

## Regionale Klimamodelle – Potentiale, Unsicherheiten und Perspektiven

Regionale Klimamodelle versuchen auf der Grundlage globaler Klimamodelle für einzelne Regionen Projektionen zum möglichen regionalen Klimawandel mit höherer Auflösung zu gewinnen. In Deutschland arbeiten mehrere Gruppen mit unterschiedlichen Ansätzen und Methoden an derartigen Modellen.

In Anbetracht eines zeitweilig intensiven aber zum Teil bedenklich undifferenzierten Medienechos und um einer Verunsicherung in den höchst unterschiedlichen Nutzerkreisen zuvorzukommen, hat das Nationale Komitee für Global Change Forschung zwei Rundgespräche mit Klimamodellentwicklern und potentiellen Anwendern von Wirkmodellen veranstaltet. Sie sollten im Interesse einer weiteren Entwicklung der regionalen Klimamodellierung und der Verwendung ihrer Ergebnisse zum Nutzen von Umweltforschung, Politik und Wirtschaft klären, was die regionale Klimamodellierung leisten kann und muss, und welchen Beitrag sie zur weiteren Erforschung und zum gesellschaftlichen Umgang mit dem Klimawandel liefern kann. Auf der Grundlage der stattgefunden Diskussionen haben wir folgende Thesen zusammengefasst:

### Regionale Klimamodelle: Bedeutung, Grenzen und Perspektiven

#### Bedeutung

Regionale Klimamodelle stellen eine **wichtige und notwendige Ergänzung der globalen Klimamodelle** dar und leisten unbestritten einen bedeutenden Beitrag zum besseren Verständnis des Klimasystems und von Klimaveränderungen sowie zur Übersetzung der Ergebnisse globaler Klimamodelle auf die für die gesellschaftliche Anwendung relevante regionale Skala. ■

Regionale Klimamodelle werden sich in ihrer eigenständigen Bedeutung auf absehbare Zeit neben den globalen Klimamodellen behaupten, da

- die räumliche Auflösung globaler Modelle eine **kleinräumige Darstellung** von Klimamustern bei vertretbaren Rechenzeiten nicht zulässt;
- sie durch eine **Rückkopplung der Ergebnisse** auch zur weiteren Entwicklung der globalen Klimamodelle beitragen;
- sie zum **Antrieb von Wirkmodellen** genutzt werden;
- ihre Ergebnisse für viele **gesellschaftliche und wirtschaftliche Prozesse** von entscheidender Bedeutung sind (z.B. zur Identifizierung von Problemen, Entwicklung von entsprechenden Handlungsstrategien und Einsparung volkswirtschaftlicher Ressourcen durch mögliche präventive Maßnahmen). ■

#### Perspektiven und Herausforderungen

Verbesserung der Ergebnisse der globalen und regionalen Klimamodelle durch die

- **verbesserte Darstellung atmosphärischer Prozesse** (z.B. Konvektion, Niederschlagsentstehung).
- **Einarbeitung weiterer (nicht-atmosphärischer) Klimakomponenten** zur verbesserten Darstellung der Prozesse an den Schnittstellen Land-Atmosphäre und Ozean-Atmosphäre (z.B. dynamische Vegetationsmodelle, dynamische Ozeanmodelle von Schelf- und Nebenmeeren).
- **Kopplung der Klima- und Wirkmodelle** (z.B. Agrar- und Wassermanagement-Modelle, sozialwissenschaftliche Modelle) inklusive der Berücksichtigung der Interaktion der Modelltypen in beiden Richtungen.
- **gemeinsame Definition von Simulationsstrategien und Szenarien.**
- **Erforschung der Skalenwechselwirkungen** im Hinblick auf die Ergebnisbandbreite. ■

Bis zur hinreichenden Verbesserung der globalen und regionalen Klimamodelle werden **Downscaling-Verfahren** und Verfahren zur Korrektur des systematischen Fehlers (**Bias-Korrektur**) benötigt, weshalb deren Weiterentwicklung und Verbesserung erforderlich ist. ■

Die Entwicklung und der Einsatz von Klimamodellen auch auf **transnationaler Projektebene**, v. a. für bisher noch wenig beachtete Regionen, u.a. Afrika und Asien, ist voranzutreiben. Im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit sollten (sofern erforderlich) die Kompetenzen der Projektpartner im Bereich der regionalen Klimamodellierung gestärkt werden. ■

Ein geeignetes **Instrumentarium zur Identifikation, Strukturierung und Quantifizierung von Variabilitäten und Unsicherheiten** im Gesamtsystem Klimamodell-Wirkmodell muss entwickelt werden. ■

Kriterien und Verfahren zur **Qualitätskontrolle und -sicherung** von globalen und regionalen Klimamodellen ebenso wie für Wirkmodelle müssen gefunden werden. ■

**Analyse der Klimasensitivität** regionaler Modellsysteme. ■

Die eine „**wahre (regionale) Klimaprojektion**“ gibt es nicht. Die Ergebnisse der regionalen Modelle werden stark durch die Annahmen der den Klimaprojektionen zugrunde liegenden Szenarien (Emissionen) und durch die Randwerte, d. h. durch die projizierte Klimaentwicklung der jeweilig verwendeten globalen Klimamodelle, beeinflusst. Deshalb sollte durch Multi-Modellstudien die Bandbreite möglicher Änderungen betrachtet werden. ■

Das **Klimasystem** ist ein nichtlineares System, das keine exakten Vorhersagen zulässt. Statistische Unsicherheiten, die sich aus der auf allen räumlichen und zeitlichen Skalen vorhandenen Variabilität des Klimas ergeben, sind deshalb grundsätzlich zu unterscheiden von Modellunsicherheiten, die sich aus dem unvollständigen Wissen über die Prozesse im Klimasystem und ihrer Repräsentation in den Modellen ergeben. Die Auswirkungen der Variabilität auf die Wirkmodelle sind getrennt zu identifizieren und zu quantifizieren. Diese sollten möglichst für jede Region und jedes relevante Klimaelement bestimmt werden und auf Zeiträume von mindestens 10 bis 100 Jahren bezogen sein. ■

Die Aussagekraft der Ergebnisse der regionalen Klimamodelle ist dadurch beschränkt, dass

- sie auf den **Daten globaler Modelle** beruhen und sich damit auch die Fehler dieser Modelle auswirken;
- immer noch **Lücken im Prozessverständnis** der globalen und regionalen Klimadynamik und deren Wechselwirkung bestehen;
- **menschliches Erkennen und Handeln** grundsätzlich fehlerträchtig ist. ■

Die Robustheit der Schlüsse, die mit den regionalen Klimamodellen gezogen werden, ist von der **Anzahl der verfügbaren Realisierungen** abhängig. Mit den z.Zt. verfügbaren Realisierungen sind Aussagen über die Robustheit bestimmter Klimaänderungen noch nicht möglich. Weitere Ensemble-Rechnungen zur Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten, Dynamik und Unsicherheiten sind unumgänglich. ■

Die Analyse der Ergebnisse der Verwendung von Ausgaben regionaler Klimamodelle als direkte Eingaben für nachgeschaltete Wirkmodelle hat gezeigt, dass dieses Vorgehen i. d. R. nicht ohne eine Korrektur von systematischen Diskrepanzen (**Bias-Korrektur**) zwischen den Ergebnissen der regionalen Klimamodelle und den vorliegenden Messungen aus der Vergangenheit erfolgreich ist. Die bei der Bias-Korrektur verwendeten Ansätze beruhen auf der Analyse von Klimadaten aus der Vergangenheit und sind in ihrer Übertragbarkeit auf die Zukunft, in ihrer Methodik sowie in ihrer Auswirkung auf die Konsistenz und Unschärfe der erzeugten Eingaben für Wirkmodelle nur in Ansätzen erforscht. ■

Um die Ergebnisse regionaler Klimamodelle für die oft kleinkaligeren Wirkmodelle anwendbar machen zu können, sind **Downscaling-Verfahren** notwendig. Diese sind bzgl. der zur Anwendung kommenden Ansätze und ihres Einflusses auf die im Rahmen der Wirkforschung erzielten Ergebnisse noch nicht in allen Aspekten weit genug entwickelt. Das betrifft z. B. den zu vermeidenden Verlust an Konsistenz zwischen den berechneten Größen, die Darstellung von Extremereignissen (Verortung, Häufigkeit, Dauer) sowie den technischen Aspekt des Einsatzes variabler Gitter und die damit verbundenen Probleme beim Übergang zwischen feinem (regional) und grobem (global) Gittern. ■

## Nutzung der Klimamodellergebnisse in Forschung und Praxis

### Eignung

Die Eignung der Ergebnisse von regionalen Klimamodellen für Anwendungen im Bereich der Forschung, Politik, Gesellschaft und Wirtschaft hängt stark davon ab, für welche **Fragestellungen** die Daten Verwendung finden sollen. Das breiteste Interesse besteht bisher von Seiten der Land-, Energie-, Versicherungs- und Bauwirtschaft und betrifft z.Zt. hauptsächlich hydrologische Fragestellungen. ■

Im Allgemeinen sollen sie als **Grundlage für Forschungen, Planungen und Investitionsentscheidungen** dienen.

- In einigen Fällen liegen Datenangebot der regionalen Klimamodellierung und Anforderungsprofil der jeweiligen Nutzung so weit auseinander, dass man heute noch von einer Nutzung der Klimamodelldaten abraten muss.
- In vielen anderen Anwendungsfällen kann jedoch bereits heute im Bewusstsein der bestehenden Unsicherheiten eine Einbeziehung der Daten der regionalen Modelle als Entscheidungshilfe dienen (z.B. Landnutzung). ■

# Anforderungen an regionale Klimaprojektionen

Bislang können keine Aussagen über **Qualität und Eintrittswahrscheinlichkeit** der regionalen Klimaprojektionen getroffen werden. Die Robustheit der Projektionen ist allerdings ein entscheidendes Kriterium um als Entscheidungsgrundlage dienen zu können. ■

Die Anforderungen an die Klimaprojektionen sind **je nach Fragestellung divers**. Einige Fragestellungen erfordern Tagesdaten, manche Monatsmittelwerte, anderen genügt allein das Vorzeichen des Trends (nicht selten in sozialwissenschaftlichen und ökonomischen Modellansätzen) oder der Zeitpunkt eines Extremereignisses. Anforderungen stellen sich an die

- **Verbesserung der räumlichen Auflösung** (insbesondere für die Untersuchung kleinerer Wassereinzugsgebiete und für urbane Studien);
- **Berücksichtigung** der im Vergleich zu den Klimaprojektionen (> 50 Jahre) deutlich **kürzeren gesellschaftlichen Handlungshorizonte** (< 30 Jahre);
- zeitliche und räumliche Skalierung mit der Angabe von **Streubreiten** und **Wahrscheinlichkeiten** innerhalb einzelner Projektionen;
- Analyse der **Robustheit** regionaler Klimaänderungsmuster. ■

## Anforderungen an Nutzer

Um die regionalen Modelle an die jeweiligen Anwendungen anzupassen, werden verschiedentlich Bias-Korrekturen und Formen der statistischen Nachbearbeitung praktiziert. Dabei ist jedoch Vorsicht geboten, damit durch die Form der Nachbearbeitung nicht die **Logik und Kohärenz** der Klimaprojektionen zerstört wird, oder gar zusätzliche Unsicherheiten generiert werden. ■

## Kommunikation und Kooperation als Schlüssel zum Erfolg

### Beide Seiten sind gefordert

Die Unsicherheiten der Ergebnisse der regionalen Klimamodellierungen müssen in jeweils **adressatenorientierter Form** dem Fachpublikum auf der Nutzerseite, aber auch der Öffentlichkeit vollständig transparent gemacht werden. Dabei ist eine Erklärung der Vorgehensweise, der methodischen Grundlagen und der Datenlage unabdingbar. Auch die Bereitstellung nutzergruppenspezifischer Informationensets ist wünschenswert.

Die Nutzung der Ergebnisse der regionalen Klimamodelle in Wirkmodellen wird bis auf weiteres eine wissenschaftliche Fragestellung bleiben, die in einem **interdisziplinären Kontext** untersucht werden sollte. Es liegt deshalb in der wissenschaftlichen Verantwortung derjenigen, die die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle anwenden wollen, ihre **Anforderungen an die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle kritisch zu analysieren** und zu klären, welche sich aus ihren **jeweiligen Aufgabenstellungen** ergeben.

Diejenigen, die Daten regionaler Klimamodelle nutzen wollen, sollten deshalb bereits im Vorfeld prüfen, welche Anforderungen ihre Vorhaben an die zu verwendenden Daten stellen, ob sich die entsprechenden Daten dafür eignen und was gegebenenfalls unternommen werden könnte, um sie anzupassen.

Eine **Kontakttaufnahme** mit denjenigen, die die Daten zur Verfügung stellen, wird dringend empfohlen. ■

Über einzelne Anwendungsfälle hinaus ist eine Beteiligung der **Entwickler** von Klimamodellen an der **Abstimmung der Wirkmodelle und** an der Entwicklung von **Bias-Korrekturen** sinnvoll und sollte gefördert werden. ■

An der **Weiterentwicklung von regionalen Klimamodellen und** Forschungen zur **Qualitätssicherung** dieser Modelle sollten auch die **Nutzer beteiligt** werden. ■

Besonders schwierige Anwendungsfälle, wie die Modellierung des Pflanzenwachses und der Hydrologie, erfordern eine **intensive Interaktion zwischen Klimamodellentwickler und Nutzer** der regionalen Klimamodellergebnisse um Anforderungen und Möglichkeiten abzugleichen. ■

# Risikomanagement und Risikokommunikation

Die **Unsicherheit** der Aussagen von regionalen Klimamodellen muss gegenüber der Öffentlichkeit im Allgemeinen und gegenüber der Fachöffentlichkeit und den Anwendern im Besonderen **transparent gemacht und angemessen kommuniziert werden**. ■

Diejenigen, die die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle zur weiteren Forschung und/oder als Grundlage für politische und wirtschaftliche Entscheidungen verwenden, sollten im Bewusstsein ihrer Verantwortung die **Grenzen der Aussagen der Modelle berücksichtigen** und ihre Vorhaben und Entscheidungen so anlegen, dass sie dem Rechnung tragen. ■

## Neue Möglichkeit der Kooperation

Der **Austausch von Informationen** und **zeitnahe Kommunikation von Erfahrungen** bei der Anwendung von Ergebnissen der regionalen Klimamodellierung hinsichtlich Szenarienentwicklung, Ergebnisinterpretation, Problemstellungen und Modellkopplung ist erstrebenswert. Durch einen institutionalisierten Prozess oder eine Einrichtung könnten Kommunikationsräume geschaffen werden (z. B. Plattform), um Erfahrungswerte auszutauschen (z. B. interdisziplinäre Workshops/Rundgespräche), den Stakeholderdialog zu verbessern, gemeinsame Szenarien zu entwickeln, regionale Klimaszenarien an Fragestellungen anzupassen oder auch Beratung im Umgang mit Szenarien und Klimaprojektionen anzubieten. ■

Regionale Klimaprojektionen werden aktuell den Ansprüchen der Nutzer und Stakeholder nur unzureichend gerecht. Bedingt durch die vielfältigen Anforderungen (Variablen, Auflösung usw.), den noch notwendigen Bias-Korrekturen (und statistischen Nachbearbeitungsverfahren) und den aktuellen eingeschränkten Möglichkeiten (z. B. der zur Verfügung stehenden Ensemble-Verfahren der globalen Modelle), jedoch vorwiegend verursacht durch die aktuelle Robustheit der regionalen Projektionen, bedarf es einer weiteren Entwicklungsarbeit sowie einer intensiv koordinierten Kommunikation, um adäquatere Entscheidungsgrundlagen für zukünftige Anpassungsstrategien bieten zu können. Daraus leiten sich folgende Handlungsempfehlungen ab:

**1. Weiterentwicklung regionaler Klima- und Wirkmodelle.** Zukünftiger Forschungsschwerpunkt der regionalen Modellentwicklung ist daher, die Unsicherheiten im Gesamtsystem globales Klimamodell → regionales Klimamodell → Wirkmodell systematisch zu quantifizieren und mit Hilfe gezielter Untersuchungen an repräsentativ gewählten Beispielen verschiedenster Disziplinen und Sektoren möglichst weit zu verringern. Hervorzuheben sind hierbei Projektkooperationen zwischen Klimamodellentwicklern und Anwendern von Wirkmodellen, welche die Modellentwicklung, Impaktforschung und Modellkopplung als gemeinsames Ziel anstreben. Interdisziplinäre Forschung ist hierzu dringend notwendig und sollte verstärkt gefördert werden. Um den Unsicherheitsbereich zeitnah signifikant zu verringern und belastbarere Aussagen zu generieren sind größere finanzielle und personelle Ressourcen als bisher notwendig.

**2. Strukturierte Entwicklung der Schnittstelle Klimamodellierer-Anwender.** Ergänzend zu den Forschungsanstrengungen sollte eine Kommunikationsstrategie zwischen Wissenschaftlern und Anwendern aufgebaut werden. Während Climate Service Zentren in Zukunft eine wichtige Rolle als Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Stakeholdern einnehmen werden, besteht zugleich die Notwendigkeit der koordinierten Vorgehensweise unterschiedlicher Wissenschaftsdisziplinen sowie der Beratung und nutzergerechten Aufbereitung von Klimaprojektionen. Modellentwickler und Anwender von Wirkmodellen sollten dazu im Rahmen von interdisziplinären Workshops gemeinsame Forschungsprojekte entwickeln und durchführen. Daneben könnten auch interdisziplinäre Kommunikationsplattformen etabliert werden.