

# Grenzen und Herausforderungen der regionalen Klimamodellierung

*Andreas Dobler, Hendrik Feldmann, Uwe Ulbrich*

- 5.1 Anforderungen an Modelle – 38
- 5.2 Robustheit der Ergebnisse aus der regionalen Klimamodellierung – 39
- 5.3 Erzeugung und Interpretation von Ensembles – 40
- 5.4 Mehrwert der regionalen Modellierung – 41
- 5.5 Kurz gesagt – 42
- Literatur – 43

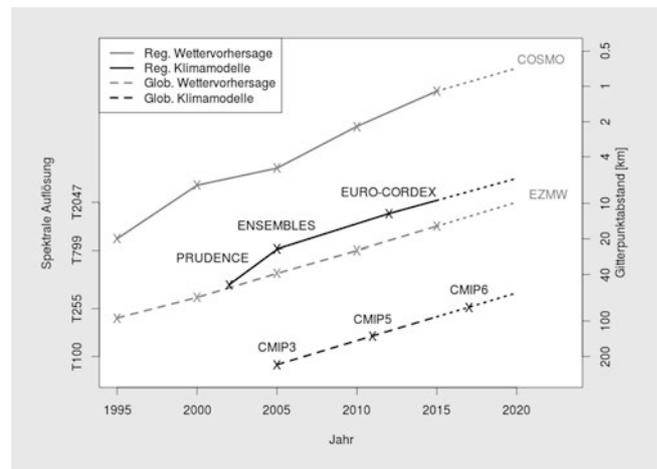
Klimamodelle sind heute gängige Werkzeuge der Klima- und Klimafolgenforschung. Sowohl die globalen als auch die regionalen Klimamodelle entwickeln sich stetig weiter, und die Rechenressourcen nehmen zu. Dadurch haben sich in den vergangenen Jahren die räumliche Auflösung und Zuverlässigkeit von dynamischen Regionalisierungen (regionalen Klimamodellsimulationen mit erhöhter raumzeitlicher Auflösung) deutlich verbessert. Zudem hat sich die Interpretation der Modellergebnisse gewandelt: Basierten die Aussagen einst auf einer einzigen Simulation, liegt heute ein Ensemble von vielen Simulationen zugrunde. Dies erlaubt es, Unsicherheiten abzuschätzen, die sich aus den verschiedenen Möglichkeiten der regionalen Wetterentwicklung bei gleichem überregionalem Antrieb ergeben. Im vorliegenden Abschnitt wird das Potenzial zur Weiterentwicklung der regionalen Klimamodellierung betrachtet, das – z. B. hinsichtlich der Berücksichtigung sehr kleinräumiger Prozesse wie der Wolken- und Niederschlagsbildung – aus der Formulierung der Modellgleichungen oder der Lösung der Modellgleichungen besteht. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die regionalen Klimamodelle von den Randbedingungen abhängig sind, die ihnen vorgegeben werden. Am atmosphärischen Rand des Simulationsgebiets bestimmt das globale Modell die betrachteten Wettersituationen, am unteren Rand sind die extern vorgegebenen Verteilungen der Landnutzung, des Meereises oder der Ozeantemperaturen wichtige Einflussgrößen. Ein Regionalmodell kann Fehler in den vorgegebenen Randbedingungen nicht korrigieren. Allerdings werden Prozesse, die die unteren Randbedingungen innerhalb des Modellgebiets bestimmen, zunehmend auch in Regionalmodellen berücksichtigt. Es gibt also Grenzen und Herausforderungen bei den Anforderungen an die Modelle, bei der Robustheit der Ergebnisse, bei den Ensemblekonstruktionen und dem Mehrwert der Regionalisierungen gegenüber den Globalmodellen.

## 5.1 Anforderungen an Modelle

Ähnlich wie die globalen Wettervorhersage- und Klimamodelle sind die Regionalmodelle in den vergangenen 20 Jahren höher aufgelöst und zuverlässiger geworden. Die regionalen Modelle besitzen eine Auflösung, die jene der globalen Modelle um das 10- bis 15-Fache übersteigt (■ Abb. 5.1). Sie ermöglichen also eine wesentlich detailliertere Darstellung.

Um angesichts der Tatsache, dass die globalen Modelle immer höher aufgelöst werden, weiter einen entsprechenden Nutzen der regionalen Modelle zu gewährleisten, müssen die regionalen Klimamodelle steigende Anforderungen erfüllen. So muss bei einer detaillierteren Simulation auch der Detailgrad der im Modell repräsentierten physikalischen Prozesse und Wechselwirkungen angepasst werden.

Derzeit ist in regionalen Klimamodellen eine Auflösung von etwa 10 km üblich. Für kleinere Regionen in Europa gibt es bereits Klimasimulationen mit einer Auflösung von 1–3 km (Hohenegger et al. 2008; Prein und Gobiet 2011; Suklitsch et al. 2011; Fosser et al. 2015; Ban et al. 2014; Kendon et al. 2014). Bei diesen Auflösungen werden dabei zum Teil klimatische Phänomene simuliert, für die es bisher keine Beobachtungsdaten in der



■ **Abb. 5.1** Entwicklung der Auflösung von Modellen von 1995 bis 2015 und geschätzte Entwicklungen bis 2020 (gepunktet). Grau: Werte für das regionale Wettervorhersagemodell COSMO ([www.cosmo-model.org](http://www.cosmo-model.org)) und für das globale Wettervorhersagemodell des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW, [www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int)). Schwarz: Werte aus den regionalen Klimamodellprojekten PRUDENCE ([www.prudence.dmi.dk](http://www.prudence.dmi.dk)), ENSEMBLES ([www.ensembles-eu.metoffice.com](http://www.ensembles-eu.metoffice.com)) und EURO-CORDEX ([www.euro-cordex.net](http://www.euro-cordex.net)) sowie den globalen Klimamodellvergleichsprojekten CMIP3, CMIP5 und CMIP6 ([www.cmip-pcmdi.llnl.gov](http://www.cmip-pcmdi.llnl.gov)). Kreuze geben die jeweils aktuelle Auflösung zu Beginn der entsprechenden Jahre wieder. Die Linien dienen der Illustration und stellen nicht die konkrete Auflösung in den einzelnen Jahren dar. Nur bei der spektralen Auflösung des EZMW-Modells handelt es sich um exakte Werte. Ferner handelt es sich um ungefähre Werte, da die Umrechnung in km nicht eindeutig ist oder unterschiedliche Koordinatensysteme und Modellauflösungen zum Einsatz kommen

entsprechenden räumlichen und zeitlichen Dichte gibt, wie man sie aber für eine systematische Bewertung benötigt (Rummukainen 2010). Für Extremniederschläge bieten sich mittlerweile die Radarbeobachtungen an, die für qualitative Vergleiche in hoher Auflösung geeignet sein können. Geht es aber um prozessorientierte Studien, z. B. zur regionalen Wasserbilanz, reichen die vorhandenen Beobachtungsdaten höchstens während spezieller Messekampagnen aus (Sasse et al. 2013).

Anders als in den meisten Regionalmodellen vorausgesetzt, ist auf Skalen unterhalb von 10 km das hydrostatische Gleichgewicht – also das Gleichgewicht zwischen der Schwerkraft und dem aus Dichteunterschieden in der Luft resultierenden statischen Auftrieb in der Atmosphäre – nur noch bedingt gültig (Giorgi und Mearns 1999; Steppeler et al. 2003). Hydrostatische Regionalmodelle stoßen hier also an ihre Grenzen. Nur wenige Regionalmodelle wie COSMO-CLM und eine Version von REMO verzichten auf die Annahme des hydrostatischen Gleichgewichts und können vertikal beschleunigte Luftbewegungen simulieren.

Bei jenen regionalen Klimamodellen, die aus Wettervorhersagemodellen abgeleitet sind (► Kap. 4), lässt sich die erhöhte Auflösung meist relativ einfach umsetzen, da die Wettervorhersagemodelle bereits in diese Richtung entwickelt worden sind (■ Abb. 5.1). Während aber bei der Wettervorhersage Wechselwirkungen mit langsam veränderlichen Komponenten des Klimasystems – wie Boden, Vegetation, Gletscher, Ozeanen, Städten oder Aerosolen – nicht oder stark vereinfacht behandelt werden können, erfordern Simulationen auf der Klimazeitkala eine detailliertere Berücksichtigung. Ein Beispiel sind die

Wechselwirkungen zwischen Boden und Atmosphäre in Europa während des Sommers, die das Klima in dieser Jahreszeit entscheidend beeinflussen (Seneviratne et al. 2006; Vautard et al. 2013). Eine unzureichende Behandlung dieser Prozesse in regionalen Modellen kann beim Einsatz auf der Klimazeitskala dazu führen, dass für die Sommermonate Temperatur und Niederschlag im Modell schlechter mit den Beobachtungen übereinstimmen als für die Wintermonate (Kotlarski et al. 2014). Durch die unterschiedlichen Anforderungen auf der Wetter- und Klimazeitskala bezüglich der Wechselwirkungen können regionale Klimamodelle hier nur wenig von den Entwicklungen in der Wettervorhersage profitieren. Vielmehr müssen eigenständige regionale Erdsystemmodelle entwickelt werden, die die zentralen Wechselwirkungen zwischen Boden und Atmosphäre, Ozean und Atmosphäre oder Aerosolen und Wolken berücksichtigen.

Modellrechnungen mit höheren Auflösungen benötigen zudem eine erhöhte Rechenleistung. Im Prinzip führt eine Verdoppelung der Auflösung zu einer 8-fach erhöhten Anzahl von notwendigen Berechnungen (Verdoppelung der Gitterpunkte in Ost-West- und Süd-Nord-Richtung bei halbiertem Zeitschritt). Diese Erfordernisse erfüllen Rechenzentren durch innovative Rechnersysteme. Die damit verbundenen Umstellungen erfordern häufig eine Anpassung der inneren Strukturen und Codes der Regionalmodelle und damit jeweils einen technischen Aufwand.

Weil Regionalmodelle nur einen Gebietsausschnitt behandeln, benötigen sie Antriebsdaten an den Rändern des Modellgebiets (Randbedingungen). Dafür müssen die Daten des jeweils verwendeten Globalmodells dem Regionalmodell auf seiner höheren räumlichen und zeitlichen Auflösung zur Verfügung gestellt werden. Dabei treten grundsätzliche mathematische und physikalische Probleme auf. Ein Effekt, der in diesem Zusammenhang beobachtet wird, ist das Auftreten von Wolken und intensiven Niederschlägen an den Rändern der betrachteten Region, für die es im verwendeten Globalmodell keine Hinweise gibt. Auch wenn sich solche Fehler auf den Randbereich des Regionalmodells beschränken, können sie die Ergebnisse im inneren Modellgebiet beeinflussen (Giorgi und Mearns 1999).

Eine sogenannte Zweigegekopplung hebt den Unterschied zwischen dem angetriebenen Regionalmodell und dem antreibenden Modell teilweise auf, indem das Regionalmodell auch das Globalmodell beeinflusst (Giorgi und Mearns 1999; Rummukainen 2010). Während das globale Modell die Einflüsse von außen auf die Zielregion liefert, bestimmt das regionale Modell die Vorgänge im Innern seines Modellgebiets. Für einige Regionalmodelle wird derzeit eine solche Zweigegekopplung entwickelt. Vor allem für die Darstellung der Sommermonate in Europa könnte es hilfreich sein, dass das Regionalmodell dadurch leichter eigene Zirkulationsstrukturen durchsetzen kann: Im Sommer beeinflussen regionale Prozesse das Klima stärker als im Winter, wenn der großräumige Transport von Luftmassen entscheidender ist (Giorgi und Mearns 1999; Vautard et al. 2013).

## 5.2 Robustheit der Ergebnisse aus der regionalen Klimamodellierung

Viele Untersuchungen haben gezeigt, dass unterschiedliche Regionalmodelle und Modellkonfigurationen den beobachteten Jahresgang und das klimatologische Mittel von Niederschlag, Temperatur und großräumiger Zirkulation über Europa mehrheitlich gut wiedergeben (Giorgi und Mearns 1999; Déqué et al. 2007; Jacob et al. 2007; Kotlarski et al. 2014). Die Regionalmodelle reproduzieren dabei generell die großräumige Zirkulation des antreibenden Globalmodells (Jacob et al. 2007), wobei die Wahl des antreibenden Globalmodells die Simulationen meistens mehr als die Wahl des Regionalmodells beeinflusst. Dies gilt besonders für Simulationen der Temperatur und der Wintermonate. Bei Simulationen von Sommerniederschlägen trägt die Wahl des Regionalmodells ungefähr genauso viel zur Gesamtunsicherheit bei wie das für den Antrieb gewählte Modell.

Die Vielzahl an Möglichkeiten, ein Regionalmodell zu konfigurieren, ist ein Grund für uneinheitliche Modellergebnisse. So kann der Unterschied in der simulierten Temperatur zwischen zwei Konfigurationen desselben Modells genau so groß sein wie zwischen zwei verschiedenen Modellen (Kotlarski et al. 2014). Das betrifft großräumige und langfristige Mittelwerte weniger als die Simulationen von Extremereignissen wie etwa Starkniederschlägen oder Hitzeperioden (Giorgi und Mearns 1999; Rummukainen 2010). Ein Beispiel: Je nach verwendetem Schema zur Modellierung der Konvektion simuliert dasselbe Modell für Europa entweder rund 10 % oder mehr als 25 % Hitzetage im Sommer (Vautard et al. 2013).

Die Position und Ausdehnung des Modellgebiets kann die Modellergebnisse ebenfalls beeinflussen (Giorgi und Mearns 1999). Der Einfluss der Randbedingungen verringert sich jedoch mit zunehmendem Abstand von den Rändern (Giorgi und Mearns 1999; Rummukainen 2010).

Erstellt man Klimaprojektionen auf Basis unterschiedlicher Emissionsszenarien, ergeben sich in den Regionalmodellen entsprechend zu den antreibenden Globalmodellen großräumig – also etwa auf kontinentaler Skala – ähnliche Muster in den Änderungssignalen von Niederschlag und Temperatur. Hauptsächlich unterscheiden sich die Simulationen dabei hinsichtlich der Amplitude der Änderungssignale, je nachdem wie stark das vorgegebene Emissionsszenario ist (Jacob et al. 2014). Dies gilt sowohl für die neueren, nach den RCP-Szenarien ausgeführten Klimaprojektionen als auch für die älteren SRES-basierten Simulationen. Kleinräumig, etwa auf Länderebene, unterscheiden sich die RCP-Simulationen jedoch von den SRES-Simulationen. Dies liegt weniger an den Unterschieden der Emissionsszenarien als u. a. an der höheren Auflösung der RCP-Simulationen und der Weiterentwicklung der Modelle (Jacob et al. 2014; Ban et al. 2014; Kendon et al. 2014). Oft zeigen Regionalmodelle bei steigender Auflösung höhere Niederschlagsmengen (Jacob et al. 2014; Kotlarski et al. 2014), was – je nachdem ob das jeweilige Regionalmodell in gröberer Auflösung ein Niederschlagsdefizit oder einen Überschuss zeigt – zu realistischeren oder unrealistischeren Resultaten führt. Hinsichtlich der Dauer von Hitzeperioden finden Vautard et al. (2013) bei höherer Modellauflösung eine verringerte Überschätzung.

### 5.3 Erzeugung und Interpretation von Ensembles

Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Klimas sind immer mit Unsicherheiten behaftet (Foley 2010). Prinzipiell gibt es vier Gründe für Unsicherheiten im Zusammenhang mit dem Klimawandel:

1. Unsicherheiten, die darauf beruhen, dass wir das Klimasystem mit seinen Wechselwirkungen und Rückkopplungen noch nicht vollständig verstanden haben,
2. Defizite in der numerischen Umsetzung der Klimaprozesse,
3. prinzipielle Unkenntnis der künftigen Entwicklung der äußeren Klimaantriebe (Treibhausgasemissionen, solare Einstrahlung oder große Vulkanausbrüche) und
4. die interne Klimavariabilität auf verschiedenen Zeitskalen, die weitgehend durch natürliche Schwankungen und Rückkopplungen im Klimasystem zustande kommen.

Der Umgang mit den verschiedenen Arten von Unsicherheit unterscheidet sich je nach ihrer Ursache. Die Lücken im Wissen um die Klimaprozesse können durch weitere Forschung reduziert werden. Auch an einer verbesserten Umsetzung des vorhandenen Wissens in den Modellen wird ständig gearbeitet. Hier erleichtert es die weiter steigende Leistungsfähigkeit der Rechnersysteme, zusätzliche Prozesse und komplexere Zusammenhänge berücksichtigen und die Klimaprozesse räumlich besser auflösen zu können. Ein Beispiel sind die Prozesse in Wolken, die von der mikroskopischen Skala (etwa bei den Keimen, an denen sich Wolkentropfen bilden können) bis zur globalen Skala (z. B. in ihrer Wirkung auf die Strahlungsbilanz der Erde) reichen. Bei den Wolkenprozessen gibt es sowohl noch großen Forschungsbedarf als auch Potenzial für eine verbesserte Beschreibung in den Modellen. In globalen Klimamodellen ist die Gitterweite in der Regel größer als eine typische Wolke. Wolken müssen daher parametrisiert, d. h. vereinfacht beschrieben werden. In sehr hoch aufgelösten Regionalmodellen können hingegen viele Eigenschaften der Wolken direkt beschrieben werden. Auf diesem und anderen Gebieten sind daher deutliche Fortschritte zu erreichen.

Die oben unter Punkt 3 und 4 genannten Probleme lassen sich dagegen prinzipiell nicht vollständig beseitigen. Daher spricht man in diesem Zusammenhang auch von Klimaprojektionen und nicht von Klimaprognosen oder Klimavorhersagen. Diese beiden Faktoren führen dazu, dass eine exakte Übereinstimmung der zeitlichen Entwicklung zwischen Klimasimulationen und Beobachtungen nicht erwartet werden kann. Jedoch muss eine Übereinstimmung der statistischen Klimateigenschaften zwischen Modell und Beobachtung das Ziel sein. Die reale Klimaentwicklung wird bestimmte Antriebe und eine bestimmte interne Variabilität aufweisen, die selbst mit idealen Modellen nicht exakt vorherzusagen ist. Für die zukünftige Entwicklung anthropogener Treibhausgase lassen sich bestenfalls plausible Emissionsszenarien der möglichen Entwicklungen angeben. Für andere von außen auf das Klimasystem einwirkende Faktoren (z. B. große Vulkanausbrüche) ist dagegen keine Vorhersage zu Zeitpunkt, Ort und Stärke möglich. Dazu kommt die interne Variabilität des Klimasystems durch natürliche Schwankungen und Rückkopplungen auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen

Skalen. Ein Beispiel hierfür ist etwa das sogenannte „El-Niño/La-Niña“-Phänomen (Latif 2006), bei dem es durch Rückkopplungen zwischen den Passatwinden und den Meeresströmungen im äquatorialen Pazifik in einem mehrjährigen Rhythmus zu Schwankungen des Klimas mit globalen Auswirkungen kommt. Solche natürlichen Schwankungen sind, ähnlich dem Wetter, nur begrenzt vorhersagbar. In den letzten Jahren werden allerdings verstärkt Anstrengungen, basierend auf dem zunehmend besser erfassten aktuellen Zustand des Klimas, unternommen, Klimaprognosen auf der saisonalen bis dekadischen Skala zu erstellen (Meehl et al. 2009), die die Vorhersagbarkeit aus langsamen Prozessen im Klimasystem ausnutzen, etwa aus den Schwankungen von Meeresströmungen und ihren Wechselwirkungen mit der Atmosphäre. Die Unsicherheiten aufgrund dieser internen Schwankungen lassen sich aber aufgrund der chaotischen Komponenten nicht völlig vermeiden. Beim Vergleich von Klimaprojektionen ist also zu erwarten, dass sie unterschiedliche Zeitverläufe der internen Variabilität zeigen, ohne dass das Modell dadurch „falsch“ wäre. Allerdings sollten gute Klimamodelle auch in der Lage sein, diese natürlichen Schwankungen im Prinzip nachzubilden. Deren Schwankungsbreite ist im Verhältnis zum gesuchten Änderungssignal kurz- bis mittelfristig sehr groß. Daher braucht man lange Zeitreihen, um Änderungssignale in Beobachtungen und in den Projektionen mit statistischer Sicherheit nachweisen zu können. Üblicherweise werden Klimakenngrößen als 30-Jahres-Mittelwerte angegeben. Es gibt aber durchaus natürliche Schwankungen des Klimas auf noch längeren Zeitskalen – etwa durch Schwankungen der Meeresströmungen über mehrere Jahrzehnte (Srokosz et al. 2012), die die Klimaänderungssignale überlagern.

Im Idealfall simuliert ein Klimamodell also in einem Rechenlauf eine unter den gegebenen äußeren Antrieben mögliche Klimaentwicklung. Diese wird auch in diesem Idealfall nicht dem Verlauf der realen Klimaentwicklung entsprechen, da wie beim Wetter kleine Abweichungen einen deutlich anderen Verlauf verursachen können. Eine Abhilfe können sogenannte Ensembles von Simulationen bieten, bei denen eine Reihe von Simulationen mit im Rahmen der Unsicherheiten variierten Bedingungen erzeugt wird. Ziel ist es dabei, Aussagen über die Wahrscheinlichkeit oder die wahrscheinliche Bandbreite möglicher Entwicklungen des Klimas unter den getroffenen Annahmen über die äußeren Antriebe zu gewinnen und den Einfluss der Unsicherheitsfaktoren auf die Ergebnisse zu reduzieren.

Ensembles von Modellläufen eines Modells können beispielsweise durch den Start des Modells mit unterschiedlichen Ausgangswerten erzeugt werden (Tebaldi und Knutti 2007). Da sich die verschiedenen Mitglieder des Ensembles in einem gegebenen Zeitraum typischerweise in verschiedenen Phasen der natürlichen Variabilität befinden (Unsicherheitsfaktor 4), kürzt sich dieser Effekt bei der Überlagerung vieler Mitglieder heraus (Anfangswert Ensemble). Ein in allen Simulationen wirkender Anstieg der Treibhausgase bleibt aber erhalten und lässt sich durch die Reduktion der simulierten Variabilität besser als das gesuchte Signal identifizieren.

Ein anderer Ansatz verwendet für eine Reihe von Simulationen verschiedene Konfigurationen eines Klimamodells, die aber im Rahmen der Unsicherheit über die Klimaprozesse und deren Implementierung im Modell realistisch sind. Alternativ

können mehrere verschiedene Klimamodelle verwendet werden (Multimodell-Ensemble). Dadurch lässt sich die Bandbreite der Unsicherheiten abschätzen, die durch die unter 1) und 2) genannten Faktoren verursacht werden.

Die Bandbreite, die auf Unsicherheiten durch äußere Faktoren unter 3), also vor allem die Emissionsszenarien, zurückgeht, kann durch die Verwendung mehrerer Szenarien innerhalb des Ensembles abgeschätzt werden.

Sowohl in der globalen Klimamodellierung (Projekte CMIP5, MIKCLIP) als auch in regionalen Ensembles (Projekte PRUDENCE, ENSEMBLES, EURO-CORDEX) werden ein oder mehrere dieser Ensemblemethoden verwendet (Taylor et al. 2012; van der Linden und Mitchell 2009; Jacob et al. 2014).

Mit der Rechnerleistung und Auflösung der Modelle ist auch die Größe der Ensembles gestiegen (Jacob et al. 2014). Dadurch lassen sich die Unsicherheiten in den Klimaprojektionen und Wahrscheinlichkeitsaussagen zu den Risiken bestimmter Klimaentwicklungen zuverlässiger abschätzen. Verglichen mit Ensembles aus der Wettervorhersage sind die Ensembles der regionalen Klimamodellierung aber weiterhin oft klein bzw. nicht systematisch aufgebaut. Dies kommt daher, dass der Aufwand für das dynamische *downscaling* immer noch sehr groß ist, besonders auch in Bezug auf die anfallenden Datenmengen. So stehen in der Regel nur von wenigen Globalmodellen die notwendigen Antriebsdaten für Regionalmodelle zur Verfügung, da diese die Informationen über den dreidimensionalen Zustand der Atmosphäre in hoher zeitlicher Auflösung (mindestens alle 6h) brauchen. Dadurch kann oft nicht die ganze Spanne der möglichen Entwicklungen (über verschiedene Globalmodelle oder Emissionsszenarien) abgedeckt werden, vor allem nicht mit einer Vielzahl von Regionalmodellen. So setzen sich die Ensembles häufig aus dem zusammen, was verfügbar oder mit dem erzielbaren Aufwand machbar ist.

Jede Stufe einer Modellkette, von den Globalmodellen über die Regionalmodelle bis zu Impaktmodellen, trägt spezifische Beiträge zur Gesamtunsicherheit bei und erhöht den Komplexitätsgrad und die Zahl der notwendigen Simulationen, um ein systematisches Ensemble erzeugen zu können.

Am häufigsten stellt man Ensembleergebnisse über den Ensemblemittelwert dar. Studien zufolge lässt sich damit das Klima oft besser abbilden als mit einzelnen Mitgliedern des Ensembles (Tebaldi und Knutti 2007; Sillmann et al. 2013). Dabei kann man den verschiedenen Ensemblemitgliedern auch eine unterschiedliche Gewichtung geben, etwa nach der Qualität der Ergebnisse von Simulationen bereits vergangener Zeiträume. Dies birgt allerdings das Risiko, dass die Gewichtung zu schlechteren Ergebnissen führt, wenn die Fehlercharakteristik der Modelle nicht sehr genau bekannt ist (Weigel et al. 2010).

Die Bandbreite des Ensembles zeigt gut die Unsicherheiten der Ergebnisse: Eine geringe Bandbreite bedeutet beispielsweise, dass der Ensemblemittelwert eine robuste Schätzung innerhalb des Ensembles ist (Weigel 2011). Eine weitere Information bietet die Einheitlichkeit der zeitlichen Entwicklung innerhalb eines Ensembles: Zeigen viele Ensemblemitglieder eine gemeinsame Tendenz, kann daraus geschlossen werden, dass das Ergebnis gegenüber den oben genannten Unsicherheiten – wie etwa der natürlichen Variabilität – robust ist (Feldmann et al. 2013). Al-

erdings muss dabei gewährleistet sein, dass das verwendete Ensemble die Spannweite der Unsicherheiten angemessen abdeckt.

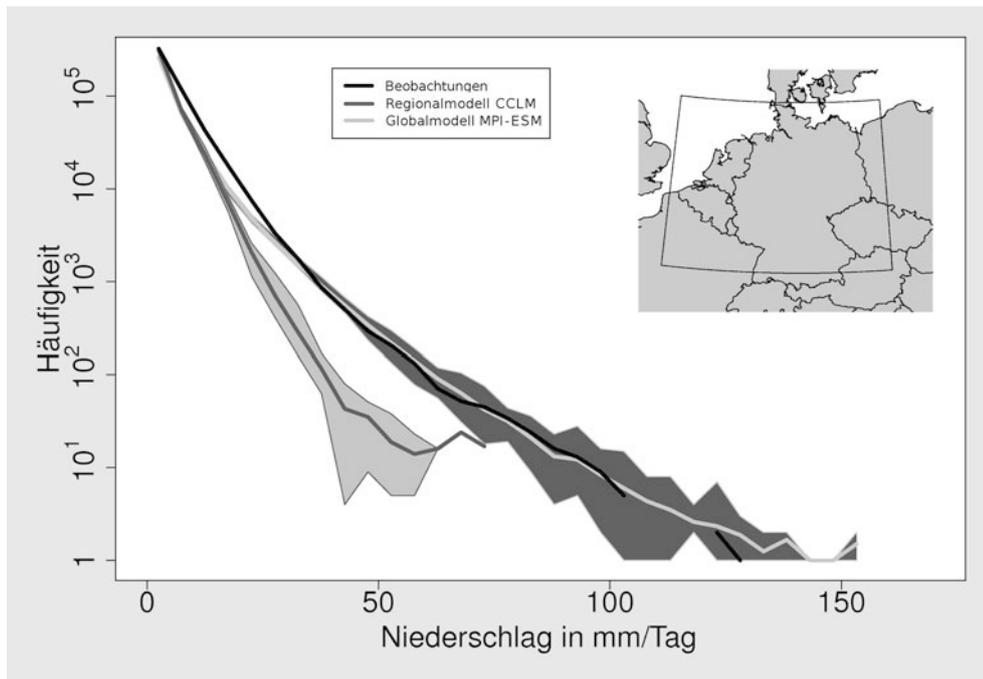
Zusätzlich zur Änderung von Mittelwerten kann sich auch die Schwankungsbreite der jahreszeitlichen bis mehrjährigen Variabilität des Klimas ändern. Auch hierfür werden Ensembles von Klimasimulationen eingesetzt, um die Datenbasis der Untersuchungen zu vergrößern. Eine Änderung der zeitlichen Variabilität wirkt sich deutlich auf die Häufigkeit von Extremereignissen aus. So weisen Beobachtungen und Modellsimulationen auf eine Zunahme der Schwankungsbreite in Mitteleuropa hin (Schär et al. 2004), was mit einer höheren Wahrscheinlichkeit sowohl von Trockenperioden als auch Starkregen verbunden ist. Oft ändern sich die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Extremen wie z. B. die Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen (Frei et al. 2006) oder die Anzahl von Hitzetagen, anders als die entsprechenden mittleren Klimaparameter wie etwa mittlerer Niederschlag oder mittlere Temperatur (Fischer et al. 2014). Die hohe zeitliche und räumliche Auflösung der regionalen Klimamodelle erlaubt dabei auch eine Einschätzung von kurzzeitigen und kleinräumigen Extremereignissen. Statistisch signifikante Ergebnisse verlangen jedoch wegen des schlechteren Signal-zu-Rausch-Verhältnisses eine große Zahl von Ensemblemitgliedern.

## 5.4 Mehrwert der regionalen Modellierung

Viele Nutzer der Daten von Klimamodellen interessieren sich weniger für weltweite Änderungen wie etwa der globalen Mitteltemperatur als für das regionale oder lokale Klima: Wie ändert sich das Klima in „meiner“ Region? Prinzipiell decken auch globale Modelle jede beliebige Region der Erde ab. Was ist also der Mehrwert der regionalen Modellierung, der den zusätzlichen Aufwand rechtfertigt?

Der Mehrwert der Regionalisierung ist besonders dort zu erwarten, wo es zu einer regionalen Beeinflussung von Klimakenngrößen kommt (Feser et al. 2011). Neben der besseren räumlichen Wiedergabe kann die Regionalisierung aber auch dazu führen, dass überregionale Mittelwerte von Temperatur, Niederschlag und anderen Kenngrößen besser dargestellt werden als in den Globalmodellen (Feser 2006; Diaconescu und Laprise 2013; Di Luca et al. 2013). In solchen Fällen kann mit der Zweizeigekopplung (► Abschn. 5.1) in relevanten Regionen der Mehrwert der regionalen Modellierung an die globalen Modelle zurückgegeben werden. Beispiele solch regionaler Einflüsse auf das großräumige Klimageschehen sind Land-See-Windzirkulation an Küsten, Über- oder Umströmen von Gebirgen mit unterschiedlichen Niederschlägen auf der Luv- und der Leeseite oder die regional unterschiedliche Beschaffenheit des Erdbodens wie etwa durch Felder-, Wälder- oder städtische Bebauung.

Für Europa stellen die Alpen eine relevante Barriere für die großräumigen Strömungen dar und beeinflussen damit das Wetter: Sie sorgen etwa für Föhn oder verstärkte Niederschläge auf der Luvseite, also der dem Wind zugewandten Seite. Auch an der Entwicklung extremer Niederschläge in Deutschland sind die Alpen beteiligt (Mudelsee et al. 2004). Solche Starkregen führten in den vergangenen Jahren zu großen Überflutungen an Elbe, Oder und Donau (Schröter et al. 2013). Um solche me-



■ **Abb. 5.2** Intensitätsverteilung des täglichen Niederschlags in Mitteleuropa (siehe Kartenausschnitt) von 2001–2010. Die Häufigkeit gibt dabei die Anzahl der Ereignisse an, an denen im Zeitraum 2001–2010 an einem beliebigen Modellgitterpunkt innerhalb der ausgewählten Region eine Niederschlagsintensität überschritten wurde. *Schwarz:* Beobachtungsdaten mit einer Auflösung von 25 km (Datensatz E-OBS, Haylock et al. 2008). *Hellgrau:* Globalmodell MPI-ESM, Auflösung etwa 200 km, Ensemble mit neun Realisierungen, Ensemblemittel und Bandbreite. *Dunkelgrau:* Regionalmodell COSMO-CLM, Auflösung 25 km, Ensemble durch dynamische Regionalisierung der neun Simulationen mit dem Globalmodell MPI-ESM

eteorologischen Situationen und ihren Einfluss auf Wetter und Klima wiedergeben zu können, braucht man regionale Modelle mit einer höheren Auflösung, als die Globalmodelle sie derzeit leisten können (Schlüter und Schädler 2010). Auch die Mittelgebirge beeinflussen das regionale Klima spürbar: Schwarzwald und Vogesen kanalisieren die Luftmassen im Rheintal. Auf der Luvseite der Mittelgebirge entstehen stärkere Niederschläge, auf der Leeseite – vom Wind abgewandt – dagegen schwächere Niederschläge. Will man in Impaktstudien z. B. die Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Wasserflüsse in Flusseinzugsgebieten untersuchen, müssen diese Vorgänge räumlich gut wiedergegeben werden. Dafür braucht man eine hohe Auflösung, die Globalmodelle nicht bieten. Die Regionalisierung reduziert dann den Sprung zwischen der Auflösung des antreibenden Globalmodells und jener Auflösung, in der die Klimafolgen untersucht werden sollen. Heutige Regionalmodelle zeigen bereits gut, wie sich Niederschläge verteilen (Berg et al. 2013). So werden in Ott et al. (2013) mehrere hydrologische Modelle zur Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene kleinere bis mittlere Flusseinzugsgebiete verwendet. Die globalen Modelle, die als Antrieb für das Ensemble verwendet werden, haben eine Auflösung von mindestens 200 km. Um die meteorologische Variabilität in den topografisch stark strukturierten Einzugsgebieten (Ruhr, Mulde, Ammer) wiedergeben zu können, wurden zwei Regionalmodelle mit einer Auflösung von ca. 7 km für eine Regionalisierung des globalen Antriebs verwendet. Allerdings arbeiten Impaktmodelle häufig mit Gitterweiten von einigen zehn bis zu einigen hundert Metern – immer noch deutlich feiner aufgelöst als in den am höchsten aufgelösten Regionalmodellen. Auch erfüllen dynamische Regionalmodelle oft noch nicht die sehr hohen Ansprüche von Anwendungsmodellen an die Wiedergabe der meteorologischen Eingangsdaten. So brauchen hydrologische Modelle – als Beispiel solcher Anwendungsmodelle – nicht nur Niederschlagsinformationen, sondern auch Daten

wie Temperatur, Feuchte und Wind in hoher Genauigkeit, um die Wasserbilanz in einem Einzugsgebiet richtig beschreiben zu können. Um dieses Problem zu umgehen, findet oft eine Korrektur der Modellergebnisse mithilfe von Beobachtungen statt (Berg et al. 2012) (s. auch ► Kap. 4).

Regionale Simulationen verbessern besonders die Beschreibung der Niederschläge im Sommer, weil dann kleinskalige Vertikalbewegungen in der Atmosphäre die Niederschlagsbildung wesentlich beeinflussen (Feldmann et al. 2008). Globalmodelle können diese nicht ausreichend auflösen. Winterniederschläge sind in den mittleren Breiten hingegen stärker von großräumigen Wettersystemen geprägt, die die Globalmodelle bereits gut wiedergeben. Bei Starkniederschlägen spielen ebenfalls kleinräumige Vorgänge eine große Rolle. Globalmodelle können aber Häufigkeiten von Extremereignissen nicht gut darstellen: Extreme Niederschläge mit mehr als 50 mm pro Tag treten in Globalmodellen deutlich seltener auf als beobachtet. Dagegen können Regionalmodelle mit Gitterweiten unter 25 km die Häufigkeitsverteilung der täglichen Niederschläge deutlich besser wiedergeben (■ Abb. 5.2; Berg et al. 2013). Simulationen im Projekt EURO-CORDEX zeigen: Erhöht man die Auflösung der Regionalmodelle von 50 auf 12,5 km, passen die Modellergebnisse sowohl hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Niederschläge als auch der räumlichen Variabilität über Deutschland besser zu den Beobachtungen (Prein et al. 2015).

## 5.5 Kurz gesagt

Die regionale Klimamodellierung steht vor Herausforderungen. Da in den kommenden Jahren eine Gitterauflösung von weniger als 10 km üblich sein wird, werden hydrostatische Regionalmodelle an ihre Grenzen stoßen und durch nichthydrostatische Modelle abgelöst werden. Derzeit treibt die Forschung die Mo-

## Literatur

dellentwicklung in mehrere Richtungen voran: Beispielsweise wird an der Entwicklung regionaler Erdsystemmodelle und der Zweigegekopplung an Globalmodelle gearbeitet. Auch die informationstechnologische Seite der Klimamodellierung steht vor großen Herausforderungen: Die Anpassung jener regionalen Klimamodelle, die nicht aus Modellen der Wettervorhersage abgeleitet sind, an die sich ändernden Computersysteme ist zum Teil sehr aufwendig. Aus heutiger Sicht wird eine solche Anpassung aber notwendig sein, um die zügige Weiterentwicklung von Modellauflösung, Ensemblegröße und Modellkomplexität zu gewährleisten. Nicht zuletzt müssen für die Validierung der Modelle entsprechend hoch aufgelöste und dabei flächenhaft verfügbare Daten bereitgestellt werden. Dies ist für einige Regionen und Parameter (z. B. Radardaten für Wolken und Niederschlag) heute schon realisierbar oder in greifbarer Nähe. Eine weitergehende Überprüfung im Sinne einer Evaluation verlangt dagegen eine Weiterentwicklung der Beobachtungsnetze.

## Literatur

- Ban N, Schmidli J, Schär C (2014) Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119(13):7889–7907. doi:10.1002/2014JD021478
- Berg P, Feldmann H, Panitz H-J (2012) Bias correction of high resolution RCM data. *J Hydrol* 448–449:80–92
- 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
- Déqué M, Rowell DP, Lüthi D, Giorgi F, Christensen JH, Rockel B, Jacob D, Kjellström E, De Castro M, van den Hurk B (2007) An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Clim Chang* 81(1):53–70
- Diaconescu EP, Laprise R (2013) Can added value be expected in RCM-simulated large scales? *Clim Dyn* 41:1789–1800. doi:10.1007/s00382-012-1649-9
- 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. *Meteorologische Zeitschrift* 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 (2006) Enhanced Detectability of Added Value in Limited-Area Model Results Separated into Different Spatial Scales. *Mon Wea Rev* 134:2180–2190
- Feser F, Rockel B, Storch H von, Winterfeldt J, Zahn M (2011) Regional Climate Models add Value to Global Model Data: A Review and selected Examples. *Bull Am Met Soc* 92:1181–1192. doi:10.1175/2011BAMS3061.1
- Fischer AM, Keller DE, Liniger MA, Rajczak J, Schär C, Appenzeller C (2014) Projected changes in precipitation intensity and frequency in Switzerland: a multi-model perspective. *Int J of Climatol* 35(11):3204–3219. doi:10.1002/joc.4162
- Foley AM (2010) Uncertainty in regional climate modelling: A review. *Progress in Physical Geography* 34(5):647–670. doi:10.1177/0309133310375654
- Fosser G, Khodayar S, Berg P (2015) Improving physical consistency for convective precipitation through cloud-resolving climate model simulations. *Clim Dyn* 44:45–60. doi:10.1007/s00382-014-2242-1
- Frei C, Schöll R, Fukutome S, Schmidli J, Vidale PL (2006) Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *J Geophys Res* 111(D6):D06105. doi:10.1029/2005JD005965
- Giorgi F, Mearns LO (1999) Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *J Geophys Res: Atmospheres* 104(D6):6335–6352
- Haylock MR, Hofstra N, Klein Tank AMG, Klok EJ, Jones PD, New M (2008) A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J Geophys Res (Atmospheres)* 113:D20119. doi:10.1029/2008JD10201
- Hohenegger C, Brockhaus P, Schär C (2008) Towards climate simulations at cloud-resolving scales. *Meteorologische Zeitschrift* 17(4):383–394. doi:10.1127/0941-2948/2008/0303
- Jacob D, Barring L, Christensen OB, Christensen JH, de Castro M, Déqué M, Giorgi F, Hagemann S, Lenderink G, Rockel B, Sanchez E, Schär C, Seneviratne SI, Somot S, van Ulden A, van den Hurk B (2007) An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. *Clim Chang* 81(1):31–52
- 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, Meijgaard E, Moseley C, Pfeifer S, Preuschmann S, Radermacher C, Radtke K, Rechid D, Rounsevell M, Samuelsson P, Somot S, Soussana JF, Teichmann C, Valentini R, Vautard R, Weber B, Yiou P (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Env Change* 14(2):563–578. doi:10.1007/s10113-013-0499-2
- Kendon EJ, Roberts NM, Fowler HJ, Roberts MJ, Chan SC, Senior CA (2014) Heavier summer downpours with climate change revealed by weather forecast resolution model. *Nature Climate Change* 4:570–576. doi:10.1038/nclimate2258
- 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 Mod Dev Discus* 7(1):217–293
- Latif M (2006) Das El Niño/Southern Oscillation-Phänomen. *promet* 32(3/4):123–129
- Linden P van der, Mitchell JFB (2009) ENSEMBLES: Climate Change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Technical report, Met Off Hadley Cent, Exeter, UK 56(2):167–189. doi:10.5697/oc.56-2.167
- Luca A di, Elía R, Laprise R (2013) Potential for small scale added value of RCM's downscaled climate change signal. *Clim Dyn* 40(3–4):601–618
- Meehl GA, Goddard L, Murphy J, Stouffer RJ, Boer G, Danabasoglu G, Dixon K, Giorgetta MA, Greene A, Hawkins E, Hegerl G, Karoly D, Keenlyside N, Kimoto M, Kirtman B, Navarra A, Pulwarty R, Smith D, Stammer D, Stockdale T (2009) Decadal prediction: can it be skillful? *Bull Am Met Soc* 90:1467–1485
- Mudelsee M, Börngen M, Tetzlaff G, Grünwald U (2004) Extreme floods in central Europe over the past 500 years: Role of cyclone pathway „Zugstrasse Vb“. *J Geophys Res* 109:D23101. doi:10.1029/2004JD005034
- Ott I, Dühmann D, Liebert J, Berg P, Feldmann H, Ihringer J, Kunstmann H, Merz B, Schädler G, Wagner S (2013) High-Resolution Climate Change Impact Analysis on Medium-Sized River Catchments in Germany: An Ensemble Assessment. *J Hydrometeorol* 14:1175–1193
- Prein AF, Gobiet A (2011) NHCM-1: Non-hydrostatic climate modelling. Part I: Defining and Detecting Added Value in Cloud Resolving Climate Simulations. *Sci Rep*, Bd. 39. Wegener Center Verlag, Graz, Austria, S 74 ([http://www.uni-graz.at/igam7www\\_prein\\_gobiet\\_2011\\_02\\_nhcm1\\_part-i\\_added\\_value\\_of\\_crcls.pdf](http://www.uni-graz.at/igam7www_prein_gobiet_2011_02_nhcm1_part-i_added_value_of_crcls.pdf))
- Prein AF, Gobiet A, Truhetz H, Keuler K, Görden K, Teichmann C, Maule CF, Meijgaard E van, Déqué M, Grigory N, Vautard R, Kjellström E, Colette A (2016) Precipitation in the EURO-CORDEX 0.11° and 0.44° simulations: High resolution, High benefits? *Clim Dyn* 46(1):383–412. doi:10.1007/s00382-015-2589-y
- Rummukainen M (2010) State-of-the-art with regional climate models. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Clim Chang* 1(1):82–96
- Sasse R, Schädler G, Kottmeier CH (2013) The Regional Atmospheric Water Budget over Southwestern Germany under Different Synoptic Conditions. *J Hydrometeorol* 14(1):69–84. doi:10.1175/JHM-D-11-01110.1
- Schär C, Vidale PL, Lüthi D, Frei C, Häberli C, Liniger MA, Appenzeller C (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427(6972):332–336

- Schlüter I, Schädler G (2010) Sensitivity of Heavy Precipitation Forecasts to Small Modifications of Large-Scale Weather Patterns for the Elbe River. *J Hydrometeorol* 11:770–780
- Schröter K, Mühr B, Elmer F, Kunz-Plapp T, Trieselmann W (2013) Juni-Hochwasser 2013 in Mitteleuropa – Fokus Deutschland – Bericht 1 Update 2: Vorbedingungen, Meteorologie, Hydrologie. CEDIM Forensic Disaster Analysis Group (FDA): pp 13. [https://www.cedim.de/download/FDA\\_Juni\\_Hochwasser\\_Bericht1.2.pdf](https://www.cedim.de/download/FDA_Juni_Hochwasser_Bericht1.2.pdf)
- Seneviratne SI, Lüthi D, Litschi M, Schär C (2006) Land–atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature* 443(7108):205–209
- Sillmann J, Kharin VV, Zhang X, Zwiers FW, Bronaugh D (2013) Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. *J Geophys Res* 118:1716–1733. doi:10.1002/jgrd.50203
- Srokosz M, Baringer M, Bryden H, Cunningham S, Delworth T, Lozier S, Marotzke J, Sutton R (2012) Past, Present and Future Changes in the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Bull Am Met Soc* 93(11):1663–1676
- Steppeleer J, Doms G, Schättler U, Bitzer HW, Gassmann A, Damrath U, Gregoric G (2003) Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM. *Meteor Atmos Phys* 82(1–4):75–96
- Suklitsch M, Prein AF, Truhetz H, Gobiet A (2011) NHCM-1: Non-hydrostatic climate modelling. Part II: Current state of selected cloud-resolving regional climate models and their error characteristics. *Sci Rep*, Bd. 40. Wegener Center Verlag, Graz, Austria, S 90 ([http://www.uni-graz.at/igam7www\\_suklitsch\\_et\\_al\\_2011\\_02\\_nhcm1\\_part-ii\\_error\\_characteristics\\_of\\_lcms.pdf](http://www.uni-graz.at/igam7www_suklitsch_et_al_2011_02_nhcm1_part-ii_error_characteristics_of_lcms.pdf))
- Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA (2012) An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Am Met Soc* 93:485–498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- Tebaldi C, Knutti R (2007) The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Phil Trans R Soc A* 365(1857):2053–2075. doi:10.1098/rsta.2007.2076
- 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, Yiou P (2013) The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. *Clim Dyn* 41(9–10):2555–2575. doi:10.1007/s00382-013-1714-z
- Weigel AP (2011) Verifikation von Ensemblevorhersagen. *PROMET* 37(3/4):31–41
- Weigel AP, Knutti R, Liniger M, Appenzeller C (2010) Risks of Model Weighting in Multimodel Climate Projections. *Journal of Climate* 23(15):4175–4191. doi:10.1175/2010JCLI3594.1

**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.

Etwaige 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.