedenen regionalen Klimamodellen kombiniert und Klimaprojektionen für verschiedene Emissionsszenarien erstellt.

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 zu zusätzlicher interner Variabilität führen können. 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 interne 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.

Verschiedene Modelle reagieren unterschiedlich empfindlich auf die veränderten Treibhausgaskonzentrationen. Diese methodische Unsicherheit beruht 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.

Hinzu kommen Unterschiede durch verschiedene physikalische Parametrisierungen und Konfigurationen der Regionalmodelle. Einerseits 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 Gebietes liegen. Andererseits können Regionalmodelle lokale Prozesse im Klimasystem besser abbilden. Dieser Mehrwert regionaler Simulationen wurde in zahlreichen Studien für verschiedene Regionen evaluiert (z. B. Feser et al. 2011; Paeth und Manning 2012).

Neben den in globalen Modellen berücksichtigten Emissionsszenarien (Moss et al. 2010) und großskaligen Landnutzungsänderungen (Hurtt et al. 2011) können in regionalen Modellen zudem regionale und lokale Änderungen der Landnutzung und Landbewirtschaftung implementiert werden. Dazu wurden bislang nur einzelne Experimente realisiert (z. B. Paeth et al. 2009; Gálos et al. 2013; Trail et al. 2013). Zukünftig sind auch hierzu koordinierte Simulationen unterschiedlicher Ensembles geplant.

#### 4.5 Projizierte Veränderungen von Temperatur und Niederschlag im 21. Jahrhundert

Für Deutschland stehen zahlreiche regionale Klimasimulationen auf relativ hoch aufgelösten Gittern mit Kantenlängen von etwa 25–7 km zur Verfügung. Viele der Simulationen basieren auf den globalen SRES-Emissionsszenarien. Die Regionalisierungen der Projektionen des globalen Modellsystems ECHAM5-MPIOM mit dynamischen und statistischen Methoden (MPI-M 2006; Hollweg et al. 2008; Jacob et al. 2008, 2012; Wagner et al. 2013; Spekat et al. 2007; Kreienkamp et al. 2011b; Orłowsky et al. 2008; DWD 1996–2014) dienen in vielen deutschen Projekten zur Klimafolgenforschung wie in KLIMZUG, KLIFE, KLIWA und KLIWAS als Grundlage. Multi-Global-/Regionalmodell-Ensembles wurden im Rahmen des EU-Forschungsprojekts ENSEMBLES für das SRES Szenario A1B erstellt und ausgewertet (Hewitt und Griggs 2004; Jacob et al. 2012). Seit 2014 stehen mit der Initiative EURO-CORDEX (► Abschn. 4.3) hoch aufgelöste Klimaände-

4

runingssimulationen für ganz Europa auf Rastern mit Kantentlängen von 12 km zur Verfügung. Sie basieren auf international koordinierten Simulationen von Multi-Global-/Regionalmodell-Ensembles für verschiedene RCPs (Jacob et al. 2014).

Insgesamt existieren für Deutschland verschiedene regionale Modellsimulationen und Datensätze, die zum Teil nicht in koordinierten Experimenten durchgeführt wurden. Diese Ergebnisse liegen daher teilweise auf unterschiedlichen Gebietsausschnitten und räumlichen Auflösungen vor und wurden mit unterschiedlichen Kombinationen von globalen und regionalen Klimamodellen für verschiedene Emissionsszenarien erstellt. In Veröffentlichungen wurden die Modellsimulationen für bestimmte Gebiete innerhalb Deutschlands und für unterschiedliche Zeiträume ausgewertet. Bei der Verwendung der Ergebnisse ist es besonders wichtig, auf die Datengrundlagen der Veröffentlichungen zu achten.

Im Folgenden wird zunächst auf die wesentlichen Ergebnisse, basierend auf den Daten der SRES-Emissionsszenarien B1, A1B und A2 aus den oben aufgeführten Studien, eingegangen. Die neuesten Ergebnisse der Klimasimulationen werden dann vorgestellt, die im Rahmen der EURO-CORDEX-Initiative für Europa erstellt und als Ensemble ausgewertet wurden.

Dynamische und statistische Modelle projizieren im Gebietsmittel über Deutschland eine deutliche Temperaturzunahme, die meisten Modelle einen stärkeren Temperaturanstieg im Winter als im Sommer. Die mittleren Niederschlagsmengen schwanken erheblich von Jahr zu Jahr. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts zeigt die Mehrheit der Simulationen mehr Jahre mit höheren Niederschlagsmengen als Jahre mit geringeren Niederschlagsmengen im Vergleich zum Referenzzeitraum. Im Sommer zeigen die meisten Simulationen im Mittel eine Niederschlagsabnahme, wenige eine Niederschlagszunahme. Im Verlauf des Jahrhunderts unterscheiden sich die für das B1-Szenario simulierten Temperaturen immer deutlicher von den Ergebnissen der A1B- und A2-Szenarien. Das bedeutet, dass durch eine Verminderung der Treibhausgasemissionen und damit geringeren Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre deutlich geringere Klimaänderungen zu erwarten sind.

Die neuesten Ergebnisse im Rahmen der EURO-CORDEX-Initiative wurden mit verschiedenen Regionalmodellen in Kombination mit mehreren Globalmodellen auf der Basis von drei RCPs berechnet. Das Szenario RCP2.6 stellt dabei eine neue, in den SRES-Szenarien nicht verfolgte Möglichkeit der zukünftigen Entwicklung der Treibhausgasemissionen dar, die nur durch sehr ambitionierte klimapolitische Maßnahmen und gegen Ende des 21. Jahrhunderts sogar negative Emissionen erreichbar ist. Bislang liegen für RCP2.6 nur wenige regionale Simulationen vor.

In **Abb. 4.3a–d** ist das fortlaufende 30-Jahres-Mittel der simulierten Temperatur- und Niederschlagsänderungen im Vergleich zur Referenzperiode 1971–2000 für das Gebietsmittel über Deutschland zu sehen. Zum Ende des 21. Jahrhunderts wird ein Anstieg der bodennahen Lufttemperatur im Winter um 1,2–3,2 °C für RCP4.5 und um 3,2–4,6 °C für RCP8.5 projiziert (**Abb. 4.3a**). Im Sommer nimmt die Lufttemperatur in den verwendeten Simulationen für RCP4.5 um 1,3–2,6 °C und für RCP8.5 um 2,7–4,8 °C zu (**Abb. 4.3b**). Für RCP2.6 wird zum Ende des 21. Jahrhunderts im Gebietsmittel eine Stabilisierung

des Temperaturanstiegs um etwa 1 °C gegenüber 1971–2000 in beiden Jahreszeiten erreicht. Die meisten Simulationen zeigen unterschiedliche regionale Entwicklungen (Jacob et al. 2014): Im Alpenraum wird im Sommer ein höherer Temperaturanstieg projiziert als in Norddeutschland. Im Winter sind bei den meisten Simulationen stärkere Temperaturzunahmen im Osten Deutschlands zu erkennen und schwächere im Westen. Die großräumigen räumlichen Muster ändern sich im Vergleich zu den Projektionen der SRES-Szenarien nicht.

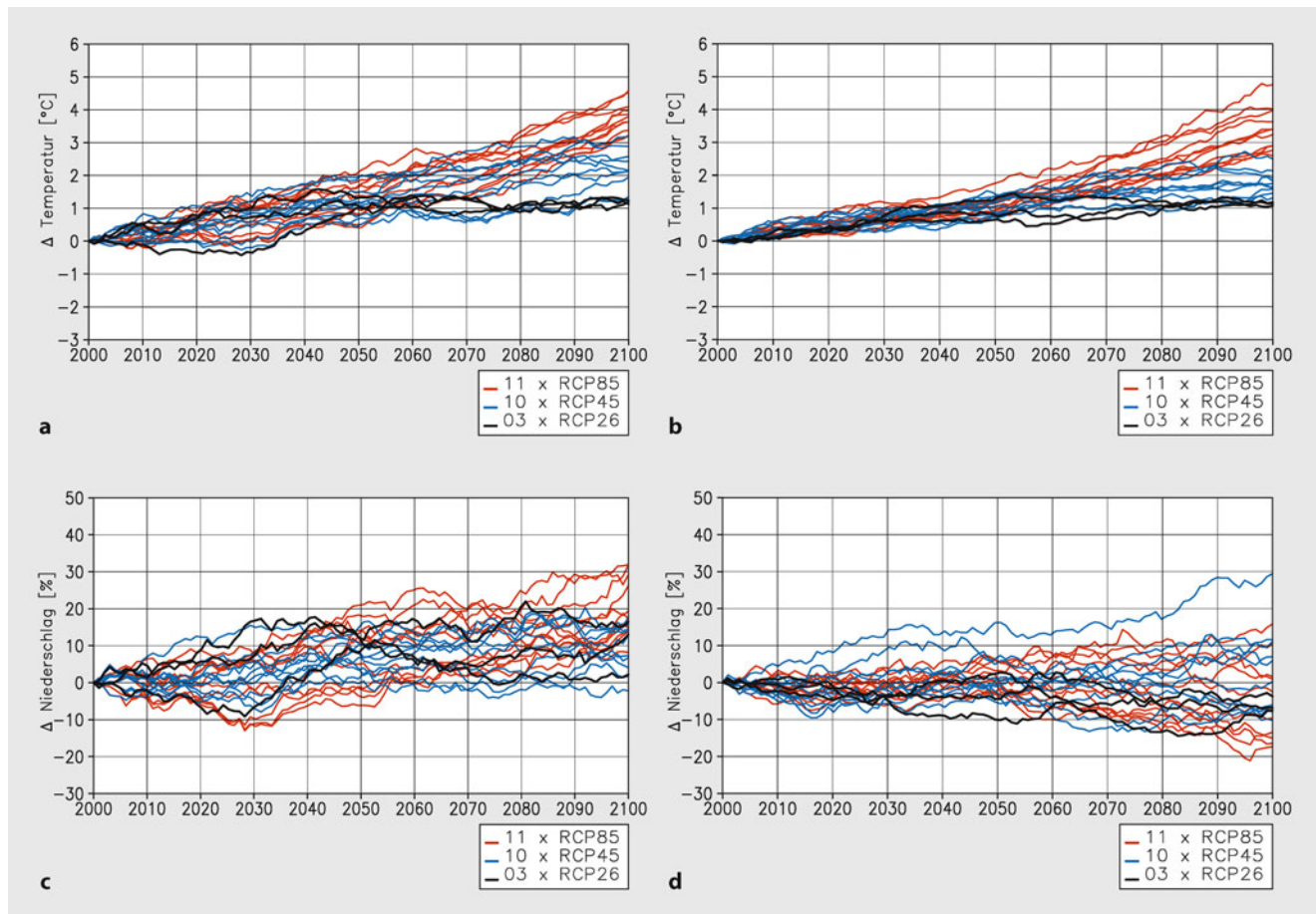
Die Niederschlagsänderungen zeigen eine hohe Variabilität zwischen den einzelnen Dekaden, die auch in den gleitenden 30-Jahres-Mitteln zu sehen ist (**Abb. 4.3c, d**). Gegen Ende des 21. Jahrhunderts projizieren die meisten Modelle eine Niederschlagszunahme im Winter für RCP4.5 mit einer Bandbreite von –3 bis +17 % und alle Simulationen für RCP8.5 um +8 bis +32 % (**Abb. 4.3**). Im Sommer werden für die RCPs im Gebietsmittel über Deutschland sowohl mögliche Abnahmen als auch Zunahmen projiziert (**Abb. 4.3d**). Daraus kann keine Aussage über den Trend für eine Änderung des mittleren Niederschlags im Sommer abgeleitet werden. Großräumig betrachtet verläuft im Sommer durch Deutschland im Ensemble-Mittel der Übergangsbereich von abnehmenden Niederschlägen in Südwesteuropa und zunehmenden Niederschlägen in Nordeuropa (Jacob et al. 2014).

Um räumlich differenzierte Aussagen zu projizierten Niederschlagsänderungen im Sommer und Winter zu treffen, 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. Eine robuste Abnahme des Sommerniederschlags zeigen danach nur wenige Regionen in Südwestdeutschland für RCP8.5. Für den Winterniederschlag werden hingegen robuste Zunahmen gegen Ende des 21. Jahrhunderts für RCP4.5 vor allem in Süd- und Mitteldeutschland und für RCP8.5 in fast allen Regionen Deutschlands projiziert (Pfeifer et al. 2015).

## 4.6 Kurz gesagt

Regionalisierungen von globalen Klimaprojektionen liefern detailliertere Aussagen für bestimmte Gebiete innerhalb der Gitterweite globaler Modelle. Viele Fragen, etwa nach der Verfügbarkeit von Wasser oder der Änderung von Wetterextremen, lassen sich eher mit solchen hochaufgelösten Daten beantworten als mit den Ergebnissen der Globalmodelle. Die neuesten Ergebnisse der EURO-CORDEX Ensemblesimulationen auf Basis der RCPs zeigen einen möglichen Anstieg der bodennahen Lufttemperatur im Winter bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um 1,2–3,2 °C für RCP4.5 und um 3,2–4,6 °C für RCP8.5. Im Sommer werden Temperaturanstiege für RCP4.5 um 1,3–2,6 °C und für RCP8.5 um 2,7–4,8 °C projiziert.

Die simulierten Niederschlagsänderungen unterscheiden sich je nach Gebiet und weisen eine zeitlich höhere Variabilität auf. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts zeigen die meisten Simu-



■ **Abb. 4.3** Projizierte Änderungen der bodennahen Lufttemperatur (2 m über Grund) im Winter (a) und im Sommer (b) sowie relative Abweichungen der Niederschlagsmenge im Winter (c) und im Sommer (d). Vergleichszeitraum: 1971–2000 (als gleitendes 30-Jahres-Mittel, abgebildet jeweils auf das 30. Jahr). Es wurden Simulationen verschiedener Global-/Regionalmodellkombinationen auf Basis der Szenarien RCP8.5 (rot), RCP4.5 (blau) und RCP2.6 (schwarz) verwendet, die für das Gebietsmittel der Bundesrepublik Deutschland abgebildet sind

lationen im Vergleich zur Referenzperiode 1971–2000 im Winter einen Trend der Niederschlagszunahme mit einer Bandbreite für RCP4.5 von –3 bis +17 % und für RCP8.5 um +8 bis +32 %. Im Sommer zeigen Simulationen sowohl Zunahmen als auch Abnahmen, sodass kein Trend für eine Änderung des mittleren Niederschlags abgeleitet werden kann.

## Literatur

- Alexandru A, Elia R de, Laprise R (2007) Internal variability in Regional Climate Downscaling at the Seasonal Scale. *Mon Weather Rev* 135:3221–3238
- 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
- Christensen JH, Machenhauer B, Jones RG, Schär C, Ruti PM, Castro M, Visconti G (1997) Validation of present-day regional climate simulations over Europe: LAM simulations with observed boundary conditions. *Clim Dyn* 13:489–506
- Christensen JH, Carter TR, Giorgi F (2002) PRUDENCE employs new methods to assess European climate change. *Eos, Trans Am Geophys Union* 83:147–147
- Davin EL, Stöckli R, Jaeger EB, Levis S, Seneviratne SI (2011) COSMO-CLM2: a new version of the COSMO-CLM model coupled to the Community Land Model. *Clim Dyn* 37:1889–1907. doi:10.1007/s00382-011-1019-z
- 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 (1996–2014): Regionaler Klimawandel – Klimamodelle im Vergleich. [http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=dwdwww\\_start&T99803827171196328354269gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FHomepage%2FKlimawandel%2FKlimawandel\\_neu\\_Klimasz\\_D\\_node.html%3F\\_nnn%3Dtrue](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_start&T99803827171196328354269gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FHomepage%2FKlimawandel%2FKlimawandel_neu_Klimasz_D_node.html%3F_nnn%3Dtrue). Zugegriffen am 29.04. 2014

Edouard LD, Stöckli R, Jaeger EB, Levis S, Seneviratne SI (2011) COSMO-CLM<sup>2</sup>: a new version of the COSMO-CLM model coupled to the Community Land Model. *Clim Dyn* 37:1889–1907. doi:10.1007/s00382-011-1019-z

Enke W, Schneider F, Deutschländer T (2005) A novel scheme to derive optimized circulation pattern classifications for downscaling and forecast purposes. *Theor Appl Climatol* 82:51–63

Feldmann H, Früh B, Schädler G, Panitz HJ, Keuler K, Jacob D, Lorenz P (2008) Evaluation of the precipitation for south-western Germany from high resolution simulations with regional climate models. *Meteorol Z* 17:455–465. doi:10.1127/0941-2948/2008/0295

Feldmann H, Schädler G, Panitz HJ, Kottmeier Ch (2013) Near future changes of extreme precipitation over complex terrain in Central Europe derived from high resolution RCM ensemble simulations. *Int J Climatol* 33:1964–1977

Feser F, Rockel B, von Storch H, Winterfeldt J, Zahn M (2011) Regional Climate Models Add Value to Global Model Data: A Review and Selected Examples. *Bull Amer Meteor Soc* 92:1181–1192

Früh B, Feldmann H, Panitz H-J, Schädler G, Jacob D, Lorenz P, Keuler K (2010) Determination of Precipitation Return Values in Complex Terrain and Their Evaluation. *J Climate* 23:2257–2274

- Galos B, Hagemann S, Hänsler A, Kindermann G, Rechid D, Sieck K, Teichmann C, Jacob D (2013) Case study for the assessment of the biogeophysical effects of a potential afforestation in Europe. *Carbon Balance Manag* 8:1–12
- 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. doi: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
- Heise E, Lange M, Ritter B, Schrodin R (2003) Improvement and validation of the multilayer soilmodel. *COSMO News* 3:198–203 (<http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/news/Letters/default.htm>)
- Hewitt CD, Griggs DJ (2004) Ensembles-Based Predictions of Climate Changes and Their Impacts (ENSEMBLES). *Eos Trans AGU* 85:566. doi: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, Wolfdt 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
- Hurttt GC, Chini LP, Froking S, Betts RA, Feddema J, Fischer G, Fisk JP, Hibbard K, Houghton RA, Janetos A, Jones CD, Kindermann G, Kinoshita T, Kees Klein Goldewijk, Riahi K, Shevliakova E, Smith S, Stehfest E, Thomson A, Thornton P, van Vuuren DP, Wang YP (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
- Jacob D, Göttel H, Kotlarski S, Lorenz P, Sieck K (2008): Klimaauwirkungen 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, Alias A, Christensen OB, Bouwer LM, Braun A, Colette A, Déqué M, Georgievski G, Georgopoulou E, Gobiet A, Menut L, Nikulin G, Haensler A, Hempelmann N, Jones C, Keuler K, Kovats S, Kröner N, Kotlarski S, Kriegsmann A, Martin E, van Meijgaard E, Moseley C, Pfeifer S, Preuschmann S, Radermacher C, Radtke K, Rechid D, Rounsevell M, Samuelsson P, Somot S, Soussana 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. *Reg Environ Changes* 14:563–578. doi:10.1007/s10113-013-0499-2
- 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>
- Khodayar S, Schädler G (2013) The impact of soil moisture variability on seasonal convective precipitation simulations. Part II: sensitivity to land-surface models and prescribed soil type distributions. *Meteorol Z* 22:507–526
- 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. *Geosci Model Dev* 7:1297–1333
- Kreienkamp F, Baumgart S, Spekat A, Enke W (2011a) Climate Signals on the Regional Scale Derived with a Statistical Method: Relevance of the Driving Model's Resolution. *Atmosphere* 2:129–145
- Kreienkamp F, Spekat A, Enke W (2011b) 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
- 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. doi:10.1007/s00382-008-0384-8
- Meißner C (2008) High-resolution sensitivity studies with the regional climate model COSMO-CLM. Institute of Meteorology and Climate Research, Karlsruhe
- Mieruch S, Feldmann H, Schädler G, Lenz C-J, Kothe S, Kottmeier CH (2013) The regional MikKlip decadal forecast ensemble for Europe. *Geosci Model Dev Discuss* 6:5711–5745. doi:10.5194/gmdd-6-5711-2013
- 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, Manning MR, Rose SK, Vuuren DP van, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant JP, Wilbanks TJ (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747–756
- MPI-M (2006) Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg
- Nikiéma O, Laprise R (2010): Diagnostic budget study of the internal variability in ensemble simulations of the Canadian Regional Climate Model. *Clim Dyn* 36:2313–2337. doi:10.1007/s00382-010-0834-y
- Nikiéma O, Laprise R (2010) Diagnostic budget study of the internal variability in ensemble simulations of the Canadian RCM. *Clim Dyn* 36:2313–2337. doi:10.1007/s00382-010-0834-y
- 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
- Paeth H, Manning B (2012) On the added value of regional climate modeling in climate change assessment. *Clim Dyn* 41:1057–1066. doi:10.1007/s00382-012-1517-7
- Paeth H, Born K, Girmes R, Podzun R, Jacob D (2009) Regional climate change in Tropical and Northern Africa due to greenhouse forcing and land use changes. *J Clim* 22:114–132. doi:10.1175/2008JCLI2390.1
- Pfeifer S, Bülow K, Gobiet A, Hänsler 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
- 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
- Reick C, Raddatz T, Brovkin V, Gayler V (2013) The representation of natural and anthropogenic land cover change in mpi-esm. *J Adv Model Earth Syst* 5:459–482
- Rutter N, Essery R, Pomeroy J, Altimir N, Andreadis K, Baker I, Barr A, Bartlett P, Boone A, Deng H, Douville H, Dutra E, Elder K, Ellis C, Feng X, Gelfan A, Goodbody A, Gusev Y, Gustafsson D, Hellström R, Hirabayashi Y, Hirota T, Jonas T, Koren V, Kuragina A, Lettenmaier D, Li WP, Luce C, Martin E, Nasonova O, Pumpanen J, Pyles D, Samuelsson P, Sandells M, Schädler G, Shmakin A, Smirnova TG, Stähli M, Stöckli R, Strasser U, Su H, Suzuki K, Takata K, Tanaka K, Thompson E, Vesala T, Viterbo P, Wiltshire A, Xia K, Xue Y, Yamazaki T, (2009). Evaluation of forest snow processes models (Snow-MIP2). *J. Geophys. Res.*, 114, D06111, doi: 10.1029/2008JD011063 (18 pp.)
- 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. doi:10.1175/JAM2528.1
- Schoetter R, Hoffmann P, Rechid D, Schlünzen KH (2012) Evaluation and Bias Correction of Regional Climate Model Results Using Model Evaluation Measures. *J Appl Meteor Climatol* 51:1670–1684. doi:10.1007/s00382-011-1019-z
- 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.* doi: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



## Literatur

- 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
- 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
- Spekat A, Kreienkamp F, Enke W (2010) An impact-oriented classification method for atmospheric patterns. *Phys Chem Earth* 35:352–359
- Trail M, Tsimplidi AP, Liu P, Tsigaridis K, Hu Y, Nenes A, Stone B, Russell AG (2013) Potential impact of land use change on future regional climate in the Southeastern U.S.: Reforestation and crop land conversion. *J Geophys Res* 118:11577–11588. doi:10.1002/2013JD020356
- Vautard R, Gobiet A, Jacob D, Belda M, Colette A, Déqué M, Fernández J, García-Díez M, Goergen K, Güttler I, Halenka T, Karacostas T, Katragkou E, Keuler K, Kotlarski S, Mayer S, Meijgaard E, Nikulin G, Patarčić M, Scinocca J, Sobolowski S, Suklitsch M, Teichmann C, Warrach-Sagi K, Wulfmeyer V, You P (2013) The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. *Clim Dyn* 41:2555–2575
- 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. doi:10.1007/s00382-012-1510-1
- Warrach-Sagi K, Schwitalla T, Wulfmeyer V, Bauer HS (2013) Evaluation of a climate simulation in Europe based on the WRF–NOAH model system: precipitation in Germany. Evaluation of a climate simulation in Europe based on the WRF–NOAH model system: precipitation in Germany. *Clim Dyn* 41:755–774. doi:10.1007/s00382-013-1727-7
- 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. doi:10.5194/gmd-7-1093-2014

**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.

Etwasige Abbildungen oder sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmaterial nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.