

1.5. Methodik regionaler Klimaszenarien

Christoph Schär, Heini Wernli und Christoph Frei

Mit globalen Klimamodellen kann das mittlere Klima beschrieben werden unter Berücksichtigung der relevanten Prozesse in der Atmosphäre, den Ozeanen, den Eisschilden und auf den Landoberflächen. Die Auswirkungen der globalen Klimaänderung zeigen sich jedoch auf der regionalen und lokalen Ebene. Die mittlere globale Temperaturzunahme ist wohl ein hervorragender Indikator für die globale Erwärmung, aber ein schlechter Massstab, um die Konsequenzen der Klimaänderung abzuschätzen. Anstelle dessen sind regionale Klimaszenarien notwendig, welche auch konkrete Aussagen über die Häufigkeit von Extremereignissen in verschiedenen Regionen machen.

Extremereignisse im Alpenraum stehen am Ende einer langen Kette von Prozessen und Vorgängen im Klimasystem. Die potentiellen Auswirkungen der Klimaänderung auf die Häufigkeit von Extremereignissen sind dementsprechend schwierig zu beurteilen. Besonders kritische Fragestellungen sind: Wie reagiert die atmosphärische Zirkulation auf die Klimaerwärmung und wie verändern sich die Zugbahnen der Tiefdruckgebiete? Wie ändert sich die Häufigkeit relevanter Grosswetterlagen und welchen Einfluss hat dies auf Extremereignisse? Welchen Einfluss hat die mit der Erwärmung einhergehende Feuchtigkeitszunahme der Atmosphäre auf das zukünftige Niederschlagsklima und die Häufigkeit von Sturmtiefs? Wie wirkt sie sich auf die geographische und jahreszeitliche Verteilung von Starkniederschlägen und Dürren aus? Welche Konsequenzen hat ein Anstieg der Schneefallgrenze auf die Abflussbildung in Flüssen und Gewässern und wie wirkt sie sich auf die Häufigkeit von Hoch- und Niedrig-

wasser aus? All diese Faktoren, die ganz unterschiedliche räumliche Dimensionen haben, müssen bei der Erzeugung regionaler Klimaszenarien berücksichtigt werden.

Globale Klimamodelle

Heute wird eine breite Palette von verschiedenen Modellen in der Klimaforschung eingesetzt.¹ Sie berücksichtigen je nach Fragestellung unterschiedliche Komponenten des Klimasystems (Atmosphäre, Ozeane, Eisschilde, Landoberflächen) und decken unterschiedliche Regionen ab (ganze Erde, Kontinente, Regionen). Gemeinsame Eigenschaft dieser Modelle ist ein dreidimensionales Rechengitter, auf dem die physikalischen Gleichungen der atmosphärischen und ozeanographischen Strömungen dargestellt und in die Zukunft weitergerechnet werden.

Die ersten globalen Modelle wurden mit dem Aufkommen leistungsfähiger Computer in den 1960er Jahren für die Zwecke der Wetterprognose

entwickelt. Anfänglich beschränkten sie sich auf die Simulation der atmosphärischen Zirkulation. Zur Beschreibung des Klimas wurden diese Modelle zunehmend um weitere Komponenten des Klimasystems (Ozeane, Land- und Meereis, Landoberfläche und Biosphäre) ergänzt. Auch die Beschreibung klimarelevanter Prozesse (z.B. Wolkenbildung) wurde laufend verbessert.

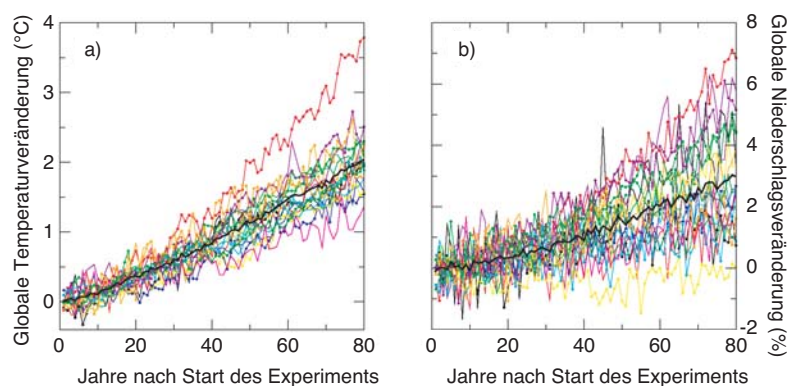


Abbildung 9: Vergleich globaler gekoppelter Klimamodelle für ein Treibhausgas-szenario mit einer Zunahme der Treibhausgaskonzentration von 1% pro Jahr.¹ Die Resultate sind dargestellt als Änderung relativ zum Mittel 1961–1990 für (a) die globale Erdoberflächentemperatur und (b) die globalen Niederschläge.

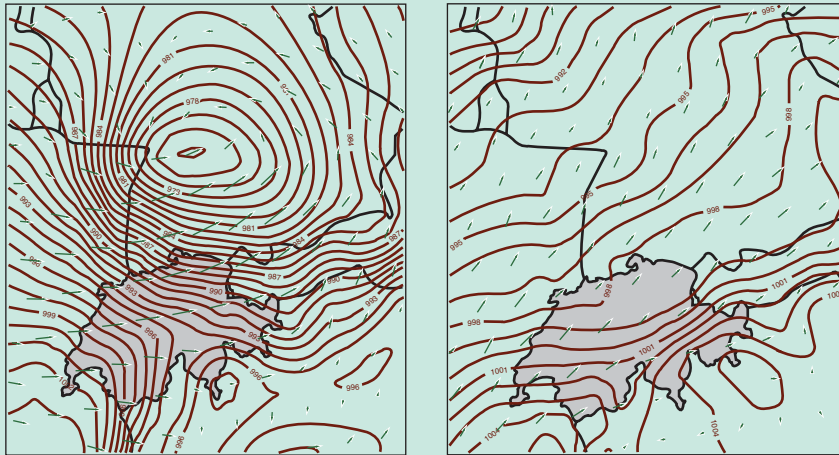


Abbildung 10: Sensitivitätsexperiment zum Lothar-Sturm.² Dargestellt sind der reduzierte Bodendruck (rote Linien im Abstand von 1 hPa) und der bodennahe Wind (grüne Windpfeile) für eine Simulation mit allen Niederschlagsprozessen (links) und für ein Sensitivitätsexperiment ohne Kondensation von Wasserdampf (rechts). Der Vergleich zeigt, dass die Bildung des Lothar-Sturmtiefs massgeblich durch Niederschlagsprozesse bestimmt war.

Lothar – eine Prozessstudie

Die Kenntnisse der entscheidenden Schlüsselprozesse und Wirkungsketten, die zu Extremereignissen führen, sind oft noch sehr unvollständig. Fortschritte lassen sich erzielen durch detaillierte Fallstudien einzelner Wettervorgänge, durch Sensitivitätsexperimente mit Computermodellen, durch Feldexperimente sowie durch die detaillierte Analyse von Trends und Schwankungen wichtiger Klimaelemente. Ein Beispiel zum Einsatz von Sensitivitätsexperimenten mit einem Wettermodell wird in Abbildung 10 illustriert. Solche Experimente erlauben eine gezielte Untersuchung ausgewählter Wirkungsketten. Im vorliegenden Fall wird untersucht, wie die Kondensation von atmosphärischem Wasserdampf das Sturmtief Lothar beeinflusst hat. Dazu wird eine so genannte Kontrollsimulation durchgeführt (Abbildung 10, links), welche das zu untersuchende Phänomen so genau wie möglich beschreibt. Anschliessend können die simulierten Prozesse in einem Experiment künstlich modifiziert werden. Im vorliegenden Fall wurde die Kondensation von Wasserdampf unterdrückt. Der Vergleich des Experiments (Abbildung 10, rechts) mit der Kontrollsimulation belegt die grosse Bedeutung der Kondensations- und Niederschlagsprozesse für die Intensivierung dieses speziellen Sturms: In der Simulation mit unterdrückten Kondensationsprozessen entsteht kein Sturmtief. Dies bestätigt, dass Niederschlagsprozesse in der Atmosphäre einen potentiell wichtigen Einfluss auf die Häufigkeit von Sturmtiefs haben können, ohne jedoch eine Szenario-artige Aussage über die Häufigkeit zu machen (da Letztere noch durch viele andere Faktoren beeinflusst wird).

Heini Wernli

Globale Klimamodelle werden angetrieben durch Szenarien der zukünftigen Entwicklung der atmosphärischen Treibhausgas- und Aerosolkonzentration. Dies erlaubt eine Abschätzung der Auswirkungen auf die langfristige Entwicklung des Globalklimas. Gegenwärtig sind die Resultate von Klimamodellen noch mit grossen Unsicherheiten behaftet. Dies illustriert Abbildung 9, die einen Vergleich verschiedener gekoppelter Klimamodelle für ein Treibhausgasszenario mit einer jährlichen äquivalenten CO₂-Zunahme von 1% zeigt. Die Modelle stimmen recht gut überein in Bezug auf die globale bodennahe Lufttemperatur.

Beim globalen Niederschlagsmittel ist die Streuung jedoch sehr gross. Die Auswirkungen für Teilgebiete (z.B. einzelne Kontinente) und die Konsequenzen für die Häufigkeit von Extremereignissen (z.B. Überschwemmungen und Dürren) sind mit noch grösseren Unsicherheiten behaftet.

Wegen des enormen Bedarfs an Rechenzeit, welche die immer komplexer werdenden Modellsysteme beanspruchen, können globale Szenarien für die nächsten Jahrzehnte auch auf den leistungsfähigsten Supercomputern nur mit einem relativ groben Rechengitter gerechnet werden. Die höchste numerische Auflösung

für gekoppelte atmosphärische/ozeanographische Modelle beträgt heutzutage nur etwa 300 km.

Modellketten zur Abschätzung regionaler Auswirkungen

Die Ursachen der Klimaproblematik sind von globalem Ausmass, die Auswirkungen können jedoch regional sehr unterschiedlich sein. Der globale Mittelwert ist deshalb nicht geeignet, um regional eine potentielle Gefährdung abzuschätzen. Zum Beispiel: Die erwarteten Veränderungen in den globalen Niederschlägen betragen nur wenige Prozent (siehe Abbildung 9b), doch erwartet man jahreszeitliche und regionale Änderungen, die teilweise zehnmal grösser sind. Es gibt auch Regionen (z.B. Teile des Mittelmeerraums), für welche die globalen Modelle eine Niederschlagsabnahme (anstelle einer globalen Zunahme) erwarten lassen, mit möglicherweise weitreichenden Konsequenzen für die Häufigkeit von sommerlichen Dürreperioden.

Eine hohe rechnerische Auflösung ist somit eine wichtige Voraussetzung für das Abschätzen regionaler Auswirkungen menschlicher Aktivitäten. Diese kann mit hochauflösenden atmosphärischen Modellen, mit regionalen Klimamodellen oder mit globalen Klimamodellen variabler Auflösung erreicht werden.^{3,4,5,6} Häufig werden eigentliche Modellketten eingesetzt, die vielfältige Phänomene unterschiedlicher horizontaler Ausdehnung berücksichtigen. Diese Methodik wird als „numerische Regionalisierung“ bezeichnet. Als Beispiel betrachte man die Modellkette in Abbildung 11. Diese erlaubt, grossräumige

Klimaänderungen rechnerisch zu verfeinern und – im vorliegenden Fall – den Wasserkreislauf auf der regionalen Skala detailliert zu beschreiben. Die illustrierte Modellkette umfasst insgesamt fünf Modelle, nämlich zwei globale Klimamodelle, zwei regionale Klimamodelle und ein regionales Abflussmodell. Letzteres dient zur Beschreibung der Abflusshydrologie im Einzugsgebiet des Rheins und soll Aufschluss über mögliche Änderungen in der Häufigkeit grossräumiger Überschwemmungen geben.

Die Qualität einer Modellkette hängt von der Qualität aller beteiligten Modelle ab. Ein feinskaliges Modell kann grossräumige Modellfehler eines antreibenden Modells nicht korrigieren, sondern nur die kontinentalen Klimamuster der antreibenden Modelle räumlich verfeinern. Für die Beschreibung von Extremereignissen, die oft von kleinskaliger Natur sind und massgeblich durch die Topographie beeinflusst werden, ist eine solche räumliche Verfeinerung von zentraler Bedeutung.^{8,9} Aufgrund der höheren Auflösung können regionale Modelle kritische Ereignisse wie Starkniederschläge und Sturmtiefs besser repräsentieren als globale gekoppelte Modelle. Die Methodik der numerischen Regionalisierung wurde auf verschiedene Kategorien von Extremereignissen angewendet, darunter Starkniederschläge¹⁰ und Hurrikane¹¹. Das für die Beschreibung der Modelle notwendige Prozessverständnis wird dabei laufend durch Feldexperimente, Fallstudien, theoretische Untersuchungen und Laborexperimente verbessert und überprüft (siehe Kasten *Lothar – eine Prozessstudie*).

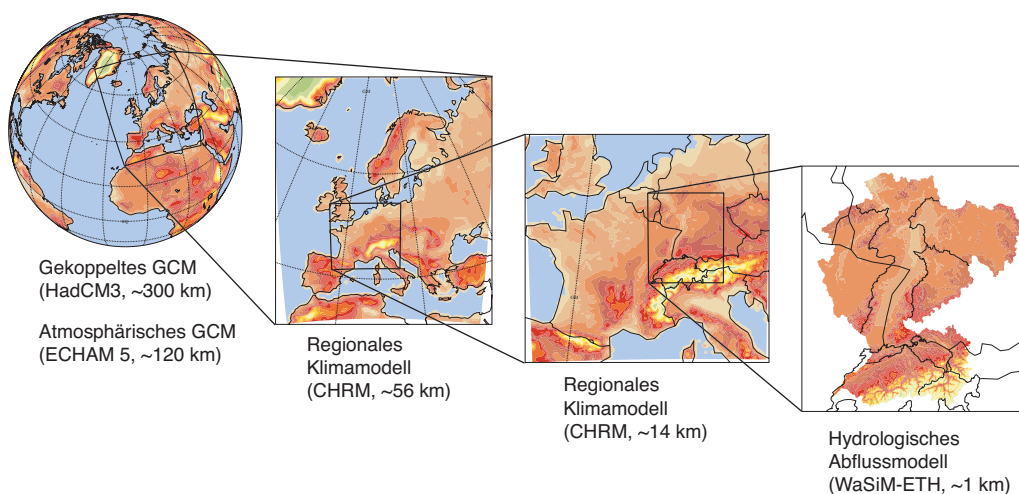


Abbildung 11: Modellkette zur Simulation regionaler Klimafolgen.⁷ Die Modellkette setzt sich zusammen aus verschiedenen Modellen mit zunehmend feinerer horizontaler Auflösung. Man beachte die verbesserte Darstellung der Topographie, welche mit dieser Methodik erreicht werden kann.

Statistische Regionalisierung

Der Rechenaufwand für die räumliche Verfeinerung von zukünftigen Klimaszenarien mittels regionaler oder hochauflösender globaler Klimamodelle ist sehr gross. In der Klimawissenschaft werden deshalb neben numerischen Modellen auch alternative Methoden der Klimaregionalisierung verwendet. Diese Methoden werden unter dem Begriff „statistische Regionalisierung“ zusammengefasst und basieren auf einem quantitativen Modell des Zusammenhangs zwischen regionalen Klimagrössen (z.B. Niederschlag in Davos) und grossskaligen Eigenschaften der Atmosphäre (z.B. Verteilung des Luftdrucks über Europa und dem Nordatlantik). Dieser Zusammenhang wird empirisch, d.h. anhand von Klimabeobachtungen in der Vergangenheit, erfasst und danach auf die Resultate von globalen Klimamodellen für ein zukünftiges Klima angewendet. Die mathematische Formulierung dieser Modelle basiert auf statistischen Konzepten oder einer Kombination von statistischen und numerischen Elementen.^{12,13}

Die einfachere mathematische Formulierung der statistischen Methoden erlaubt die Herleitung von regionalen Klimaszenarien mit vergleichsweise geringem Rechenaufwand. Diese Verfahren werden deshalb vor allem zur Abschätzung von Unsicherheiten von Szenarien (z.B. durch Anwendung auf eine grosse Zahl unterschiedlicher globaler Klimamodelle⁹) oder für die Regionalisierung auf ganz kleine Raumskalen (z.B. durch Anwendung auf Resultate von regionalen Klimamodellen) angewendet.

Eine solche statistische Formulierung kann nur dann funktionieren, wenn sich die erwähnten empirischen Beziehungen im zukünftigen Klima nicht ändern. Statistische und numerische Klimaregionalisierung stellen Techniken dar, die sich gegenseitig ergänzen. Vergleiche der beiden Methoden erlauben es, wichtige Informationen über ihre Verlässlichkeit und letztlich über die Plausibilität von regionalen Klimaszenarien zu gewinnen. Neben der Anwendung auf mittlere Klimagrössen sind in den letzten Jahren auch verschiedene statistische Verfahren zur Regionalisierung von Extremereignissen entwickelt worden.^{14,15,16}

- 1 Cubasch U., G. A. Mehl et al., Projections of future climate change. Chapter 9 in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 525–582, 2001.
- 2 Wernli H., S. Dirren, M. Liniger, and M. Zillig, Dynamical aspects of the life-cycle of the winter storm 'Lothar' (24–26 December 1999). *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 128, 405–429, 2002.
- 3 Wild M., L. Dümenil, and J. P. Schulz, Regional climate simulation with a high resolution GCM: surface hydrology, *Climate Dyn.*, 12, 755–774, 1996.
- 4 Lüthi D., A. Cress, H. C. Davies, C. Frei, and C. Schär, Interannual variability and regional climate simulations, *Theor. Appl. Climatol.*, 53, 185–209, 1996.
- 5 Déqué M., P. Marquet, and R. G. Jones, Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model, *Climate Dyn.*, 14, 173–189, 1998.
- 6 Giorgi F., B. Hewitson et al., Regional climate information – evaluation and projections. Chapter 10 in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 583–638, 2001.
- 7 Kleinn J., Climate change and runoff statistics in the Rhine Basin: a process study with a coupled climate-runoff model. Ph.D. Thesis No. 14663, ETH Zürich, 114 p., 2002.
- 8 Schär C., T. D. Davies, C. Frei, H. Wanner, M. Widmann, M. Wild, and H. C. Davies, Current Alpine climate. In: Cebon P., U. Dahinden, H. C. Davies, D. M. Imboden, and C. Jäger [Eds.], *Views from the Alps: Regional perspectives on climate change*. MIT Press, Boston, 21–72, 1998.
- 9 Wanner H., D. Gyalistras, J. Luterbacher, R. Rickli, E. Salvisberg und C. Schmutz, *Klimawandel im Schweizer Alpenraum*, vdf, Zürich, 283 p., 2000.
- 10 Jones R. G., J. M. Murphy, M. Noguer, and A. B. Keen, Simulation of climate change over Europe using a nested regional climate model. Part II: Comparison of driving and regional model responses to a doubling of carbon dioxide. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 123, 265–292, 1997.
- 11 Bengtsson L., M. Botzet, and M. Esch, Will greenhouse gas induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes. *Tellus*, 48A, 57–73, 1996.
- 12 Gyalistras D., C. Schär, H. C. Davies, and H. Wanner, 1998: Future Alpine climate. In: Cebon P., U. Dahinden, H. C. Davies, D. M. Imboden, and C. Jäger [Eds.], *Views from the Alps: Regional perspectives on climate change*. MIT press, Boston 171–224.
- 13 Heimann D. and V. Sept, Climate change estimates of summer temperature and precipitation in the Alpine region. *Theor. Appl. Climatol.*, 66, 1–12, 2000.
- 14 Plaut G. and E. Simonnet, Large-scale circulation classification, weather regimes, and local climate over France, the Alps and Western Europe. *Climate Res.*, 17, 303–324, 2001.
- 15 Plaut G., E. Schuepbach, and M. Doctor, Heavy precipitation events over a few Alpine subregions and the links with large-scale circulation 1971–1995. *Climate Res.*, 17, 285–302, 2001.
- 16 Wilby R. L., H. Hassan, and K. Hanaki, Statistical downscaling of hydrometeorological variables using general circulation model output. *J. Hydrol.*, 205, 1–19, 1998.

Intensiviert sich der globale Wasserkreislauf?

Der Wasserkreislauf wird angetrieben durch die an der Erdoberfläche anfallenden kurzwelligen (solaren) und langwelligen (atmosphärischen und terrestrischen) Strahlungsflüsse. Der resultierende Energieeintrag wird als Nettostrahlungsbilanz bezeichnet. Sie wird im gegenwärtigen Klima zur Erwärmung der Atmosphäre (zu ca. 20%) und zur Verdunstung von Wasser (zu ca. 80%) verwendet. Für den Energiehaushalt an der Erdoberfläche ist der Wasseraustausch somit wichtiger als der Wärmeaustausch. Er führt über Kondensationsprozesse zu einer Erwärmung der unteren und mittleren Troposphäre.

Die Zunahme der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen bewirkt in erster Linie eine Erhöhung der an der Erdoberfläche anfallenden Strahlungsenergie. Da diese Energie mehrheitlich für Verdunstung aufgewendet wird, dürfte sie nebst einer globalen Erwärmung auch eine globale Anfeuchtung der Atmosphäre bewirken: Man spricht von einer „Intensivierung des Wasserkreislaufes“.¹ Eine Intensivierung des Wasserkreislaufes hätte wichtige Auswirkungen auf die Wettersysteme, die Niederschlagsverteilung sowie auch auf Extremereignisse.

Die wichtigsten Kenngrößen des atmosphärischen Wasserkreislaufes sind Verdunstung und Niederschlag. Da die Atmosphäre nur geringe Mengen von Wasser in Form von Wasserdampf, Wolkentröpfchen und Eiskristallen enthält (im globalen Mittel entspricht der atmosphärische Wassergehalt einer Wassersäule von 26 mm), ist im globalen Jahresmittel die Verdunstung gleich gross wie der Niederschlag. Eine Intensivierung des globalen Wasserkreislaufs würde somit Verdunstung und Niederschlag im gleichen Umfange betreffen.

Beobachtungen des Wasserkreislaufes der letzten 100 Jahre

Langfristige Beobachtungsreihen von Niederschlag und Verdunstung beschränken sich fast ausschliesslich auf landgestützte Messungen mit Niederschlagssammlern und Verdunstungswannen. Die Ozeane, die 71% der Erdoberfläche ausmachen, sind dabei unterrepräsentiert.

Seit mehr als 100 Jahren liegen Beobachtungen von tausenden von Niederschlagssammlern auf allen Kontinenten vor. Sie zeigen eine leichte Zunahme des mittleren globalen Landniederschlags um 1% seit Anfang des letzten Jahrhunderts.^{2,3} Die Niederschlagszunahme ist ausgeprägt in den mittleren und hohen Breiten der nördlichen Hemisphäre (zwischen 40° und 80°N), wo die Landniederschläge um 8% zugenommen haben.⁴ Von dieser Zunahme ist insbesondere auch der Alpenraum betroffen.⁵ Andererseits wurde in den Subtropen eine Niederschlagsabnahme beobachtet.

Im Gegensatz zu den Niederschlagsmessungen beschränken sich langjährige Beobachtungen der Verdunstung vornehmlich auf Stationen in der ehemaligen Sowjetunion und in Nordamerika. Mit der Verdunstungswanne kann jedoch nicht die wirkliche Verdunstung ermittelt werden, sondern nur die hypothetische Verdunstung über einer wassergesättigten Fläche.⁶ Die wirkliche Verdunstung wird stark durch lokale Gegebenheiten (Bodenwassergehalt, Vegetation) mitbestimmt, und es ist deshalb fraglich, ob Messungen mit Verdunstungswannen als Mass für die globale Verdunstung geeignet sind. Für die letzten Jahrzehnte zeigen sie mehrheitlich (aber nicht ausschliesslich) eine Abnahme der Verdunstungssummen.⁷ Die Diskrepanz zwischen der gemessenen globalen Niederschlagszunahme und der Abnahme der Verdunstungssummen wird als „Verdunstungsparadoxon“ bezeichnet. Es gibt verschiedene Versuche, dieses Paradoxon zu interpretieren – zum Beispiel als ein Artefakt der Messung^{8,9} oder als Konsequenz der zunehmenden Bewölkung oder Aerosolkonzentration^{10,11}.

Resultate von Klimamodellen

Die allermeisten globalen gekoppelten Klimamodelle lassen in Übereinstimmung mit den oben diskutierten physikalischen Prozessen eine Intensivierung des Wasserkreislaufes erwarten. Die meisten Szenario-Läufe im neuesten IPCC-Bericht zeigen eine Zunahme der global gemittelten Niederschläge als Folge der Treibhausgaszunahme.¹² Alle Modelle für alle Szenario-Kategorien zeigen eine Niederschlagszunahme in den Tropen sowie den mittleren und hohen Breiten; in den Subtropen resultiert eher eine Niederschlagsabnahme. Diese Resultate sind qualitativ konsistent mit der Hypothese eines intensivierten Wasserkreislaufes und die regionale Ausprägung der Niederschlagszunahme stimmt überein mit den Niederschlagstrends des letzten Jahrhunderts. Die grosse Streuung zwischen den verschiedenen Modellen belegt aber, dass wichtige Prozesse des Wasserkreislaufes noch ungenügend verstanden und in den Klimamodellen noch mangelhaft dargestellt sind.⁶ Infolge der energetischen Dominanz der Verdunstung über die Erwärmung ist bei zunehmender Treibhausgaskonzentration – zumindest längerfristig – von einer Intensivierung des Wasserkreislaufes auszugehen. Dies legen auch Beobachtungen und Simulationen des gegenwärtigen Klimas nahe. Die verschiedenen Quellen streuen zum Teil signifikant, zeigen jedoch eine klare Korrelation zwischen der Nettostrahlungsbilanz an der Erdoberfläche und der global gemittelten Verdunstung.

Christoph Schär und Atsumu Ohmura

- 1 Flohn H., A. Kapala, H. R. Knoche, and H. Mächel, Recent changes of the tropical water and energy budget and of midlatitude circulations. *Climate Dyn.*, 4, 237–252, 1990.
- 2 Folland C. K., T. R. Karl et al., Observed climate variability and change. Chapter 2 in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 99–181, 2001.
- 3 Dai A., I. Y. Fung, and A. D. Del Genio, Surface observed global land precipitation variations during 1900–88, *J. Climate*, 10, 2943–2962, 1997.
- 4 New M., M. Todd, M. Hulme, and P. Jones, Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *Int. J. Climatol.*, 21, 1899–1922, 2001.
- 5 Schmidli J., C. Schmutz, C. Frei, H. Wanner, and C. Schär, Mesoscale precipitation variability in the Alpine region during the 20th century. *Int. J. Climatol.*, 22, 1049–1074, 2001.
- 6 Ohmura A. and M. Wild, Is the hydrological cycle accelerating? *Science*, 298, 1345–1346, 2002.
- 7 Peterson T. C., V. S. Golubev, and P. Y. Groisman, Evaporation losing its strength. *Nature*, 377, 687–688, 1995.
- 8 Brutsaert W. and M. B. Parlange, Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, 396, 30, 1998.
- 9 Golubev V., J. H. Lawrimore, P. Groisman, N. A. Speranskaya, S. A. Zhuravin, M. J. Menne, T. C. Peterson, and R. W. Malone, Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment. *Geophys. Res. Letters*, 28, 2665–2668, 2001.
- 10 Roderick M. L. and G. D. Farquhar, The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 298, 1410–1411, 2002.
- 11 Liepert B. G., Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990. *Geophys. Res. Letters*, 29, Art. No. 1421, 2002.
- 12 Cubasch U., G. A. Meehl et al., Projections of future climate change. Chapter 9 in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 525–582, 2001.