

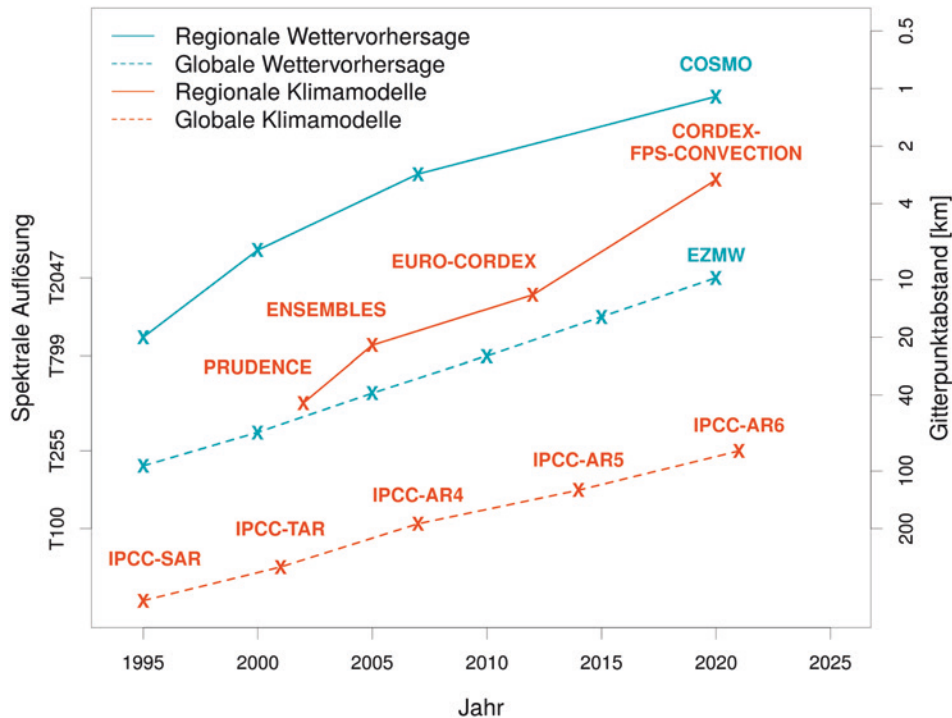


# Grenzen und Herausforderungen der regionalen Klimamodellierung

*Andreas Dobler, Hendrik Feldmann, Edmund Meredith und Uwe Ulbrich*

## Inhaltsverzeichnis

- 5.1 Mehrwert der regionalen Modellierung – 49
- 5.2 Anforderungen an Modelle – 50
- 5.3 Robustheit der Ergebnisse aus der regionalen Klimamodellierung – 51
- 5.4 Erzeugung und Interpretation von Ensembles – 52
- 5.5 Kurz gesagt – 53
- Literatur – 53



■ **Abb. 5.1** Exemplarische Entwicklung der räumlichen Auflösung<sup>1</sup> von Modellen seit 1995. Blau: Werte für das regionale Wettervorhersagemodell COSMO und für das globale Wettervorhersagemodell des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW). Rot: Werte aus den regionalen Klimamodellprojekten PRUDENCE, ENSEMBLES, EURO-CORDEX und CORDEX-FPS-*Convection* sowie den globalen Klimamodellen, die in den unterschiedlichen Sachstandsberichten des IPCC verwendet werden. Kreuze geben die jeweils aktuelle Auflösung in den entsprechenden Jahren wieder, wobei die Termine oft nicht eindeutig festzulegen sind. Die Linien dienen der Illustration und stellen nicht die konkrete Auflösung in den einzelnen Jahren dar. Nur bei der räumlichen Auflösung des EZMW-Modells („spektrale Auflösung“, angegeben auf der linken senkrechten Achse) handelt es sich um exakte Werte. Bei den anderen Modellen und der Umrechnung in km (rechte senkrechte Achse) handelt es sich um ungefähre Werte, da die Werte nicht eindeutig sind oder unterschiedliche Koordinatensysteme und Modellauflösungen zum Einsatz kommen.

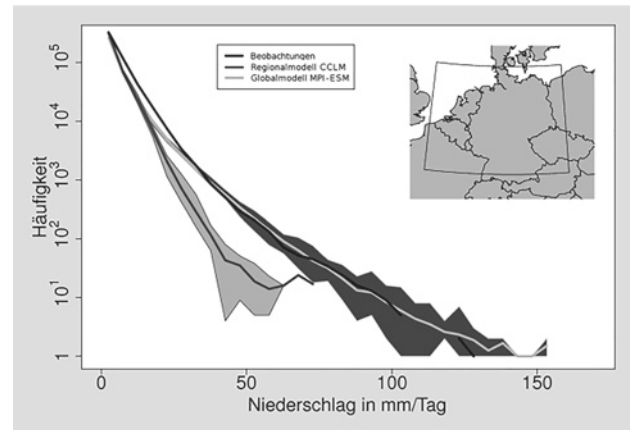
Klimamodelle sind gängige Werkzeuge der Klima- und Klimafolgenforschung. Sowohl die globalen als auch die regionalen Klimamodelle entwickeln sich stetig weiter und die Rechenressourcen nehmen zu. Dadurch haben sich in den vergangenen Jahren die räumliche Auflösung und Zuverlässigkeit von dynamischen Regionalisierungen (d. h. regionale 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 meist ein Ensemble von vielen Simulationen zugrunde. Dies erlaubt es, Wahrscheinlichkeiten der Modellergebnisse abzuschätzen. 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 Verteilung der Landnutzung, des Meereises oder der Ozeantemperaturen wichtige Einflussgrößen. Ein Regionalmodell kann Fehler in diesen Randbedingungen nicht korrigieren.

Grundsätzlich gibt es Grenzen und Herausforderungen in der regionalen Klimamodellierung bei dem Mehrwert gegenüber Globalmodellen, bei den Anforderungen an die Modelle sowie bei der Robustheit der Ergebnisse und bei der Konstruktion von Ensembles. Auf all diese Punkte wird im vorliegenden Kapitel eingegangen. Es wird auch das Potenzial zur Weiterentwicklung der regionalen Klimamodellierung betrachtet. Beispiele hierfür sind die Berücksichtigung sehr kleinräumiger Prozesse wie der Wolken- und Niederschlagsbildung oder von Prozessen, die die unteren Randbedingungen innerhalb des Modellgebiets bestimmen. Weitere Entwicklungsmöglichkeiten bietet der Bereich der Ensemblekonstruktion. Wie in ▶ Abschn. 4.1 erwähnt, können hier statistische Regionalisierungen eine zusätzliche Methode darstellen, um mit vergleichsweise geringem Rechenaufwand ein größeres Ensemble von regionalen Entwicklungen zu erzeugen und somit Wahrscheinlichkeiten zukünftiger Entwicklungen besser abzuschätzen.

<sup>1</sup> Quellen: ▶ [www.cosmo-model.org](http://www.cosmo-model.org), ▶ [www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int), ▶ [www.prudence.dmi.dk](http://www.prudence.dmi.dk), ▶ [www.ensembles-eu.metoffice.com](http://www.ensembles-eu.metoffice.com), ▶ [www.euro-cortex.net](http://www.euro-cortex.net), ▶ [www.hymex.org/cordexfps-convection](http://www.hymex.org/cordexfps-convection), ▶ <https://archive.ipcc.ch>

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



## 5.1 Mehrwert der regionalen Modellierung

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

Ähnlich wie die globalen Wettervorhersage- und Klimamodelle haben die regionalen Modelle in den vergangenen 25 Jahren eine deutlich höhere Auflösung erreicht und sind zuverlässiger geworden. Sie besitzen momentan eine Auflösung, die jene der globalen Modelle um das 10- bis 15-Fache übersteigt (■ Abb. 5.1). Das ermöglicht eine genauere und detailliertere Darstellung von Prozessen und führt somit zu einem möglichen Mehrwert.

Grundsätzlich ist ein Mehrwert besonders dort zu erwarten, wo kleinräumige Aspekte oder Prozesse einen starken Einfluss haben (Feser et al. 2011). Für Europa stellen z. B. die Alpen eine relevante Barriere für die großräumigen Strömungen dar und beeinflussen damit das Wetter: Sie sorgen etwa für verstärkte Niederschläge auf der dem Wind zugewandten Seite (Luv) oder für Föhn auf der abgewandten Seite (Lee). Auch an der Entwicklung extremer Niederschläge in Deutschland sind die Alpen beteiligt (Mudelsee et al. 2004). Solche, durch das Höhenprofil verursachte, Starkniederschläge führten in den vergangenen Jahren zu Überflutungen an Elbe, Oder und Donau (Schröter et al. 2013). Auch die Mittelgebirge beeinflussen das regionale Klima spürbar: Schwarzwald und Vogesen kanalisieren die Luftmassen im Rheintal. Auf der Luvseite der Mittelgebirge entstehen stärkere, auf der Leeseite dagegen schwächere Niederschläge. Werden in Klimafolgenstudien die Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Wasserflüsse in Flusseinzugsgebieten untersucht, müssen diese Vorgänge räumlich gut wiedergegeben werden. Die dafür

benötigte hohe Auflösung bieten Globalmodelle selten (Schlüter und Schädler 2010; Demory et al. 2020). Dies gilt insbesondere für Sommerniederschläge, da bei Starkniederschlägen kleinräumige Vorgänge eine große Rolle spielen. Winterniederschläge sind in den mittleren Breiten von großräumigen Wettersystemen geprägt, die in Globalmodellen bereits gut wiedergegeben sind.

Neben der besseren räumlichen Wiedergabe kann eine Regionalisierung dazu führen, dass auch überregionale Mittelwerte von Temperatur, Niederschlag und anderen Kenngrößen besser dargestellt werden als in Globalmodellen (Feser 2006; Diaconescu und Laprise 2013; Di Luca et al. 2013). Beispielsweise treten extreme Niederschläge mit mehr als 50 mm pro Tag in Globalmodellen deutlich seltener auf als in den Beobachtungen (■ Abb. 5.2). Regionalmodelle mit Gitterweiten unter 25 km können die Häufigkeitsverteilung der täglichen Niederschläge deutlich besser wiedergeben (■ Abb. 5.2; Heikkilä et al. 2011; Berg et al. 2013). Sie verbessern besonders die Sommerniederschläge, da hierbei kleinskalige Vertikalbewegungen in der Atmosphäre die Niederschlagsbildung wesentlich beeinflussen (Feldmann et al. 2008). Simulationen im Projekt EURO-CORDEX (Jacob et al. 2020) zeigen zudem: Erhöht man die Auflösung der Regionalmodelle von 50 km 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, selbst wenn die Ergebnisse von 12,5 km auf 50 km interpoliert werden (Prein et al. 2016; Berg et al. 2013).

Obwohl also aktuelle Regionalmodelle einen Mehrwert gegenüber Globalmodellen bieten, weisen sie immer noch Mängel auf, die nicht übersehen werden dürfen. Diese Mängel sind am auffälligsten bei Niederschlagsereignissen, insbesondere bei extremem und konvektivem Niederschlag. Sie stammen hauptsächlich von der Art, wie Konvektion behandelt wird (Dirmeier et al. 2012; Vergara-Temprado 2020). Derzeit ist

in regionalen Klimamodellen eine Auflösung von etwa 10 km üblich (z. B. Jacob et al. 2014; Kotlarski et al. 2014). Diese Auflösungen ist zu grob, um konvektive Prozesse aufzulösen. Daher muss die Konvektion parametrisiert, d. h. vereinfacht beschrieben werden. Modelle mit parametrisierter Konvektion tendieren jedoch dazu, zu viel leichten Niederschlag zu simulieren (Berg et al. 2013). Darüber hinaus zeigen sie einen Tageslauf mit zu frühem Niederschlagsmaximum (Brockhaus et al. 2008) und Starkniederschlagsereignisse, die zu andauernd und großflächig, jedoch auf kleiner Skala nicht intensiv genug sind (Kendon et al. 2012).

Mit der stetig wachsenden Rechenleistung ist es möglich geworden, die Auflösung der Regionalmodelle so weit zu erhöhen, dass hochreichende Konvektionsprozesse explizit simuliert werden können (z. B. Ban et al. 2014; Kendon et al. 2014; Fosser et al. 2015; Leutwyler et al. 2017; Berthou et al. 2020; Coppola et al. 2019; Lind et al. 2020). Diese sogenannten „konvektionserlaubenden“ Modelle mit einer Gitterauflösung von rund 4 km oder weniger (Prein et al. 2015) bieten eine vielversprechende Möglichkeit, diesbezügliche Modellmängel zu beseitigen. Bisherige Studien zeigen, dass konvektionserlaubende Modelle den zeitlichen Versatz des sommerlichen Tagesniederschlagsmaximums reduzieren (z. B. Hohenegger et al. 2008; Ban et al. 2014; Fosser et al. 2015; Lind et al. 2020), stündlichen Niederschlag und konvektive Objekte realistisch simulieren (Brisson et al. 2018; Armon et al. 2020; Knist et al. 2020) und insbesondere, höhere, und damit realistischere, Extremniederschlagsintensitäten produzieren (Piazza et al. 2019; Adinolfi et al. 2021). Weitere resultierende Verbesserungen betreffen die Darstellung von Starkwind (Schaaf et al. 2018), vertikaler Durchmischung der Atmosphäre, Wolkenbedeckung und Strahlungsflüssen (Hentgen et al. 2019).

Bei konvektionserlaubenden Simulationen werden zum Teil meteorologische Phänomene simuliert, für die es kaum flächendeckende Beobachtungsdaten in der entsprechenden räumlichen und zeitlichen Dichte gibt, um eine systematische Bewertung zu ermöglichen (Prein et al. 2015). Für prozessorientierte Studien, z. B. zur regionalen Wasserbilanz, reichen die insgesamt vorhandenen Beobachtungsdaten höchstens während spezieller Messkampagnen aus (Sasse et al. 2013). Dies gilt besonders auf der substündlichen Zeitskala, welche für hydrologische und andere Anschlussmodelle von großem Interesse ist. Die wenigen existierenden Auswertungen zu substündlichen Niederschlägen zeigen jedoch Resultate von vergleichbarer Qualität wie auf der stündlichen Zeitskala (Meredith et al. 2020; Vergara-Teprado et al. 2021). Für Extremniederschläge bieten sich die Daten der Radarnetze an, die für qualitative Vergleiche in hoher Auflösung geeignet sein können (Lengfeld et al. 2020). Deren quantitative Auswertung ist aber durch den Einfluss systemisch bedingter Ab-

weichungen beschränkt (z. B. Jacobi und Heistermann 2016). Eine weitere Quelle hochaufgelöster Beobachtungsdaten stellt das WegenerNet<sup>2</sup> in der Feldbachregion in Österreich dar (Fuchsberger et al. 2022).

## 5.2 Anforderungen an Modelle

Regionale Modelle werden immer höher aufgelöst, damit steigen die Anforderungen. So muss bei einer detaillierteren Simulation der Detailgrad der im Modell repräsentierten physikalischen Prozesse und Gegebenheiten angepasst werden. Gegenüber Globalmodellen besitzen Regionalmodelle den Nachteil, dass sie zahlreiche für das Klimasystem wichtige Komponenten, wie z. B. Ozeane, Aerosole oder Vegetation, nicht dynamisch in einem gekoppelten System modellieren. Um angesichts der Tatsache, dass die globalen Modelle ebenfalls immer höher aufgelöst werden, weiter einen Mehrwert der regionalen Modelle zu gewährleisten, müssen eigenständige regionale Erdsystemmodelle entwickelt werden, die die zentralen Wechselwirkungen berücksichtigen (Will et al. 2017; Primo et al. 2019; Boé et al. 2020; Sein et al. 2020).

Während bei der Wettervorhersage Wechselwirkungen mit langsam veränderlichen Komponenten des Klimasystems – wie Boden, Vegetation, Gletscher, Ozeane, Städte oder Aerosole – stark vereinfacht behandelt werden, erfordern Simulationen auf der Klimazeitskala eine detailliertere Berücksichtigung dieser Prozesse. Ein gutes Beispiel hierfür 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 auf der Klimazeitskala kann beispielsweise dazu führen, dass für die Sommermonate Temperatur und Niederschlag im Modell nur beschränkt mit Beobachtungen übereinstimmen (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. Für eine Weiterentwicklung ist auch ein verbessertes Prozessverständnis nötig. Dies benötigt wiederum geeignete Messdaten, die für die räumliche Skala der Regionalmodelle bisher nur unzureichend vorliegen (Kotlarski et al. 2019).

Da Regionalmodelle nur einen Gebietsausschnitt behandeln, benötigen sie Antriebsdaten an den Rändern des Modellgebiets (Randbedingungen). Dafür

2 ► [www.wegenernet.org/portal/](http://www.wegenernet.org/portal/)



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 et al. 1999; Becker et al. 2015). Eine aktuelle Forschungsrichtung zur Lösung dieser Probleme sind verfeinerte Gitter über einer beliebig gewählten Untersuchungsregion, z. B. Europa, innerhalb von Globalmodellen. Ein Beispiel hierfür ist das ICON-Modell des Deutschen Wetterdiensts und des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (Zängl et al. 2015; Giorgetta et al. 2018; Pham et al. 2021).

Modellrechnungen mit höheren Auflösungen benötigen eine erhöhte Rechenleistung. Im Prinzip führt eine Verdoppelung der Auflösung in einem Regionalmodell zu einer achtfach erhöhten Anzahl von notwendigen Berechnungen (Verdoppelung der Gitterpunkte in Ost-West- und Süd-Nord-Richtung bei halbiertem Zeitschritt). Rechenzentren erfüllen die heutigen Anforderungen an einen generell gestiegenen Rechenbedarf durch innovative Rechnersysteme. Die damit verbundenen Umstellungen erfordern häufig eine Anpassung der inneren Strukturen und Codes der Regionalmodelle und damit jeweils einen erhöhten technischen Aufwand (Leutwyler et al. 2016). Viele regionale Klimamodelle basieren jedoch auf Wettervorhersagemodellen (► Kap. 4) welche bereits an die neuen Rechensysteme angepasst wurden. Daher lässt sich diese technische Anpassung meist einfach umsetzen.

### 5.3 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 et al. 1999; Déqué et al. 2007; Jacob et al. 2007; Kotlarski et al. 2014; Giorgi 2019). 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 beeinflusst als die Wahl des Regionalmodells. Dies gilt besonders für

Simulationen der Temperatur oder der Wintermonate. Bei Simulationen von Sommerniederschlägen trägt die Wahl des Regionalmodells ungefähr genauso viel zur Gesamtunsicherheit bei wie das für den Antrieb gewählte Modell (Déqué et al. 2007).

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 beispielsweise die Simulationen von Extremereignissen wie etwa Starkniederschlägen oder Hitzeperioden (Giorgi et al. 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 et al. 1999). Der Einfluss der Randbedingungen verringert sich jedoch mit zunehmendem Abstand von den Rändern (Giorgi et al. 1999; Rummukainen 2010).

Werden Klimaprojektionen auf Basis unterschiedlicher Emissionsszenarien erstellt, ergeben sich in den Regionalmodellen großräumig – also etwa auf kontinentaler Skala – ähnliche Muster in den Änderungssignalen von Niederschlag und Temperatur wie in den antreibenden Globalmodellen. 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 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 mit steigender Auflösung zunehmende Niederschlagsmengen (Jacob et al. 2014; Kotlarski et al. 2014). Hinsichtlich der Dauer von Hitzeperioden finden Vautard et al. (2013) bei höherer Modellauflösung eine verringerte Überschätzung. Für die neuesten SSP (*shared socioeconomic pathways*) Entwicklungsszenarien (Riahi et al. 2017) stehen noch nicht ausreichend regionale Simulationen für eine neue Beurteilung zur Verfügung.

Eine weitere Herausforderung der regionalen Klimamodellierung stellt die Vergrößerung der Simulationsgebiete in konvektionserlaubenden Modellen hin zur kontinentalen Skala dar. In den letzten Jahren erschienen erste Evaluierungen (Leutwyler

et al. 2017; Berthou et al. 2020) und Klimaprojektionen (Chan et al. 2020) mit konvektionserlaubenden Modellen auf paneuropäischer Skala sowie Ensembleklimaprojektionen für kleinere Gebiete (Helsen et al. 2020; Kendon et al. 2020). Dies bringt neue Herausforderungen mit sich, insbesondere hinsichtlich der Mengen von produzierten Daten: Durch die große Anzahl der Modellgitterpunkte werden die zu transferierenden Datenmengen so groß, dass der Energieverbrauch für den Transfer zum Speicher eine begrenzende Größe darstellt und eine Analyse der Ergebnisse während des Modelllaufs ohne Abspeicherung günstiger ist (Schär et al. 2020). Ebenfalls kann es herausfordernd sein, solche Mengen an Daten durch Standardwerkzeuge zu analysieren.

Anschlussmodelle arbeiten häufig mit Gitterweiten von einigen zehn Metern bis zu wenigen Kilometern – immer noch deutlich weniger als die meisten Regionalmodelle. Auch wenn dynamische Regionalmodelle die Verteilung von Niederschlägen bereits gut wiedergeben (Berg et al. 2013), erfüllen sie oft noch nicht die sehr hohen Ansprüche von Anschlussmodellen an die Wiedergabe der meteorologischen Eingangsdaten. So brauchen hydrologische Modelle – als Beispiel solcher Anwendungsmodelle – nicht nur Niederschlagsdaten, sondern auch Temperatur, Feuchte, Strahlung 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) (► Kap. 4).

## 5.4 Erzeugung und Interpretation von Ensembles

Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Klimas sind immer mit Unsicherheiten behaftet (Foley 2010). Die Unsicherheiten lassen sich nicht vollständig beseitigen, es wird jedoch versucht, diese zu reduzieren. Im Zusammenhang mit der Modellierung des Klimawandels gibt es prinzipiell vier Gründe für Unsicherheiten in Bezug auf globale und regionale Klimamodelle:

1. Unvollständiges Verständnis des Klimasystems mit seinen Wechselwirkungen,
2. Defizite in der numerischen Umsetzung der Klimaprozesse,
3. Unkenntnis der zukünftigen 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 kommt.

Bei der regionalen Modellierung kommt jedoch ein weiterer Unsicherheitsfaktor hinzu (Giorgi 2019):

5. Unsicherheiten, die von den Regionalmodellen und der verwendeten Methodik herrühren.

Jede Stufe einer Modellkette, von den Globalmodellen über die Regionalmodelle bis zu den Anschlussmodellen, trägt zur Gesamtunsicherheit bei. Die oben unter Punkt 1 und 2 genannten Probleme können durch weitere Forschung reduziert werden. Diese bezieht sich nicht nur auf die Erdsystemwissenschaft und ihre numerische Umsetzung, sondern auch auf die Informatik und eine erhöhte Rechenkapazität, damit mehr kleinskalige Prozesse simuliert werden können (Schär et al. 2020). Die einzelnen Beiträge müssen nicht immer konstant sein. So ist die von einem einzelnen Regionalmodell stammende Unsicherheit im Sommer am höchsten und mit der eines Globalmodells vergleichbar (Déqué et al. 2007), da kleinskalige und konvektive Prozesse eine entscheidendere Rolle spielen als im Winter (Giorgi et al. 1999; Vautard et al. 2013).

Die Erfassung von Unsicherheitsquellen wird in der Klimamodellierung hauptsächlich mit sogenannten „Ensembles“ angegangen. Hierbei handelt es sich um eine Reihe von Simulationen mit, im Rahmen der Unsicherheiten variierenden, Bedingungen. Ziel ist es mittels Statistiken, beispielsweise des Mittelwerts und der Bandbreite der Resultate, Aussagen über die Wahrscheinlichkeit möglicher Entwicklungen des Klimas zu gewinnen und den Einfluss der Unsicherheitsfaktoren auf die Ergebnisse zu reduzieren (Tebaldi et al. 2007; Sillmann et al. 2013). Die Bandbreite der unterschiedlichen Ergebnisse des Ensembles zeigt gut die Unsicherheiten: Eine geringe Bandbreite bedeutet beispielsweise, dass der Ensembledittelwert eine robuste Schätzung innerhalb des Ensembles ist (Weigel 2011).

Ein Ensemble von verschiedenen (physikalisch realistischen) Konfigurationen eines Klimamodells (Piani et al. 2005) oder von mehreren unterschiedlichen Klimamodellen hilft, die Unsicherheit aus den Modellen und deren Implementierung (Punkt 1 und 2) abzuschätzen. Unsicherheiten aus der zukünftigen Entwicklung der äußeren Klimaantriebe (Punkt 3) und der internen Klimavariabilität (Punkt 4) werden durch Ensembles mit unterschiedlichen (gleich plausiblen) Emissionsszenarien bzw. unterschiedlichen Anfangsbedingungen (d. h. verschiedene Phasen der natürlichen Variabilität; Tebaldi und Knutti 2007) untersucht (Taylor et al. 2012).

Zusätzliche Unsicherheiten durch die Nutzung von Regionalmodellen (Punkt 5) können auf ähnliche Weise abgeschätzt werden. Dabei werden entweder mehrere Globalmodelle oder mehrere Simulationsläufe von einem Globalmodell (Feldmann et al. 2013) regionalisiert. Es können aber auch mehrere Regional-

modelle (Frei et al. 2006; Kotlarski et al. 2014) oder verschiedene Konfigurationen eines Regionalmodells (Lavin-Gullon et al. 2020) verwendet werden. Relevante europäische Projekte, in denen ein oder mehrere dieser Ensemblemethoden bei Regionalmodellen verwendet werden, sind PRUDENCE, ENSEMBLES und EURO-CORDEX (Christensen et al. 2007; van der Linden und Mitchell 2009; Jacob et al. 2014, 2020). In einer anderen (weniger verbreiteten) Ensemblemethode werden die Ränder des regionalen Simulationsgebiets systematisch geringfügig verschoben, sodass das Regionalmodell immer andersartige Randbedingungen vom gleichen Globalmodelllauf bekommt (Pardowitz et al. 2016).

Der Aufwand, ausreichend große regionale Ensembles durch das dynamische *downscaling* zu erzeugen, kann sehr groß sein, besonders auch in Bezug auf die auszuwertenden Datenmengen. Die hohe zeitliche und räumliche Auflösung der regionalen Klimamodelle erlaubt zwar eine Einschätzung von kurzzeitigen und kleinräumigen Extremereignissen, aber statistisch signifikante Ergebnisse verlangen wegen des schlechteren Signal-zu-Rausch-Verhältnisses eine große Anzahl an Ensemblemitgliedern (Ehmele et al. 2020). Zusätzlich stehen oft nur von wenigen Globalmodellen und Emissionsszenarien die notwendigen Antriebsdaten für ein Regionalmodell zur Verfügung. Damit kann nicht die ganze Spanne der möglichen Entwicklungen abgedeckt werden. Daher setzen sich die Ensembles bisher häufig aus dem zusammen, was verfügbar oder mit einem vertretbaren Aufwand machbar ist. Es werden aber Anstrengungen unternommen, um die Auswahl der Globalmodelle, die regionalisiert werden, so zu treffen, dass es sich um möglichst vertrauenswürdige Globalmodelle handelt, die einen möglichst großen Teil der möglichen Entwicklungen abdecken.

Große Ensembles von hochaufgelösten (1–3 km) regionalen Simulationen über mehrere Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte sind aufgrund des Rechenaufwands bisher noch nicht realisierbar. Um von dem Mehrwert der hochaufgelösten Modelle für das Simulieren von – beispielsweise – Extremniederschlagsereignissen zu profitieren, wird daher statistisch-dynamisches *downscaling* für einzelne Gebiete benutzt. Indem eine selektive Regionalisierung von Wettersituationen mit einem erhöhten Starkniederschlagsrisiko durchgeführt wird, kann ein Ensemble von hochaufgelösten Starkniederschlagsereignissen mit reduziertem Rechenaufwand erstellt werden (Meredith et al. 2018; Gomez-Navarro et al. 2019).

Für Simulationen über Zeiträume von Monaten bis Dekaden, sogenannte saisonale oder dekadische Klimaprognosen, ist die Erfassung des Zustandes des Klimas, von welchem aus die Prognosen berechnet werden, entscheidend. In den letzten Jahren wurden verstärkt Anstrengungen unternommen,

diesen Zustand und seine Unsicherheiten besser zu erfassen und Ensembles von Klimaprognosen zu erstellen (Feldmann et al. 2019). Der Deutsche Wetterdienst bietet solche Klimaprognosen inzwischen auch fortlaufend aktualisiert auf seiner Homepage an.

## 5.5 Kurz gesagt

Durch eine höhere Auflösung und Berücksichtigung zusätzlicher physikalischer Prozesse hat sich die Darstellung des regionalen Klimas in den letzten Jahren stark verbessert. Trotzdem steht die regionale Klimamodellierung weiterhin vor Herausforderungen. Derzeit wird die Modellentwicklung durch die Forschung in mehrere Richtungen vorangetrieben, so wird beispielsweise stark an der Entwicklung regionaler Erdsystemmodelle gearbeitet. Auch die informationstechnologische Seite der Klimamodellierung steht vor großen Herausforderungen: Die Anpassung regionaler Klimamodelle an die sich ständig 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. Durch den Schritt in der Modellauflösung hin zu konvektionsauflösenden Skalen wurden zwar die Simulationsergebnisse erheblich verbessert, es fallen aber auch deutlich größere Mengen an auszuwertenden Daten und erheblich längere Rechenzeiten an. Nicht zuletzt müssen für die Validierung der Modelle entsprechend hochaufgelöste und dabei flächendeckend 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 der Regionalmodelle verlangt dagegen eine Weiterentwicklung der Beobachtungsnetze. Eine Herausforderung stellt sich auch in der Koordination der regionalen Klimamodellierung, insbesondere in der Auswahl der zu regionalisierenden Globalmodelle und Szenarien. Hierbei stellt sich die Aufgabe, die möglichen Unsicherheiten sowohl abzudecken als auch zu quantifizieren, um robuste und zuverlässige Modellensembles bereitzustellen.

## Literatur

- Adinolfi M, Raffa M, Reder A, Mercogliano P (2021) Evaluation and Expected Changes of Summer Precipitation at Convection Permitting Scale with COSMO-CLM over Alpine Space. *Atmosphere* 12(1):54. ► <https://doi.org/10.3390/atmos12010054>
- Armon M, Marra F, Enzel Y, Rostkier-Edelstein D, Morin E (2020) Radar-based characterisation of heavy precipitation in the eastern Mediterranean and its representation in a convection-per-



- mitting model. *Hydrol Earth Syst Sci* 24(3):1227–1249. ► <https://doi.org/10.5194/hess-24-1227-2020>
- Ban N, Schmidli J, Schär C (2014) Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations. *J Geophys Res Atmos* 119(13):7889–7907. ► <https://doi.org/10.1002/2014JD021478>
- Becker N, Ulbrich U, Klein R (2015) Systematic large-scale secondary circulations in a regional climate model. *Geophys Res Lett* 42(10):4142–4149. ► <https://doi.org/10.1002/2015GL063955>
- Berg P, Feldmann H, Panitz H-J (2012) Bias correction of high resolution RCM data. *J Hydrol* 448–449:80–92. ► <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.026>
- 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. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1508-8>
- Berthou S, Kendon EJ, Chan SC, Ban N, Leutwyler D, Schär C, Fossier G (2020) Pan-European climate at convection-permitting scale: a model intercomparison study. *Clim Dyn* 55(1):35–59. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4114-6>
- Boé J, Somot S, Corre L, Nabat P (2020) Large discrepancies in summer climate change over Europe as projected by global and regional climate models: causes and consequences. *Clim Dyn* 54(5):2981–3002. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05153-1>
- Brisson E, Brendel C, Herzog S, Ahrens B (2018) Lagrangian evaluation of convective shower characteristics in a convection-permitting model. *Meteorol Z* 27(1):59–66. ► <https://doi.org/10.1127/metz/2017/0817>
- Brockhaus P, Lüthi D, Schär C (2008) Aspects of the diurnal cycle in a regional climate model. *Meteorol Z* 17(4):433–444. ► <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0316>
- Chan SC, Kendon EJ, Berthou S, Fossier G, Lewis E, Fowler HJ (2020) Europe-wide precipitation projections at convection permitting scale with the Unified Model. *Clim Dyn* 55(3):409–428. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05192-8>
- Christensen JH, Carter TR, Rummukainen M, Amanatidis G (2007) Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Clim Chang* 81:1–6. ► <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9211-6>
- Coppola E, Sobolowski S, Pichelli E et al (2019) A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean. *Clim Dyn* 55(1):3–4. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4521-8>
- Demory ME, Berthou S, Sorland S, Roberts MJ (2020) Can high-resolution GCMs reach the level of information provided by 12–50 km CORDEX RCMs in terms of daily precipitation distribution? ► <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-370>.
- 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. ► <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9228-x>
- Diaconescu EP, Laprise R (2013) Can added value be expected in RCM-simulated large scales? *Clim Dyn* 41:1789–1800. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1649-9>
- Dirmeyer PA, Cash BA, Kinter JL, Jung T, Marx L, Satoh M, Stan C, Tomita H, Towers P, Wedi N, Achuthavarier D (2012) Simulating the diurnal cycle of rainfall in global climate models: Resolution versus parameterization. *Clim Dyn* 39(1):399–418. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1127-9>
- Ehmele F, Kautz LA, Feldmann H, Pinto JG (2020) Long-term variance of heavy precipitation across central Europe using a large ensemble of regional climate model simulations. *Earth Syst Dyn* 11:469–490. ► <https://doi.org/10.5194/esd-11-469-2020>
- 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. ► <https://doi.org/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. ► <https://doi.org/10.1002/joc.3564>
- 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. ► <https://doi.org/10.1080/16000870.2019.1618678>
- Feser F (2006) Enhanced Detectability of Added Value in Limited-Area Model Results Separated into Different Spatial Scales. *Mon Wea Rev* 134:2180–2190. ► <https://doi.org/10.1175/MWR3183.1>
- 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 Am Met Soc* 92:1181–1192. ► <https://doi.org/10.1175/2011BAMS3061.1>
- Foley AM (2010) Uncertainty in regional climate modelling: A review. *Prog Phys Geogr* 34(5):647–670. ► <https://doi.org/10.1177/0309133310375654>
- Fossier G, Khodayar S, Berg P (2015) Benefit of convection permitting climate model simulations in the representation of convective precipitation. *Clim Dyn* 44:45–60. ► <https://doi.org/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. ► <https://doi.org/10.1029/2005JD005965>
- Fuchsberger J, Kirchengast G, Bichler C, Leuprecht A, Kabas T (2022) WegenerNet climate station network Level 2 data version 7.1 (2007–2021). University of Graz, Wegener Center for Climate and Global Change, Graz, Austria. ► <https://doi.org/10.25364/WEGC/WPS7.1:2022.1>
- Giorgetta MA, Brokopf R, Crueger T et al (2018) ICON-A, the Atmosphere Component of the ICON Earth System Model: I. Model Description. *J Adv Model Earth Syst* 10:1613–1637. ► <https://doi.org/10.1029/2017ms001242>
- Giorgi F, Mearns LO (1999) Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *J Geophys Res Atmos* 104(D6):6335–6352. ► <https://doi.org/10.1029/98JD02072>
- Giorgi F, Torma C, Coppola E, Ban N, Schär C, Somot S (2016) Enhanced summer convective rainfall at Alpine high elevations in response to climate warming. *Nat Geosci* 9(8):584–589. ► <https://doi.org/10.1038/ngeo2761>
- Giorgi F (2019) Thirty years of regional climate modeling: where are we and where are we going next? *J Geophys Res Atmos* 124(11):5696–5723. ► <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>
- Gómez-Navarro JJ, Raible CC, García-Valero JA, Messmer M, Montávez JP, Martius O (2019) Event selection for dynamical downscaling: a neural network approach for physically-constrained precipitation events. *Clim Dyn*. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04818-w>
- 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 Atmos* 113:D20119. ► <https://doi.org/10.1029/2008JD010201>
- Heikkilä U, Sandvik A, Sorteberg A (2011) Dynamical downscaling of ERA-40 in complex terrain using the WRF regional climate model. *Clim Dyn* 37:1551–1564. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0928-6>
- Helsen S, van Lipzig NP, Demuzere M, Broucke SV, Caluwaerts S, De Cruz L, De Troch R, Hamdi R, Termonia P, Van Schaeybroeck B, Wouters H (2020) Consistent scale-dependency of future increases in hourly extreme precipitation in two convection-per-



- mitting climate models. *Clim Dyn* 54(3):1267–1280. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05056-w>
- Hentgen L, Ban N, Kröner N, Leutwyler D, Schär C (2019) Clouds in convection-resolving climate simulations over Europe. *J Geophys Res Atmos* 124:3849–3870. ► <https://doi.org/10.1029/2018JD030150>
- Hohenegger C, Brockhaus P, Schär C (2008) Towards climate simulations at cloud-resolving scales. *Meteorol Z* 17(4):383–394. ► <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0303>
- Jacob D, Barring L, Christensen OB et al (2007) An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. *Clim Chang* 81(1):31–52. ► <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9213-4>
- Jacob D, Petersen J, Eggert B et al (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Env Change* 14(2):563–578. ► <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Jacob D, Teichmann C, Sobolowski S et al. (2020) Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. *Reg Environ Change* 20(51). doi: ► <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01606-9>
- Jacobi S, Heistermann M (2016) Benchmarking attenuation correction procedures for six years of single-polarized C-band weather radar observations in South-West Germany. *Geomat Nat Haz Risk* 7(6):1785–1799. ► <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1155080>
- Kendon EJ, Roberts NM, Senior CA, Roberts MJ (2012) Realism of rainfall in a very high-resolution regional climate model. *J Climate* 25(17):5791–5806. ► <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00562.1>
- 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. *Nat Clim Chang* 4:570–576. ► <https://doi.org/10.1038/nclimate2258>
- Kendon EJ, Roberts NM, Fosse G, Martin GM, Lock AP, Murphy JM, Senior CA, Tucker SO (2020) Greater future UK winter precipitation increase in new convection-permitting scenarios. *J Climate* 33(17):7303–7318. ► <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0089.1>
- Knist S, Goergen K, Simmer C (2020) Evaluation and projected changes of precipitation statistics in convection-permitting WRF climate simulations over Central Europe. *Clim Dyn* 55(1):325–341. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4147-x>
- Kotlarski S, Keuler K, Christensen OB et al (2014) Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geosci Mod Dev* 7(4):1297–1333. ► <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014>
- Kotlarski S, Szabó P, Herrera S, Rätzy O, Keuler K, Soares PMM, Cardoso RM, Bosshard T, Pagé C, Böberg F, Gutiérrez JM (2019) Observational uncertainty and regional climate model evaluation: A pan-European perspective. *Int J Climatol* 39(9):3730–3749. ► <https://doi.org/10.1002/joc.5249>
- Lavin-Gullon A, Fernandez J, Bastin S, Cardoso RM, Fita L, Gianarinos TM, Goergen K, Gutierrez JM, Kartsios S, Katragkou E, Lorenz T, Milovac J, Soares PMM, Sobolowski S, Warrach-Sagi K (2020) Internal variability versus multi-physics uncertainty in a regional climate model. *Int J Climatol*. ► <https://doi.org/10.1002/joc.6717>
- Lengfeld K, Kirstetter PE, Fowler HJ, Yu J, Becker A, Flamig Z, Gourley J (2020) Use of radar data for characterizing extreme precipitation at fine scales and short durations. *Environ Res Lett* 15:085003. ► <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab98b4>
- Leutwyler D, Fuhrer O, Lapillonne X, Lüthi D, Schär C (2016) Towards European-scale convection-resolving climate simulations with GPUs: a study with COSMO 4.19. *Geosci Model Dev* 9:3393–3412. ► <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3393-2016>
- Leutwyler D, Lüthi D, Ban N, Fuhrer O, Schär C (2017) Evaluation of the convection-resolving climate modeling approach on continental scales. *J Geophys Res Atmos* 122(10):5237–5258. ► <https://doi.org/10.1002/2016JD026013>
- Lind P, Belušić D, Christensen OB, Dobler A, Kjellström E, Landgren O, Lindstedt D, Matte D, Pedersen RA, Toivonen E, Wang F (2020) Benefits and added value of convection-permitting climate modeling over Fenno-Scandinavia. *Clim Dyn* 55(7):1893–1912. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05359-3>
- van der Linden P, 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.
- di Luca A, 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. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1415-z>
- Meredith EP, Rust HW, Ulbrich U (2018) A classification algorithm for selective dynamical downscaling of precipitation extremes. *Hydrol Earth Syst Sci* 22:4183–4200. ► <https://doi.org/10.5194/hess-22-4183-2018>
- Meredith EP, Ulbrich U, Rust HW (2020) Subhourly rainfall in a convection-permitting model. *Environ Res Lett* 15(3):034031. ► <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6787>
- 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. ► <https://doi.org/10.1029/2004JD005034>
- Pardowitz T, Befort DJ, Leckebusch GC, Ulbrich U (2016) Estimating uncertainties from high resolution simulations of extreme wind storms and consequences for impacts. *Meteorol Z* 25:531–541. ► <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0582>
- Pham TV, Steger C, Rockel B, Keuler K, Kirchner I, Mertens M, Rieger D, Zängl G, 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>
- Piani C, Frame DJ, Stainforth DA, Allen MR (2005) Constraints on climate change from a multi-thousand member ensemble of simulations. *Geophys Res Lett*. ► <https://doi.org/10.1029/2005gl024452>
- Piazza M, Prein AF, Truhetz H, Csaki A (2019) On the sensitivity of precipitation in convection-permitting climate simulations in the Eastern Alpine region. *Meteorol Z* 21:323–346. ► <https://doi.org/10.1127/metz/2019/0941>
- Prein AF, Langhans W, Fosse G, Ferrone A, Ban N, Goergen K, Keller M, Tölle M, Gutjahr O, Feser F, Brisson E (2015) A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Rev Geophys* 53(2):323–361. ► <https://doi.org/10.1002/2014RG000475>
- Prein AF, Gobiet A, Truhetz H, Keuler K, Görgen K, Teichmann C, Maule CF, van Meijgaard E, 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. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2589-y>
- 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. *Geosci Model Dev* 12:5077–5095. ► <https://doi.org/10.5194/gmd-12-5077-2019>
- Riahi K, van Vuuren DP, Kriegler E et al (2017) The Shared Socio-economic 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>
- Rummukainen M (2010) State-of-the-art with regional climate models. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Clim Chang* 1(1):82–96. ► <https://doi.org/10.1002/wcc.8>
- Sasse R, Schädler G, Kottmeier CH (2013) The Regional Atmospheric Water Budget over Southwestern Germany under Different

- Synoptic Conditions. *J Hydrometeor* 14(1):69–84. ► <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-0110.1>
- Schaaf B, Feser F (2018) Is there added value of convection-permitting regional climate model simulations for storms over the German Bight and Northern Germany? *Meteorology Hydrology and Water Management. Res Oper Appl* 6(2):21–37. ► <https://doi.org/10.26491/mhwm/85507>
- Schär C, Fuhrer O, Arteaga A et al (2020) Kilometer-Scale Climate Models: Prospects and Challenges. *Bull Am Met Soc* 101:E567–E587. ► <https://doi.org/10.1175/bams-d-18-0167.1>
- Schlüter I, Schädler G (2010) Sensitivity of Heavy Precipitation Forecasts to Small Modifications of Large-Scale Weather Patterns for the Elbe River. *J Hydrometeor* 11:770–780. ► <https://doi.org/10.1175/2010JHM1186.1>
- 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): S. 13. ► [https://www.cedim.de/download/FDA\\_Juni\\_Hochwasser\\_Bericht1.2.pdf](https://www.cedim.de/download/FDA_Juni_Hochwasser_Bericht1.2.pdf)
- Sein DV, Gröger M, Cabos W, Alvarez-Garcia FJ, Hagemann S, Pinto JG, Izquierdo A, de la Vara A, Koldunov NV, Dvornikov AY, Limareva N (2020) Regionally Coupled Atmosphere-Ocean-Marine Biogeochemistry Model ROM: 2. Studying the Climate Change Signal in the North Atlantic and Europe. *J Adv Model Earth Syst* 12(8):e2019MS001646. ► <https://doi.org/10.1029/2019MS001646>
- Seneviratne SI, Lüthi D, Litschi M, Schär C (2006) Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature* 443(7108):205–209. ► <https://doi.org/10.1038/nature05095>
- 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. ► <https://doi.org/10.1002/jgrd.50203>
- Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA (2012) An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Am Met Soc* 93:485–498. ► <https://doi.org/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. ► <https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2076>
- 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(9–10):2555–2575. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1714-z>
- Vergara-Temprado J, Ban N, Panosetti D, Schlemmer L, Schär C (2020) Climate Models Permit Convection at Much Coarser Resolutions Than Previously Considered. *J Clim* 33:1915–1933. ► <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0286.1>
- Vergara-Temprado J, Ban N, Schär C (2021) Extreme Sub-Hourly Precipitation Intensities Scale Close to the Clausius-Clapeyron Rate Over Europe. *Geophys Res Lett.* ► <https://doi.org/10.1029/2020GL089506>
- Weigel AP (2011) Verifikation von Ensemblevorhersagen. *PROMET* 37(3/4):31–41
- Will A, Akhtar N, Brauch J, Breil M, Davin E, Ho-Hagemann HTM, Maisonnave E, Thürkow 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. *Geosc Model Dev* 10:1549–1586. ► <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1549-2017>
- Zängl G, Reinert D, Rípodas P, Baldauf M (2015) The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core. *Q J R Meteorol Soc* 141:563–579. ► <https://doi.org/10.1002/qj.2378>

**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.

