

Klimawandelforschung: Nostradamismus, Futurologie und Wissenschaft

Unsicherheiten in Prognosen und ihre Bedeutung für Managementstrategien

Daniel Fröhlich, Lothar Zimmermann und Christoph Schulz

Verschiedene Szenarien versuchen uns einen Eindruck von den Klimaänderungen zu geben, die auf uns zukommen können. Diese auch Klimaprojektionen genannten Szenarien entstehen aus mehreren aufeinander aufbauenden Modellen. Dies führt zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen und einer großen Unsicherheit. Eines zeigt sich jedoch deutlich: Über alle uns zur Verfügung stehenden Szenarien und Regionalisierungen betrachtet bleibt eine markante Temperaturerhöhung bestehen, die für Bayern mindestens bei 1,5 °C liegen wird.

Der »Zwischenstaatliche Klimarat« (IPCC) hat eine Beschreibung verschiedener Muster der gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklung bis 2100 auf globaler Ebene veröffentlicht (IPCC 2000). Ausgehend von unterschiedlichen Annahmen zum Bevölkerungswachstum, zu ökonomischen, technischen und sozialen Entwicklungen sowie zum Ressourcenverbrauch wurden vier *Entwicklungsgeschichten* für die Welt verbal zugrunde gelegt. Die Schwierigkeit dieser sozio-ökonomischen Entwicklungsgeschichten besteht darin, Emissionen und damit die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre abzuleiten. Sechs globale Energie-Modelle wurden benutzt, die die Zusammensetzung der künftigen Energieerzeugung beschreiben. Sie bilden die Basis für insgesamt 40 SRES-Emissionsszenarien. Ihr Prognosehorizont reicht bis zum Jahr 2100, alle Szenarien werden als gleich wahrscheinlich eingestuft. Mit diesem methodischen Ansatz werden die gesellschaftlichen Zukunftsvisionen in Zahlen gegossen und einer objektiven Weiterverarbeitung zugänglich.

Die Emissionsszenarien gehen in die globalen atmosphärisch-ozeanischen Zirkulationsmodelle ein. In diesen Modellen werden ausgewählte Klimaprozesse in Form physikali-

scher Gleichungssysteme und Algorithmen zusammengesetzt, um das dominierende Geschehen der in der Realität ablaufenden Prozesse zu simulieren. Auf Grund des immensen Rechenbedarfs wird nur maximal eine Auflösung von 100 x 100 Kilometern erreicht. Wenn das Modell das aktuelle Klima erfolgreich abbildet, lassen sich mit den Emissionsszenarien Projektionen für das künftige Klima berechnen.

Um aus den globalen Zirkulationsmodellen Daten auf einer regionalen Skala, wie sie für die Folgenforschung (z. B. Karten der Baumarteneignung) interessant ist, zu erhalten, ist ein Regionalisierungsverfahren (»Downscaling«) notwendig. Dabei wird mit Hilfe einer weiteren Modellebene ein physikalisch konsistenter Informationstransfer auf eine räumlich höher aufgelöste Skala erreicht.

Beschreibung der Szenarien

Die Namensgebung der Emissionsszenarien folgt einem Schema, in dem »A« für eine ökonomisch und »B« für eine bewusst auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Gesellschaft steht. Die nach-

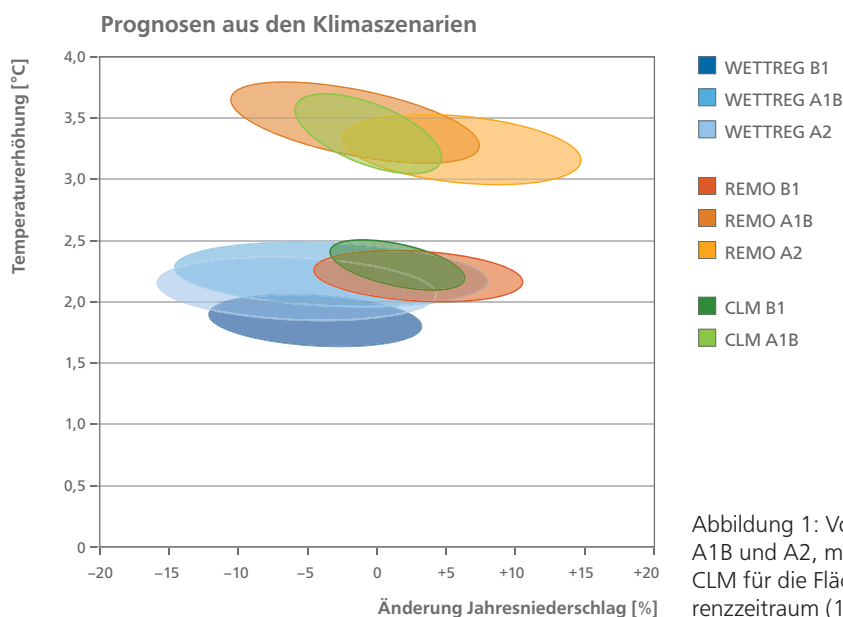


Abbildung 1: Vorhergesagte Änderungen aus den Szenarien B1, A1B und A2, modelliert mit den Ansätzen WETTREG, REMO und CLM für die Fläche Bayerns; Prognosehorizont (2071–2100), Referenzzeitraum (1961–1990)

gestellten Zahlen sollen eine Entwicklung anzeigen, in der entweder ein globaler Ausgleich angestrebt wird »1« oder in einer heterogenen Welt verschiedenste Ansätze regional nebeneinander existieren »2«.

Die »SRES-Familie« A1 steht für eine schnelle Einführung effektiver Technologien, ein starkes Wirtschaftswachstum und eine bis 2050 wachsende und anschließend abnehmende Weltbevölkerung. Innerhalb der Familie wird zwischen einer verschiedenen starken Nutzung fossiler (A1FI) und nicht-fossiler Energiequellen (A1T) sowie einer Mischung aus beiden (A1B) unterschieden.

In der Szenario-Familie A2 werden eine über das Jahr 2050 rapide wachsende Weltbevölkerung mit entsprechendem Ressourcendruck und weniger konstatierten Bemühungen hinsichtlich technologischer Veränderungen als unter A1 projiziert.

Die dritte Szenarien-Familie B1 beschreibt eine Welt, in der sich ein rascher Wandel der ökonomischen Strukturen vollzieht, der Rohstoffverbrauch reduziert wird sowie emissionsfreie und Ressourcen schonende Technologien in umfangreichem Maß Einzug halten. Auch in diesem Szenario wird von einem Anstieg der Weltbevölkerung bis 2050 und einer starken Reduktion der Weltbevölkerung von 8,7 auf 7,0 Milliarden Menschen bis zum Jahr 2100 ausgegangen (IPCC 2000).

Die B2-Szenarien repräsentieren hingegen eine Welt mit überwiegend lokalen Lösungsansätzen der ökonomischen, sozialen und ökologischen Probleme im Zuge einer bis zum Jahre 2100 stetig, aber langsamer als bei A2 wachsenden Weltbevölkerung, mittlerem Wirtschaftswachstum und zerstreuteren technologischen Lösungen als unter B1. Das Szenario B1 kann daher als ein optimistisches Szenario betrachtet werden. Hinsichtlich der Entwicklung der Weltbevölkerung liegen die Szenarien A1B und B1 (8,7 Milliarden Menschen) und das Szenario B2 (9,3 Milliarden Menschen) in der Nähe der neuesten Hochrechnung von neun Milliarden Menschen bis 2050 (Statistisches Bundesamt 2005). Das Szenario A2 geht von einer davon deutlich abweichenden Zahl von 11,3 Milliarden Menschen aus. Die Emissionen bis 2100 steigen vom Szenario B1 über A1T, B2, A1B, A2 zum A1FI.

**WETTREG, REMO und CLM:
drei regionale Klimamodelle**

Als regionalisierte Datensätze liegen für Deutschland die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle WETTREG (Spekat et al. 2007) und REMO (Jacob et al. 2008) für die Szenarien A1B, A2 und B1 sowie von CLM (Hollweg et al. 2008) für A1B und B1 vor. Sie wurden im Rahmen des Projektes KLIP 6 aufbereitet und ausgewertet. Abbildung 1 zeigt die Bereiche der regionalen Klimaprojektionen mit den durchschnittlichen Änderungen der Lufttemperatur in Grad Celsius und der Veränderung der Niederschlagsintensität in Prozent für den Zeitraum 2071 bis 2100 gegenüber 1961 bis 1990. Die Daten stammen aus 360 Rasterzellen, in die Bayern zerlegt wurde. Zur besseren Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung der Einzelwerte verzichtet und um die Zentren der Punktwolken – gegeben durch den relativen Mittelwert des Prognosezeitraums – Ellipsen gezeichnet, die die beiden Standardabweichungen in Richtung der größten Varianz repräsentieren. Alle Modellergebnisse zeigen einen verschiedenen starken Temperaturanstieg, der für das Szenario B1 mit Anstiegen von 1,5 bis 2,5 Grad am mildesten ausfällt. Einen Überblick über die Werte des Referenzzeitraums und der Änderungen im Jahresmittel bietet Tabelle 1.

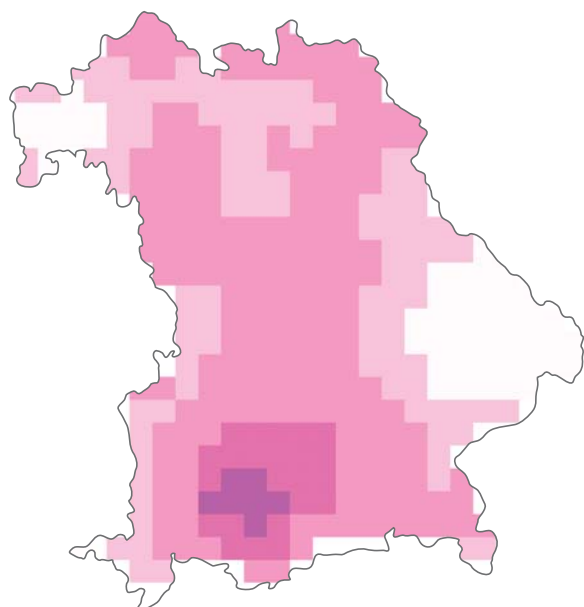
Temperaturveränderungen nach WETTREG und REMO

Für die unterschiedlichen Szenarien weist das statistische Modell WETTREG für Bayern nur einen vergleichsweise geringen Versatz aus, der sich zwischen 1,5 und 2,5 Grad bewegt. Die dynamischen Modelle REMO und CLM geben für die Szenarien A1B und A2 (nur REMO) einen Anstieg von mindestens 0,5 Grad gegenüber dem Szenario B1 an. Ein Vergleich der Karten aus Abbildung 2 verdeutlicht, wie sich die Temperaturniveaus in den Modellen trotz unterschiedlicher Szenarien überschneiden können, beispielsweise WETTREG A1B und REMO B1. Ferner zeigt sich bei einem Vergleich der beiden Szenarien innerhalb des Modells REMO eine gleichbleibende Differenz für viele Gebiete Bayerns um etwa 1,3 Grad, die die innere Konsistenz widerspiegelt.

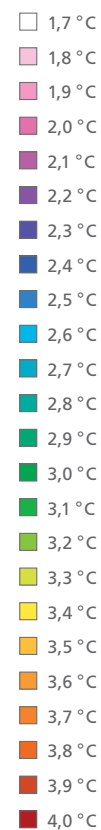
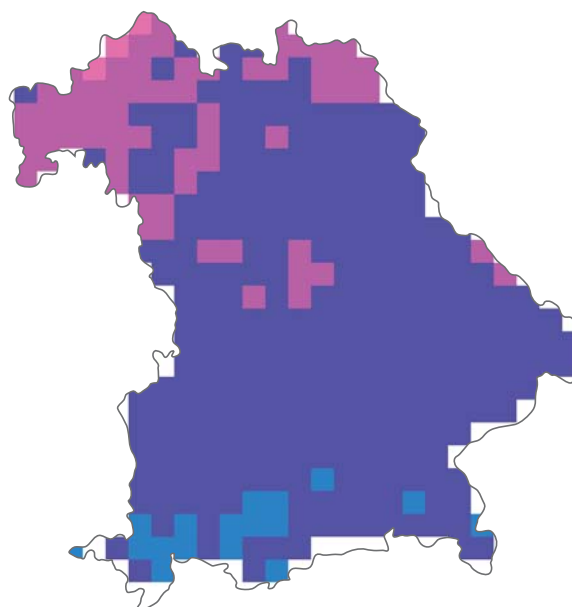
Tabelle 1: Referenz und prognostizierte Änderungen von Temperatur und Niederschlag nach regionalen Klimamodellen

Regionalisierungsansatz	Referenzzeitraum (1961-1990)			Szenario B1 (2071-2100)			Szenario A1B (2071-2100)			Szenario A2 (2071-2100)		
	REMO	WETTREG	CLM	REMO	WETTREG	CLM	REMO	WETTREG	CLM	REMO	WETTREG	CLM
Temperatur [°C] und Änderung [°C]	8,6	7,4	7,0	+2,2	+1,9	+2,3	+3,5	+2,2	+3,4	+3,3	+2,1	-
Niederschlag [mm] und Änderung [%]	993	1052	1134	+3,2	-4,4	+1,6	-1,5	-3,3	-0,5	+6,2	-5,8	-

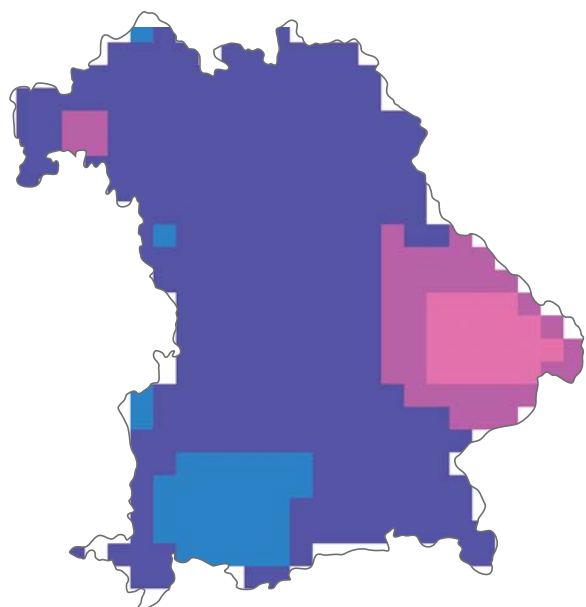
Temperaturerhöhung WETTREG B1



Temperaturerhöhung REMO B1



Temperaturerhöhung WETTREG A1B



Temperaturerhöhung REMO A1B

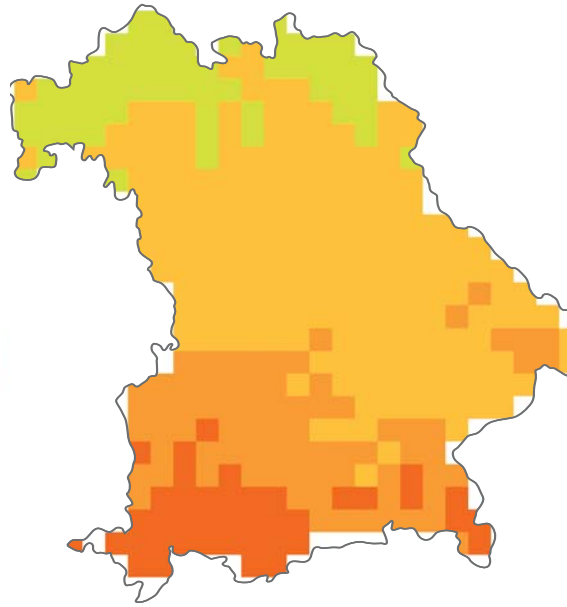
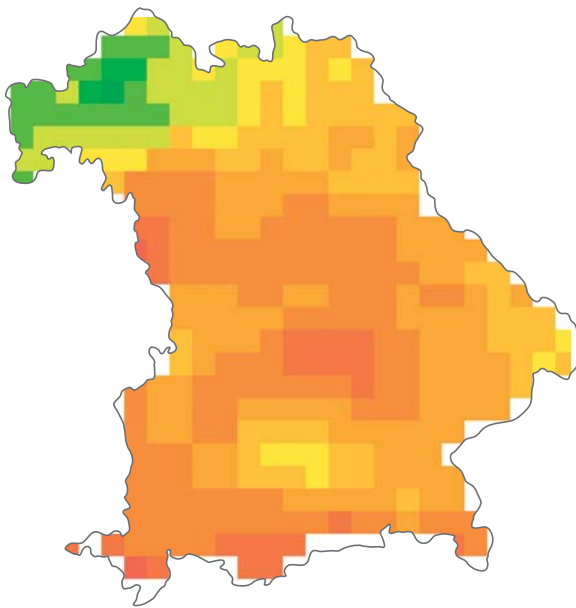


Abbildung 2: Mittlere Temperaturerhöhungen für die Szenarien A1B (unten) und B1 (oben) für die Jahre 2071–2100 gegenüber dem Referenzzeitraum 1961–1990 für WETTREG (links) und REMO (rechts)

Niederschläge WETTREG B1



Niederschläge REMO B1

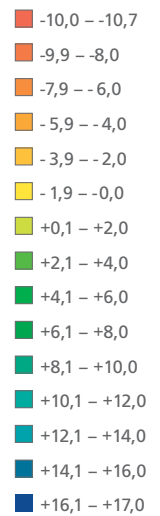
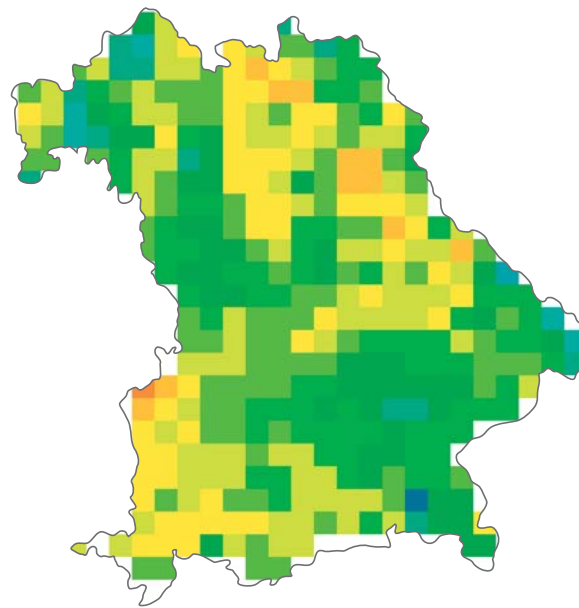


Abbildung 3: Mittlere Änderungen des Jahresniederschlags für das Szenario B1 für die Jahre 2071–2100 gegenüber dem Referenzzeitraum 1961–1990 für WETTREG (links) und REMO (rechts)

Niederschlagsveränderungen nach WETTREG und REMO

Hinsichtlich des Jahresniederschlags überwiegt eine Abnahme gegenüber einer Zunahme. Besonders stark reagieren die Regionalisierungen des Modells WETTREG. Die Schwerpunkte der Ellipsen in Abbildung 1 liegen bei circa –5 Prozent, die Extreme reichen bis zu –15 Prozent. Ein Vergleich der landesweiten Karten weist eine Zunahme der Niederschläge einheitlich für Unterfranken aus. Für die Mittelgebirge stellt sich die Situation indifferent zwischen leichten Abnahmen (WETTREG, Abbildung 3) und Zunahmen bis zu maximal 10 Prozent in den Gipfelregionen (REMO) dar. Für die zentralen und südlichen Gebiete Bayerns schließlich ist tendenziell von einer Abnahme der Jahresmengen an Niederschlägen auszugehen, insbesondere bei der Beachtung weiterer Szenarien (nicht dargestellt).

Unsicherheiten und Bedeutung für Managementstrategien

Die Entstehungskaskade von globalen zu regionalen Klimaszenarien birgt eine Reihe von Unsicherheiten. Dies fängt an bei der Entscheidung für eine der zukünftigen gesellschaftlichen Entwicklungsgeschichten der Welt. Bei der Übersetzung potentieller Entwicklungsgeschichten in quantitative Größen des Ressourcenverbrauchs und der Emissionsmengen sind bei einer Projektion in die Zukunft bereits Annahmen zu treffen, deren Grundlage eine Basis für Diskussionen darstellen (Ruijven et al. 2008). Wie beispielsweise soll im Modell mit dem Technologietransfer Ressourcen sparender Neuentwicklungen in Schwellen- und Entwicklungsländer verfahren werden?

Auch die globalen atmosphärisch-ozeanischen Zirkulationsmodelle bergen Unsicherheiten, da sie ein hochgradig komplexes System abbilden müssen, das noch immer nicht vollständig verstanden ist. Schließlich sind auch die Downscaling-Methoden der regionalen Klimamodelle nicht frei von Unsicherheiten. Statistische Ansätze wie WETTREG verwenden zum Regionalisieren heutige Zusammenhänge zwischen großräumigen Druckverteilungen (»Wetterlagen«) und lokalen Wetterstationsdaten, die bei einer weiteren, signifikanten Klimaänderung gerade zum Ende dieses Jahrhunderts eventuell nicht mehr stichhaltig sind. Mit dynamischen Modellen (REMO, CLM) ist es derzeit noch schwierig, den klimatischen Ist-Zustand zu beschreiben. Meist wird zu viel Feuchte simuliert, so dass die simulierten Niederschläge des Ist-Klimas die gemessenen systematisch (KLIWA 2009) überschätzen und daher korrigiert werden müssen.

Aus den genannten Gründen lässt sich nachvollziehen, dass die klimatischen Änderungen auf der Basis der Emissionsszenarien eine weite Spanne aufweisen (Abbildung 1). Es ist wichtig, sich der Schwierigkeiten bei der Erstellung von Klimaprojektionen und der daraus entstehenden Unsicherheiten bewusst zu werden und ihre Varianz zu begreifen. Trotz dieser Unsicherheiten ist eine Kernaussage allen Modellergebnissen gemeinsam: Es wird in Bayern bis 2100 deutlich wärmer. Selbst im sozioökonomisch optimistischen Szenario B1 liegt die Erwärmung in Bayern mindestens bei 1,5 Grad. Sollten sich Verhältnisse wie im Szenario A2 einstellen, können sich die Temperaturen auch um mehr als drei Grad erhöhen.

Bedeutung für die Forstwirtschaft

Auf Grund der voraussichtlich zunehmenden Unwetterereignisse und Dürreperioden prognostiziert die Bayerische Staatsregierung ein Schadenspotential von bis zu 850 Millionen Euro für die bayerische Land- und Forstwirtschaft (Bayerische Staatsregierung 2008). Die Änderungen der Umweltbedingungen werden mit Sicherheit viel zu schnell vonstatten gehen, um eine allmähliche Anpassung der Wälder über mehrere Förstergenerationen zu erreichen. Die Unsicherheiten aus den Szenarien und der Modellierungskaskade bleiben bestehen, sie führen zu zwei maßgeblichen Handlungsoptionen:

- »Nichts tun«: Verzicht auf Anpassungsmaßnahmen, da die Klimaänderung nicht präzise vorherzusagen ist. Diese passive Haltung hat mit klassischer, planvoller Forstwirtschaft wenig zu tun, da dann Witterungsextreme, Schädlingskalamitäten usw. Holzanfall und Waldgestaltung diktieren. Die Forstwirtschaft würde die Auswirkungen des Klimawandels beobachten und versuchen zu reparieren.
- Aktiver Waldumbau: Beginn mit aktiven Anpassungsmaßnahmen auf Basis der Klimaprojektionen und statistischen Modelle zu Baumarten, die auch mit den kommenden Standortbedingungen zurechtkommen (siehe Klima-Risikokarten). Der Umgang mit Unsicherheiten wird Teil des forstlichen Handelns. Die Entscheidung für angepasste Baumarten und Baumartenmischungen zur Risikostreuung muss nach dem Stand des Wissens kontinuierlich überprüft und zur Korrektur der Maßnahmen verwendet werden.

Entscheidungen sind mit Blick auf die zu erwartenden Änderungen als auch vor dem Hintergrund der Unsicherheiten zu treffen.

Zusammenfassung

Die Klimaprojektionen basieren auf unterschiedlichen Annahmen zur gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklung in den nächsten 100 Jahren. Die Bemühungen, globale Daten auf regionaler Ebene wie Bayern besser aufzulösen, führt zu weiteren Unsicherheiten hinsichtlich der Belastbarkeit. Trotz aller Unsicherheiten bleibt die Kernaussage mit unterschiedlichen Szenarien und verschiedenen Regionalisierungsverfahren, dass es in Bayern wärmer werden wird. Die Forstwirtschaft muss sich mit der Klimaerwärmung auseinandersetzen und die drängenden Fragen klären.

Literatur

Bayerische Staatsregierung (Hrsg.) (2008): *Klimaprogramm Bayern 2020*

Jacob, D.; Göttel, H.; Kotlarski, S.; Lorenz, P.; Sieck, K. (2008): *Klimauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland*. UBA-Bericht 11

KLIWA (2009): *Kurzbericht: Regionale Klimaszenarien und Wasserhaushaltsmodellierung*. Bayerisches Landesamt für Umwelt

Begriffe in der Klimaforschung

Szenarien (gr. σκηνή skené = Bühne, Theater) sind bei wissenschaftlicher Anwendung eine Abfolge denkbarer, aber nicht fantastischer Ausprägungen von Variablen, die das Klima beeinflussen (z. B. Bevölkerungsentwicklung). Ihr exaktes Eintreten ist ungewiss. In Szenarien werden modellhaft die langfristigen Entwicklungen unter alternativen, bisher unsicheren Rahmenbedingungen aufgezeigt. Erstellt werden sie mit Hilfe der Szenario-Technik, bei der methodische Vorgehensweisen und eingehende Systemanalysen notwendig sind. Ihr Ziel ist die Darstellung möglicher künftiger Entwicklungen, für die politische Entscheidungen anstehen.

Die Prognose (gr. πρόγνωσις prōgnosis = Vorwissen, vorher gefasster Ratschluss) ist eine Voraussage über die zu erwartende künftige Entwicklung von Umweltsystemen. Über Beobachtung und Feststellung vergangener Entwicklungen und des gegenwärtigen Zustandes werden quantitative Aussagen für die Zukunft angestrebt, die als Planungsgrundlage dienen. Von Prognosen sollte eigentlich nur gesprochen werden, wenn ein Bedingungsgefüge klar definiert und quantifiziert ist und definierte Ziele prognostiziert werden. Der Begriff der Projektion (lat. proicere = hinwerfen, preisgeben) oder Klimaprojektion dient zur Unterscheidung von der Prognose. Die Verwendung des Begriffs soll verdeutlichen, dass die Anforderungen für Prognosen nicht vollständig erfüllt sind, weil die Entwicklung bestimmter Einflussgrößen für klimatische Aussagen nicht uneingeschränkt aus dem aktuellen Zustand abgeleitet werden kann.

fröhlich

Hollweg, H.D.; Böhm, U.; Fast, I.; Hennemuth, B.; Keuler, K.; Keup-Thiel, E.; Lautenschlager, M.; Legutke, S.; Radtke, K.; Rockel, B.; Schubert, M.; Will, M.; Woldt, M.; Wunram, C. (2008): *Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios*. M&D Modelle und Daten, Technical Report No. 3.

IPCC – Special Report (2000): *Summary for Policymakers Emission Scenarios*

Spekat, A.; Enke, W.; Kreienkamp, F. (2007): *Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2*. UBA-Bericht

Statistisches Bundesamt (2005): *Pressemitteilung Nr. 292 vom 08.07.2005*

van Ruijven, B.; Urban, F.; Benders, R.M.J.; Moll, H.C.; van der Sluijs, J.; de Vries, B.; van Vuuren, D.P. (2008): *Modeling Energy and Development: An Evaluation of Models and Concepts*. World Development 36 (12), S. 2.801–2.821

Dr. Daniel Fröhlich und Dr. Lothar Zimmermann sind Mitarbeiter im Sachgebiet »Klima und Wasserschutz« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft.

Daniel.Froehlich@lwf.bayern.de, Lothar.Zimmermann@lwf.bayern.de

Christoph Schulz leitet dieses Sachgebiet.

Christoph.Schulz@lwf.bayern.de