

Klimamodelle, Klimaszenarien und ihre Bedeutung für Österreich

Andreas Gobiet und Heimo Truhetz

1 Einleitung

Das Klima der Erde ist ein komplexes System, das durch Energieaufnahme aus dem Weltraum (Sonnenstrahlung, sichtbares Licht), Umverteilung der Energie durch alle Komponenten des Klimasystems (Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Biosphäre und Pedosphäre) und Energieabgabe in den Weltraum (Wärmestrahlung der Erde, Infrarotstrahlung) charakterisiert ist. Der Mensch greift durch die Industrialisierung und die damit einhergehende Emission von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen in dieses Energiegleichgewicht ein, da Treibhausgase für die einfallende Sonnenstrahlung durchlässig sind, aber die von der Erde abgestrahlte Energie (Infrarotstrahlung) in der Erdatmosphäre zurückhalten. Seit etwa 250 Jahren ist die Änderung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre hauptsächlich durch menschliche Aktivitäten gesteuert und die CO₂-Konzentration nahm in diesem Zeitraum von etwa 280 auf 379 ppm (2005) zu – eine dramatische Änderung, die zumindest in den letzten 10.000 Jahren der Erdgeschichte beispiellos ist [Solomon *et al.*, 2007]. Die Auswirkungen des daraus resultierenden anthropogenen Treibhauseffekts sind mittlerweile gut dokumentiert: Die globale Durchschnittstemperatur ist in den letzten 100 Jahren um etwa 0,7 °C angestiegen, wobei sich der Trend seit 1950 stark verstärkt (die letzten 25 Jahre trugen über 0,4 °C zum Trend der letzten 100 Jahre bei) und über den Kontinenten stärker ausgeprägt ist als über den Ozeanen (im Alpenraum hat die Temperatur im 20. Jahrhundert beispielsweise um 1,2 °C zugenommen [Auer *et al.*, 2007]). Auch in den Niederschlagsmustern und in der Häufigkeit und Intensität einiger extremer Wetterereignisse konnten Änderungen festgestellt werden [z. B. Alexander *et al.*, 2006; Schmidli und Frei, 2005], allerdings kann daraus nicht geschlossen werden, dass Extremereignisse generell und weltweit zunehmen.

Derartige Beobachtungen legen die Frage nach der zukünftigen Entwicklung des Klimas der Erde und insbesondere nach den Auswirkungen des zu erwartenden Klimawandels auf die Gesellschaft nahe. Heutzutage werden die Grundlagen für derartige Untersuchungen (Klimaszenarien) mit komplexen Klimamodellen erarbeitet. Diese Modelle sind in der Lage, die wichtigsten physikalischen Zusammenhänge des Klimasystems nachzubilden.

Dieser Artikel gibt einen kurzen Überblick über die Methoden und Ergebnisse moderner Klimamodellierung, wobei insbesondere auf Klimaszenarien für Europa, den Alpenraum und Österreich eingegangen wird. In Abschnitt 2 wird auf die Funktionsweise von Klimamodellen und deren Regionalisierung eingegangen, in Abschnitt 3 werden aktuelle Klimaszenarien für den Alpenraum vorgestellt und in Abschnitt 4 wird nach einer kurzen Zusammenfassung ein Ausblick auf aktuelle Entwicklungen in der Klimamodellierung gegeben.

2 Globale Klimamodelle, regionale Klimamodelle und Downscaling

2.1 Globale Klimamodelle

Die Modellierung globaler Aspekte des Klimas mit „general circulation models“ (GCMs) hat ihre Anfänge in den 1970er-Jahren und gewinnt seit den 1990er-Jahren im zunehmenden Maß an

Aussagekraft, da mittlerweile nicht nur reine Modellergebnisse, sondern auch Bewertungen ihrer Qualität [z. B. *Reichler und Kim*, 2008] und Unsicherheit vorliegen [z. B. *Solomon et al.*, 2007].

Klimamodelle sind Computerprogramme, welche die Atmosphäre, Ozeane und den Boden in Kästchen unterteilen (typischerweise beträgt die Seitenlänge dieser Kästchen etwa 200 km) und in jedem dieser Kästchen den physikalischen Zustand und den Massen- und Energieaustausch mit den benachbarten Kästchen anhand physikalischer Gleichungen berechnen (in der Atmosphäre eine vereinfachte Form der Navier-Stokes-Gleichungen). Die dynamische Natur dieser Gleichungen ermöglicht es, nicht nur den Zustand des Klimasystems zu einem bestimmten Zeitpunkt, sondern auch seine zeitliche Entwicklung zu berechnen. Zusätzlich werden Klimaprozesse, welche nicht durch die genannten physikalischen Gleichungen beschrieben werden können oder sich auf zu kleinen räumlichen Skalen abspielen, um durch das grobe Modellgitter darstellbar zu sein, durch Parametrisierungen (semi-empirische vereinfachte Beschreibungen der Prozesse) in Klimamodelle integriert. Dazu gehören beispielsweise turbulente Prozesse in der atmosphärischen Grenzschicht, konvektive Niederschläge („Sommergewitter“) und Strahlungstransfer.

Die Funktionsweise von GCMs ist der von Wettermodellen, welche zur Prognose des Wetters über wenige Tage eingesetzt werden, sehr ähnlich. Im Unterschied zu Wettermodellen berechnen Klimamodelle aber den Zustand des Klimasystems über viele Jahrzehnte, was zu wichtigen Einschränkungen bei der Interpretation ihrer Ergebnisse führt. Es ist bekannt, dass Wettervorhersagen nur für wenige Tage sinnvoll sind und dass sich Wettermodelle nach dieser teilweise prognostizierbaren Zeitspanne schnell vom tatsächlichen Zustand der Atmosphäre entfernen. Die Ursache dieses Verhaltens sind chaotische Komponenten des Wetter- und Klimasystems, welche nach kurzer Zeit über die deterministischen Anteile überhand nehmen. Für Klimamodelle folgt daraus, dass das berechnete Wetter an einem bestimmten Tag weit in der Zukunft keineswegs das tatsächliche noch unbekannte Wetter dieses Tages beschreibt. Wetterprognosen für das Ende des Jahrhunderts können selbst die besten Klimamodelle nicht erstellen. Die Aussagekraft von Klimamodellen beschränkt sich also auf die auf der Zeitskala von Jahrzehnten nicht-chaotischen Anteile des Klimasystems. Sie beschreiben statistische Kenngrößen des Wetters, die sich auf mehrere Jahrzehnte beziehen, wie beispielsweise mittlere Temperaturen oder Niederschlagssummen einer bestimmten Jahreszeit in den letzten drei Jahrzehnten des 21. Jahrhunderts und die typische Variabilität dieser Klimaparameter. Abgesehen von dieser prinzipiellen Einschränkung können Klimamodelle auch in der Beschreibung der statistischen Klimaparameter fehlerhaft sein und jede Klimasimulation ist mit Unsicherheiten behaftet. Die Erforschung und Quantifizierung dieser Unsicherheiten (siehe dazu auch Abschnitt 3) ist heute ein wichtiges Forschungsthema und ermöglicht es einzuschätzen, wie viel Vertrauen wir zu Klimaszenarien haben sollen – ein wichtiges Thema, insbesondere wenn es um Entscheidungen über (kurzfristig betrachtet) kostspielige Maßnahmen zur Minderung des Klimawandels oder zur Anpassung an den Klimawandel geht.

2.2 Regionalisierung

Die Ergebnisse unterschiedlicher globaler Klimamodelle stimmen im globalen Mittel relativ gut überein, zeigen aber regional betrachtet oft große Unterschiede [*Solomon*, 2007]. Da regionale Klimacharakteristika stark von (aus der Sicht von GCMs) sub-skaligen Einflüssen wie komplexem Gelände, Landnutzung, Wasser-Land-Verteilung oder Schneebedeckung abhängen, sind GCMs, die typischerweise mit horizontalen Gitterpunktabständen von 100–300 km arbeiten, nur teilwei-

se in der Lage, regionale und lokale Klimaänderungen zu beschreiben. Für weite Bereiche der Klimafolgenforschung (insbesondere in der Hydrologie) sind aber gerade die regionalen und lokalen Klimacharakteristika ausschlaggebend. Um diesem Defizit zu begegnen, wurden seit Beginn der 1990er-Jahre große Anstrengungen unternommen, globale Klimaszenarien mit Hilfe von dynamischen und/oder empirisch-statistischen Methoden zu verfeinern.

Dynamische Regionalisierungsmethoden basieren auf regionalen Klimamodellen („regional climate models“, RCMs), die in GCMs eingebettet werden. RCMs erstrecken sich über eine begrenzte Region (z. B. Europa), wodurch Rechenressourcen eingespart und in ein verfeinertes Modellgitter investiert werden können (typischerweise 50–10 km Gitterpunktabstand). RCMs werden an den Rändern mit Ergebnissen aus GCMs angetrieben und berechnen im Inneren des Modellgebiets den Zustand der Atmosphäre auf regionaler Skala neu. Sie sind also eigenständige dynamische Klimamodelle, die wie GCMs auf den Navier-Stokes-Gleichungen und physikalischen Parametrisierungen beruhen. Aufgrund ihrer feineren Auflösung können viele Prozesse, die in GCMs parametrisiert sind, in RCMs aber explizit berechnet werden. Historisch gesehen fand die Methode der Einbettung eines regionalen Modells in ein größeres globales Modell („Nesting“) schon seit einiger Zeit in der numerischen Wettervorhersage Anwendung, wurde aber ausschließlich für kurzfristige Vorhersagen angewendet, da die Fähigkeit der regionalen Modelle, über längere Zeiträume sinnvolle Ergebnisse zu liefern, angezweifelt wurde. Ende der 1980er-Jahre wurden die ersten RCMs entwickelt. Pionierarbeit auf diesem Gebiet leisteten *Dickinson et al.* [1989] und *Giorgi* [1990], als die US-Regierung in der Sierra Nevada einen geeigneten und über lange Zeiträume niederschlagsarmen Ort für die Endlagerung nuklearer Abfälle suchte. Es zeigte sich, dass regionale Effekte wie der Abschattungseffekt von Gebirgszügen, der für die Niederschlagshäufigkeit mitverantwortlich ist, in globalen Modellen nicht auflösbar waren, aber durch das erste RCM (RegCM, 60 km horizontaler Gitterpunktabstand) gut beschrieben werden konnte. Heutzutage finden RCMs in verschiedensten Gebieten der Klimaforschung Anwendung, angefangen von der Erforschung des Paläoklimas, über saisonale Vorhersagen bis hin zur Analyse anthropogener Klimaänderung. Besonders wichtig sind RCMs für Studien über die Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Häufigkeit von Extremereignissen und auf sozioökonomisch relevante Sektoren wie Landwirtschaft, Wasserressourcenmanagement, Energieerzeugung und Tourismus. In ihrer räumlichen Auflösung sind die meisten RCMs auf horizontale Gitterpunktabstände von 10 km oder größer limitiert. Klimamodellierungen mit noch höherer Auflösung sind zwar technisch möglich und mit „nicht-hydrostatischen“ Klimamodellen auch sinnvoll durchführbar, aber in ihrer Qualität derzeit noch nicht gut untersucht. Diesbezüglich ist eine weitere Entwicklung der Modelle nötig und auch im Gange.

Der große Vorteil von RCMs ist, dass regionale Klimaprozesse physikalisch konsistent beschrieben werden und somit auch tiefer gehend verstanden werden können. Weiters können RCMs direkt mit anderen prozessorientierten Modellen (etwa hydrologischen Modellen) gekoppelt werden. Allerdings ist die Methode sehr rechenintensiv, ein Problem, das aber durch die rasanten technischen Entwicklungen im Computerbereich etwas abgemildert wird.

Die Methoden der empirisch-statistischen Regionalisierung beruhen auf der Annahme, dass regionale und lokale Klimaeffekte vom groß-skaligen Zustand der Atmosphäre bestimmt sind. Mithilfe verschiedenster statistischer Modelle werden groß-skalige atmosphärische Felder aus GCMs, welche den Zustand der Atmosphäre in der Vergangenheit beschreiben („Prädiktoren“), mit lo-

kalen Klimaparametern, die aus Messungen gewonnen werden („Prädiktanden“), in Verbindung gebracht. Aufgrund dieser statistisch etablierten Zusammenhänge kann in Folge aus mit GCMs erzeugten groß-skaligen Zukunftsszenarien der Prädiktand, d. h. eine simulierte zukünftige Messung abgeleitet werden, welche die lokalen Klimabedingungen repräsentiert. Statistische Regionalisierung wurde schon in der Anfangszeit der numerischen Wettervorhersage eingesetzt, um lokale Informationen aus den damals noch sehr groben Wettervorhersagemodellen zu gewinnen. Seit den 1990er-Jahren findet diese Methode auch in der Klimaforschung breite Anwendung. Es existieren zahlreiche geeignete Methoden wie neuronale Netze, multiple lineare Regression, kanonische Korrelation oder Skalierungsmethoden, auf die hier nicht im Detail eingegangen wird. Übersichtsartikel zu diesem Thema wurden z. B. von *Wilby und Wigley* [1997], *Zorita und von Storch* [1997] und *Murphy* [2000] verfasst. Sehr detailliert beschreiben auch *von Storch und Zwiers* [2003] viele der statistischen Modelle. Ein wesentlicher Vorteil der empirisch-statistischen Regionalisierung liegt darin, dass sie in Bezug auf die benötigte Rechenleistung unaufwendig ist. Statistische Methoden sind sehr flexibel und können auf verschiedenste Klimaparameter, Regionen und Zeiträume angepasst werden und es werden Daten erzeugt (simulierte Messungen), die für Nutzer aus der Klimafolgenforschung oft direkt anwendbar sind. Die prinzipielle theoretische Limitierung der Methode ist die implizite und nicht verifizierbare Annahme, dass statistische Zusammenhänge zwischen Prädiktor und Prädiktand unter geänderten Klimabedingungen unverändert bleiben. Eine zusätzliche Erschwernis ist die Notwendigkeit der Existenz langer Datenreihen, was in vielen Gebieten der Erde nicht gewährleistet ist. Es ist aufgrund der hohen Anpassbarkeit und der Vielfalt von statistischen Modellen auch nicht möglich, allgemeine Aussagen über die Qualität statistischer Downscaling-Methoden zu treffen. Qualitätsanalysen müssen daher für jede Anwendung einzeln durchgeführt werden. Heutzutage werden die empirisch-statistischen Methoden vermehrt dazu eingesetzt, um Ergebnisse regionaler Klimamodelle nachzubehandeln. In diesem Fall ist das Erreichen einer feineren räumlichen Auflösung sekundär und die Korrektur systematischer Modellfehler steht im Vordergrund.

2.3 Aktuelle Entwicklungen regionaler Klimamodellierung

Seit einigen Jahren hat sich der Schwerpunkt der Forschung im Bereich der regionalen Klimamodellierung von Amerika nach Europa verlagert. Mitverantwortlich dafür ist das EU-Projekt PRUDENCE (Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects, <http://prudence.dmi.dk>), das sich zum Ziel gesetzt hat, eine Reihe hoch aufgelöster Klimaszenarien für das Ende des 21. Jahrhunderts (2071–2100) für Europa zu erzeugen, ihre Zuverlässigkeit zu analysieren und ihre Anwendbarkeit auf Impactstudien zu demonstrieren. Fortgesetzt wird diese Arbeit derzeit im EU-Projekt ENSEMBLES (www.ensembles-eu.org), das darauf abzielt, durch Ensembles von globalen und regionalen Klimasimulationen die Unsicherheiten bzw. die Verlässlichkeit regionaler Klimaszenarien zu quantifizieren. In den USA wird derzeit ein ähnliches Projekt durchgeführt (NARCCAP, www.narccap.ucar.edu), welches sich stark an PRUDENCE orientiert. Weiters laufen in Europa einige Projekte, die aufbauend auf PRUDENCE und ENSEMBLES spezifische Regionen detaillierter untersuchen und einen starken Schwerpunkt in der Anwendung der regionalen Klimaszenarien in der Klimafolgenforschung haben. Die Projekte CLAVIER (www.clavier-eu.org) und CECILIA (www.cecilia-eu.org) haben beispielsweise das Ziel, regionale Klimaszenarien für Zentral- und Osteuropa zu verbessern und die Auswirkungen des Klimawandels in diesen Regionen zu untersuchen. Das Projekt CIRCE (www.circeproject.eu) widmet sich ähnlichen Aufgaben in der Mittelmeerregion.

In Österreich wurden die Möglichkeiten der regionalen Klimamodellierung und ihrer Anwendbarkeit auf den Alpenraum seit Mitte 2003 im Projekt reclip:more (Research for Climate Protection: Model Run Evaluation, <http://systemsresearch.arcs.ac.at/projects/climate>) untersucht [Loibl *et al.*, 2007]. Hier wurde die regionale Klimamodellierung, induziert durch das komplexe Untersuchungsgebiet, an die Grenzen der lokalen Skala vorangetrieben (in PRUDENCE und ENSEMBLES wird mit 50 km bzw. 25 km Gitterpunkt Abstand gearbeitet, in reclip:more wurden die Modelle mit 10 km Gitterpunkt Abstand betrieben), was vor allem für die Untersuchung der hydrologischen Gegebenheiten kleiner Gebiete wesentlich ist. Die Ergebnisse des Projektes reclip:more – ein Klimaszenario für die 2040er-Jahre für den Alpenraum – sind mittlerweile verfügbar und werden in Abschnitt 3 vorgestellt. Ab Herbst 2008 wird, aufbauend auf den Erfahrungen aus reclip:more, im Rahmen des durch den neuen Klima- und Energiefonds geförderten Projekts reclip:century ein Satz von durchgehenden Klimaszenarien von 1951–2050 für den Alpenraum erstellt, wobei insbesondere auch die Abschätzung der Unsicherheiten dieser Szenarien vorangetrieben wird. Diese Szenarien sollen die Grundlage für die weiterfolgende Klimafolgenforschung in Österreich bilden.

3 Aktuelle Klimaszenarien für Österreich und deren Unsicherheit

3.1 PRUDENCE

Eine erste Einschätzung der bis zum Ende des Jahrhunderts (2071–2100 verglichen mit 1961–1990) zu erwartenden Klimaänderungen im Alpenraum kann aus den Ergebnissen des Projekts PRUDENCE abgeleitet werden [Christensen and Christensen, 2007].

Temperatur

In Europa wird ein genereller Temperaturanstieg erwartet, welcher im Winter einen West-Ost-Gradienten (geringere Erwärmung im vom Atlantik beeinflussten Westen Europas) und im Sommer Nord-Süd-Gradienten aufweist (verstärkte Erwärmung im Mittelmeerraum). Im Alpenraum ist die Erwärmung im Winter (+3.5 °C, 0.32 °C pro Jahrzehnt) und im Frühling (+3.3 °C, 0.3 °C pro Jahrzehnt) schwächer ausgeprägt als im Sommer (+5.0 °C, 0.45 °C pro Jahrzehnt) und Herbst (+4.2 °C, 0.38 °C pro Jahrzehnt). Diese Ergebnisse sind aus einem Ensemble von 16 Klimasimulationen abgeleitet, wodurch eine grobe Abschätzung der Unsicherheiten möglich ist. Nimmt man an, dass das Modellensemble den Unsicherheitsbereich abdeckt, ergibt sich ein 99%-Konfidenzintervall von etwa ± 1 °C (im Winter weniger) [Déqué *et al.*, 2007]. Die Ergebnisse für die zu erwartende Temperaturänderung im Alpenraum von 3.3 °C bis 5.0 °C sind also als hoch signifikant anzusehen.

Niederschlag

Das Muster der simulierten Niederschlagsänderung über Europa ist weit inhomogener als das Temperaturänderungsmuster. Es zeigt sich ein starker Nord-Süd-Gradient mit abnehmenden Niederschlägen im Süden und zunehmenden Niederschlägen im Norden. Die Null-Linie wandert saisonal von der nördlichen Mittelmeerküste bzw. dem Alpenraum im Winter nach Nordeuropa im Sommer. Im Alpenraum werden Änderungen von +20 % im Winter, 0 % im Frühling, –26 % im Sommer und –7 % im Herbst erwartet. Die dazugehörigen 99%-Konfidenzintervalle

reichen von 0.01 mm/Tag bis 0.69 mm/Tag im Winter und von -0.27 mm/Tag bis -1.21 mm/Tag im Sommer. Obwohl die Unsicherheiten der Niederschlagsszenarien wesentlich größer als die der Temperaturszenarien sind, ist also zumindest das Vorzeichen der Niederschlagsänderung im Alpenraum signifikant, wobei die Signifikanz der Niederschlagsabnahme im Sommer deutlicher ausgeprägt ist als die Zunahme im Winter.

3.2 reclip:more

Da die Alpen eine Klimascheide darstellen, die unterschiedliche klimatische Bedingungen in nahe gelegenen Regionen verursacht, kann erwartet werden, dass auch der Klimawandel in dieser Region räumlich sehr inhomogen verläuft und sich in kleineren Unterregionen des Alpenraums anders verhält als der mittlere Klimawandel im gesamten Alpenraum. Regionale Niederschlagsszenarien, welche in der Lage sind kleine Subregionen des Alpenraums zu differenzieren, bedürfen einer feineren räumliche Auflösung als die PRUDENCE-Simulationen (Gitterpunktabstand 50 km, das entspricht einer effektiven Auflösung von mindestens 150 km). Ein erster Schritt in diese Richtung wurde im Österreichischen Projekt reclip:more getan (siehe auch Abschnitt 2.3). Anders als in PRUDENCE zielt reclip:more auf die Mitte des 21. Jahrhunderts (2041–2050, Vergleichszeitraum 1981–1990) und beschäftigt sich nur mit dem Europäischen Alpenraum, allerdings in größerem Detail (Gitterpunktabstand 10 km). Die zusammengefassten Ergebnisse des Projekts können im Bericht von *Loibl et al.* [2007] und einige detaillierter Ergebnisse in *Gobiet et al.* [2006] nachgelesen werden. Die folgenden Ergebnisse sind dem Bericht von *Gobiet et al.* [2006] entnommen.

Temperatur

Für die Temperaturänderung im Alpenraum bis in die 2040er-Jahre (verglichen mit den 1980er-Jahren) (siehe *Bild 1*) ergibt sich +1.9 °C (+0.32 °C pro Jahrzehnt) im Winter, +2.2 °C (+0.37 °C pro Jahrzehnt) im Frühling, +2.3 °C (+0.38 °C pro Jahrzehnt) im Sommer und +2.7 °C (+0.45 pro Jahrzehnt) im Herbst. Diese Ergebnisse stimmen qualitativ und quantitativ gut mit den zuvor beschriebenen PRUDENCE-Ergebnissen überein. Die räumlichen Muster der Temperaturänderung sind nicht sehr stark ausgeprägt, zeigen aber einen größeren Temperaturtrend mit zunehmender Seehöhe, was auf Rückkopplungsprozesse zwischen Schneebedeckung und bodennaher Temperatur zurückzuführen sein dürfte. Da im Projekt reclip:more nur drei regionale Simulationen durchgeführt wurden, die alle auf derselben globalen Simulation beruhen, ist die Abschätzung der Unsicherheiten nur sehr grob möglich. Der Vergleich der drei regionalen Simulationen zeigt eine Spannweite des Temperaturänderungssignals von etwa ± 0.25 °C (je nach Saison etwas unterschiedlich). *Déqué et al.* [2007] haben abgeschätzt, dass die Unsicherheit regionaler Simulationen im Alpenraum etwa 20–25 % der Gesamtunsicherheit beträgt. Interpretiert man die oben angegebene Spannweite als Maß für die Unsicherheit der regionalen Simulation, ergibt sich also eine Gesamtunsicherheit der reclip:more Szenarien von höchstens ± 1.25 °C.

Die zu erwartenden Niederschlagsänderungen im Alpenraum (siehe *Bild 2*) betragen im Winter +8.5 % (+0.2 mm/Tag), im Frühling +1.4 % (0.0 mm/Tag), im Sommer -12.2 % (-0.3 mm/Tag) und im Herbst -13.8 % (-0.5 mm/Tag). Da sich diese Werte auf die Mitte des Jahrhunderts beziehen, sind sie nicht direkt mit den PRUDENCE-Ergebnissen vergleichbar, weisen aber ähnliche Grundcharakteristiken auf: zunehmende Niederschläge im Winter und abnehmende Niederschlä-

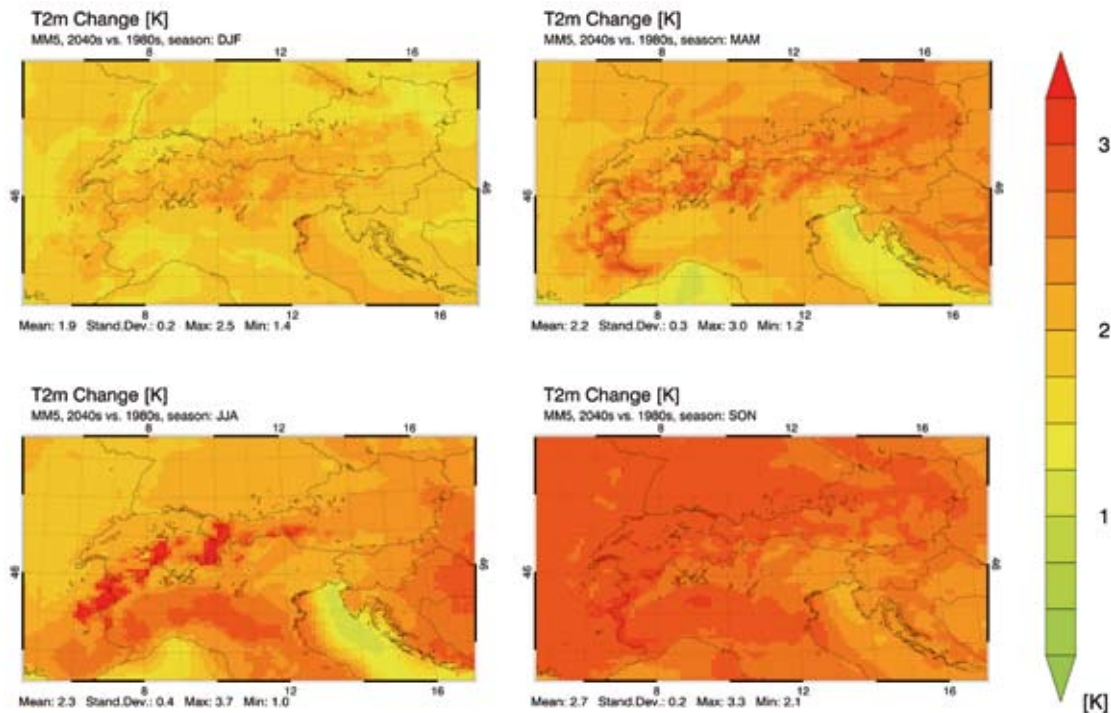


Bild 1: Temperaturszenario für 2041–2050 (Vergleichsperiode 1981–1990). Oben links: Winter (Dezember, Jänner, Februar), oben rechts: Frühling (März, April, Mai), unten links: Sommer (Juni, Juli, August), unten rechts: Herbst (September, Oktober, November)

ge im Sommer südlich der Alpen. Im Unterschied zu PRUDENCE zeigen die reclip:more-Ergebnisse aber auch im Herbst deutliche Niederschlagsrückgänge südlich der Alpen. Die Größenordnung der Niederschlagsänderung ist unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Zeiträume als konsistent zu bezeichnen. Die Spannweite der drei reclip:more-Simulationen beträgt je nach Saison maximal $\pm 5\%$. Laut Déqué et al. [2007] trägt das regionale Klimamodell im Alpenraum 30–50 % zur Gesamtunsicherheit bei, woraus sich eine Gesamtunsicherheit von $\pm 10\%$ bis $\pm 15\%$ ergibt. Diese Abschätzung zeigt, dass die Klimaänderungssignale des Niederschlags im Alpenraum nur teilweise als signifikant zu betrachten sind.

Gerade die Niederschlagsänderung zeigt auch innerhalb des Alpenraums starke regionale Unterschiede: In allen Saisons, außer im Winter, ist der Alpenhauptkamm als deutliche Trennlinie zwischen zunehmenden Niederschlägen im Norden und abnehmenden Niederschlägen im Süden zu erkennen, was die Aussagekraft der mittleren Niederschlagsänderungen des gesamten Alpenraums stark einschränkt (positive und negative Änderungen heben sich auf). Der Vorteil der reclip:more-Szenarien besteht darin, dass erstmals auch Subregionen rund um den Alpenhauptkamm analysiert werden können. Bild 3 zeigt die Niederschlagsänderungen in klimatologisch motivierten Subregionen. Je nach Saison und Subregion ergeben sich Änderungen von bis zu 30 %. Die Unsicherheiten derart kleinregionaler Klimaänderungssignale ist derzeit noch schwer einzuschätzen, allerdings zeigen erste Untersuchungen, dass die Unsicherheiten bei Verfeinerung der Skala nicht stark zunehmen. Bestätigen sich diese Ergebnisse, sind viele subregionalen Niederschlagsszenarien als hoch signifikant zu betrachten.

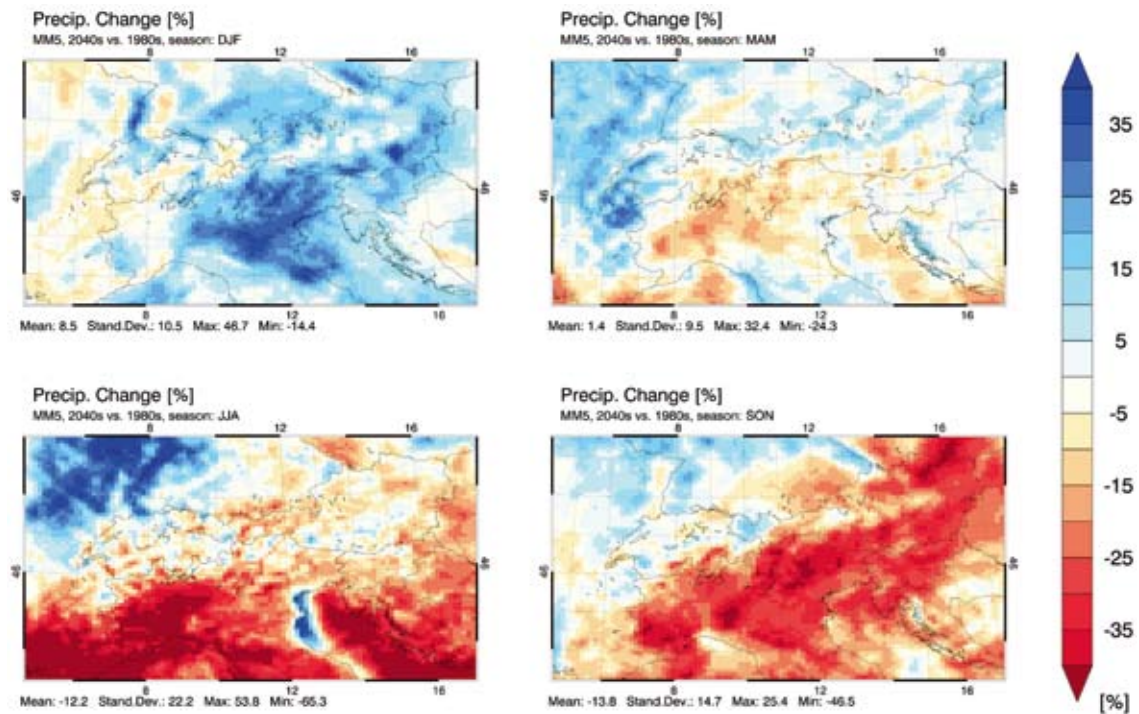


Bild 2: Niederschlagsszenario für 2041–2050 (Vergleichsperiode 1981–1990). Oben links: Winter (Dezember, Jänner, Februar), oben rechts: Frühling (März, April, Mai), unten links: Sommer (Juni, Juli, August), unten rechts: Herbst (September, Oktober, November)

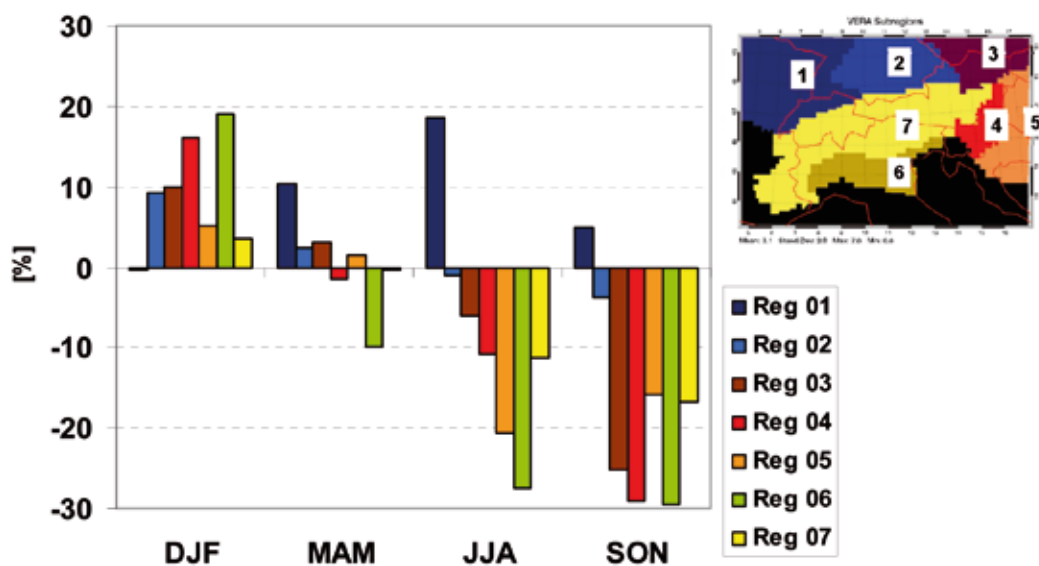


Bild 3: Niederschlagsszenario für 2041–2050 (Vergleichsperiode 1981–1990) in Subregionen des Alpenraums. Die Ergebnisse sind in % angegeben

3.3 Extremereignisse

Extreme Wetterereignisse wie Hitzewellen, Dürreperioden, intensive Niederschläge oder Windstürme besitzen ein hohes Schadenspotenzial und haben daher weit stärkere Auswirkungen auf die Gesellschaft als das mittlere Klima. Bei der Analyse der Änderung von Häufigkeit und Intensität extremer Wetterereignisse ist die regionale Betrachtung besonders wichtig. Ähnlich wie bei Niederschlagsänderungen kann auch bei Extremereignissen von globalen oder auch gesamteuropäischen Ergebnissen nicht direkt auf kleinräumig regionale Verhältnisse geschlossen werden. Insbesondere gilt das für ein orografisch so komplexes Gebiet wie den Alpenraum. Gerade in der kleinräumigen Analyse der Auswirkungen des globalen Klimawandels auf Extremereignisse und in der Untersuchung ihrer Unsicherheiten steckt die Klimaforschung derzeit noch in ihren Kinderschuhen, aber erste Ergebnisse sind vorhanden und einige grobe Trends können hier dargestellt werden. *Beniston et al.* [2007] fasst die diesbezüglichen Ergebnisse des PRUDENCE-Projekts zusammen:

Hitzewellen

Erwartungsgemäß zeigen die Klimasimulationen für das Ende des 21. Jahrhunderts parallel zur allgemeinen Temperaturzunahme einen deutlichen Anstieg der Zahl der Hitzetage (Maximaltemperatur über 30 °C) in Europa. Weniger selbstverständlich ist, dass auch eine Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Hitzewellen erwartet wird und dass aufgrund höherer Temperaturvariabilität in kontinental geprägten Gebieten extreme Temperaturen stärker ansteigen als gemäßigte Temperaturen. Regional treten die deutlichsten Signale im Mittelmeerraum, insbesondere über Südfrankreich und Spanien auf.

Extreme Niederschläge

Hand in Hand mit den Änderungen in den Niederschlagssummen wird erwartet, dass die Intensität der 5-jährigen Niederschlagsereignisse im Norden Europas zunimmt und im Süden abnimmt. Eine interessante Ausnahme stellt Mitteleuropa dar, wo im Sommer trotz abnehmender Niederschlagssummen erhöhte Intensitäten, insbesondere in den maximalen Tages-Niederschlagssummen, erwartet werden [siehe auch *Frei et al.*, 2006].

Dürreperioden

Im Mittelmeerraum und insbesondere über Südspanien, der östlichen Adriaküste und Südgriechenland wird deutlich höheres Risiko von Dürreperioden erwartet.

Windstürme

Über der Nordsee und Westeuropa wird eine leichte Zunahme der winterlichen Sturmaktivität (gemessen an der 90%-Perzentile der Tagesmittel der Windgeschwindigkeit) erwartet. Südlich der Alpen wird mit einer Abnahme der winterlichen Windstürme gerechnet.

Anhand der regional detaillierteren Ergebnisse des Projekts *reclip:more* können Analysen über die Änderung von Extremereignissen nur sehr begrenzt durchgeführt werden, weil die Simulationsperioden (zwei mal 10 Jahre) sehr kurz sind. Beschränkt man sich jedoch auf die Parameter Nieder-

schlagsintensität und Niederschlagshäufigkeit, zeigt sich, dass vielfach Gebiete mit abnehmender Niederschlagshäufigkeit zunehmende Niederschlagsintensitäten aufweisen [Gobiet *et al.*, 2006], was als Hinweis auf extremere Niederschlagsverhältnisse auch im Alpenraum interpretiert werden kann.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der Ergebnisse der wichtigsten Projekte über den zukünftigen regionalen Klimawandel in Europa und im Alpenraum wurden die Grundcharakteristika des zu erwartenden Klimawandels im 21. Jahrhundert erarbeitet. In den nächsten Jahrzehnten ist im Alpenraum mit einer Temperaturzunahme von 0.3 bis 0.45 °C pro Jahrzehnt zu rechnen, wobei die stärkeren Zunahmen im Sommer und im Herbst zu erwarten sind. Bezüglich der Niederschlagsänderung wird ein starker Nord-Süd-Gradient mit deutlich zunehmenden Niederschlägen im Norden Europas (insbesondere im Winter) und stark abnehmenden Niederschlägen im Süden Europas (insbesondere im Sommer) erwartet. Der Alpenraum stellt eine deutliche Trennlinie des Klimawandels dar, was in diesem Gebiet regional detaillierte Untersuchungen nötig macht. In Subregionen rund um die Alpen werden Niederschlagsänderungen von +20 % im Winter (vornehmlich, aber nicht ausschließlich im Nordwesten) und –30 % im Sommer und Herbst (vornehmlich im Süden und Osten der Alpen) erwartet. Zusätzlich gibt es Anzeichen für vermehrtes Auftreten von Hitzewellen und starken Niederschlägen, wobei aber die Verlässlichkeit dieser Aussagen und ihre kleinregionalen Charakteristika noch nicht gut untersucht sind.

Derzeit stehen zur Analyse des zukünftigen Klimawandels in Europa hauptsächlich die Ergebnisse des EU-Projekts PRUDENCE zur Verfügung. Neuere Ergebnisse, insbesondere eine erweiterte Abschätzung der Unsicherheiten, sind ab 2009 aus dem EU-Projekt ENSEMBLES zu erwarten. Räumlich feiner aufgelöste Ergebnisse für den Alpenraum wurden im Österreichischen Projekt reclip:more erarbeitet, wobei die Abschätzung der Unsicherheiten und die Analyse der Änderung der Extremereignisse in diesem Fall noch rudimentär sind (reclip:more-Ergebnisse stehen auf Anfrage für die Klimafolgenforschung zur Verfügung, siehe auch Gobiet *et al.* [2008] für eine erste Anwendung in Bezug auf Grundwasserneubildung in der Steiermark). Im Herbst 2008 startet das Folgeprojekt reclip:century, welches durchgehende Klimaszenarien des Alpenraums in hoher räumlicher Auflösung von 1951–2050 erarbeiten und besonderes Augenmerk auf die Bandbreiten der Unsicherheit legen wird. Diese Simulationen werden sich auch für Extremwertanalysen eignen und sollen die Basis für die weiterführende Klimafolgenforschung in Österreich werden.

5 Literatur

- Alexander, L.V., X. Zhang, T.C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A.M.G. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. Rupa Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D.B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci, J. L. Vazquez-Aguirre, 2006, *J. Geophys. Res.*, 111, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.
- Auer, I., R. Böhm, A. Jurkovic, W. Lipa, A. Orlik, R. Potzmann, W. Schöner, M. Ungersböck, C. Matulla, K. Briffa, P. Jones, D. Efthymiadis, M. Brunetti, T. Nanni, M. Maugeri, L. Mercalli, O. Mestre, J.-M. Moisselin, M. Begert, G. Müller-Westermeier, V. Kveton, O. Bochnicek, P. Stastny, M. Lapin, S. Szalai, T. Szentimrey, T. Cegnar, M. Dolinar, M. Gajic-Capka, K. Zaninovic, Z. Majstorovic, E. Nieplova, 2007, HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region, *Int. J. Climatol.*, 27, 17–46.

- Beniston, M., D.B. Stephenson, O.B. Christensen, C.A.T. Ferro, C. Frei, S. Goyette, K. Halsnaes, T. Holt, K. Jylhä, B. Koffi, J. Palutikof, R. Schöll, T. Semmler, K. Woth, 2007, Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections, *Clim. Change*, 81, DOI 10.1007/s10584-006-9226-z.
- Christensen, J.H., O.B. Christensen, 2007, A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century, *Clim. Change*, 81, DOI 10.1007/s10584-006-9210-7
- Déqué, M., D. P. Rowell, D. Lüthi, F. Giorgi, J. H. Christensen, B. Rockel, D. Jacob, E. Kjellström, M. de Castro, B. van den Hurk, 2007, An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections, *Clim. Change*, 81, DOI 10.1007/s10584-006-9228-x
- Dickinson R. E., R. M. Errico, F. Giorgi, G.T. Bates, 1989, A regional climate model for western United States, *Clim. Change*, 15, 383–422.
- Frei, C., R. Schöll, S. Fukutome, J. Schmidli, P.L. Vidale, Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models, *J. Geophys. Res.*, 111, D06105, doi:10.1029/2005JD005965.
- Giorgi, F., 1990, Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model, *J. Climate*, 3, 941–963.
- Gobiet, A., H. Truhetz, A. Riegler, 2006, A climate scenario for the Alpine region, reclip:more project year 3 - WegCenter progress report, Wegener Center, Univ. of Graz, Austria. (<http://www.wegcenter.at/relocim/publikationen/>)
- Gobiet, A., A. Dalla-Via, F. Prettenhaler & H. Truhetz, 2008, Grundwasserverträgliche ackerbauliche Bewirtschaftungsformen über seichtliegenden gering mächtigen Grundwasserleitern/5.6. A Climate Change Scenario for Southern and Eastern Styria and Potential Impacts on Water Availability – In: Fank, J. & Ch. Lanthaler (Hrsg., 2008): Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring – Modellierung – Management. Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Fokus zu erwartender Herausforderungen.- Beiträge z. Hydrogeologie, 56 (2007/08), Graz, in press.
- Loibl, W., A. Beck, M. Dorninger, H. Formayer, A. Gobiet, W. Schöner (Hrsg.), 2007, Kwiss-Programm reclip:more: research for climate protection:model run evaluation. Final Report, ARC-sys-0123, Austrian Research Centers – systems research, Wien, Österreich. (<http://systemsresearch.arcs.ac.at/SE/projects/reclip/>)
- Murphy, J. M., 2000, Predictions of climate change over Europe using statistical and dynamical downscaling techniques, *Int. J. Climatology*, 20, 489–501.
- Reichler, T., J. Kim, 2008, How well do coupled models simulate today's climate? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89, 3, 303–311.
- Schmidli, J., C. Frei, 2005, Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century, *Int. J. Climatol.* 25, 753–771.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt, 2007, Technical Summary. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Von Storch, H., F. W. Zwiers, 2003, Statistical Analysis in Climate Research, Cambridge University Press, Cambridge.
- Wilby, R. L., T. M. L. Wigley, 1997, Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations, *Prog. Phys. Geography*, 21, 530–548.
- Zorita, E., H. von Storch, 1997, A survey of statistical downscaling techniques, GKSS report 97/E/20, Geesthacht, Germany.

Anschrift der Autoren:

Dr. Andreas Gobiet

Mag. Heimo Truhetz

Universität Graz

Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel

Leechgasse 25, 8010 Graz

Tel. +43-316-380-8448 bzw. -8442

E-Mail: andreas.gobiet@uni-graz.at bzw. heimo.truhetz@uni-graz.at