

### 3.1.13 Veränderung regionaler Niederschlagsextreme

DIETER KASANG

*Change of regional extremes: During the last decades floods and droughts with significant impacts have been observed in Germany and other parts of the world. Thus, the question arises whether these events are caused by a man-made global warming. Some datasets show increasing frequencies of extreme precipitation events, but the lack of reliable long-term data makes it difficult to identify clear trends. Due to physical reasons more extreme events should be expected in a warmer climate. However, the spatial pattern is influenced by the complex dynamics of atmosphere and ocean. Sophisticated climate models lead to conclusions which are in agreement with the theoretical considerations but are still quantitatively uncertain.*

**B**ilder von Hochwasserkatastrophen haben in letzter Zeit immer wieder für Betroffenheit gesorgt und sind in den Medien häufig mit dem Klimawandel in Verbindung gesetzt worden. In Deutschland ist vor allem die »Jahrtausendflut« an Donau, Moldau und Elbe im Jahre 2002 mit 37 Todesopfern und ca. 15 Mrd. Euro an ökonomischen Verlusten in Erinnerung (Abb. 3.1.13-1). Weltweit gab es in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten allerdings wesentlich verheerendere Überschwemmungen wie das gewaltige Hochwasser 1998 am chinesischen Yangtse mit über 3000 Toten, 14 Mio. Obdachlosen und Sachschäden von 36 Mrd. US\$ oder die katastrophalen Monsunfluten im selben Jahr in Bangladesch und Indien mit ebenfalls ca. 3.000 Todesopfern. Und in jüngster Zeit hat das Hochwasser in Pakistan vom Sommer 2010, das schätzungsweise 20% des Landes unter Wasser setzte, über 1.600 Tote verursacht und 6 Mio. Menschen aus ihren Behausungen vertrieben, weltweit Schlagzeilen gemacht.

Natur und Mensch leiden jedoch nicht nur unter einem Zuviel, sondern oft auch unter einem Zuwenig an Wasser. Dürren gehören wegen ihrer langanhaltenden Dauer und ihrer großräumigen Ausdehnung für manche Regionen zu den schlimmsten Naturkatastro-

phen. Bekannte Beispiele des 20. Jahrhunderts sind die Dürren im Mittleren Westen der USA in den 1930er, den 1950er und 1980er Jahren sowie die Dürre in der Sahel-Zone am Südrand der Sahara in den 1970er und 1980er Jahren. Auch Europa litt 2003 unter einer extremen Hitzewelle mit weit verbreiteter Trockenheit, Waldbränden und über 50.000 frühzeitigen Todesfällen unter älteren und schwachen Menschen, vor allem in Frankreich. Und gleichzeitig mit den Überschwemmungen in Pakistan verursachte im Sommer 2010 eine anhaltende Hitzewelle und Dürre in Russland katastrophale Waldbrände, denen ebenfalls zahlreiche Menschen zum Opfer fielen.

In der Debatte über Hochwasser- und Dürrekatastrophen spielt zunehmend die Frage eine Rolle, ob sich darin bereits der vom Menschen verursachte Klimawandel zeige. Die US-Dürre von 1988 verschaffte der These vom menschengemachten Treibhauseffekt zum ersten Mal Gehör in der amerikanischen Politik. Auch in Deutschland rückten vor allem die extremen Wetterereignisse der Jahre 2002 und 2003 immer wieder die Frage nach der globalen Erwärmung als Auslöser für Extremereignisse in den Blickpunkt der Öffentlichkeit. Diese Frage lässt sich jedoch nicht einfach und



**Abb. 3.1.13-1:** Das »Jahrtausend«-Hochwasser an der Elbe 2002 (Foto: Thomas Wöhling, mit seiner freundlichen Genehmigung).

eindeutig beantworten und weist auf sehr komplexe und schwierig zu klärende Zusammenhänge. Die folgende Darstellung geht kurz auf die gesellschaftlichen und hydrologischen Aspekte von Hochwasser- und Dürrekatastrophen ein und fragt vor allem nach den meteorologischen Ursachen. Abschließend wird eine Einschätzung der zukünftigen Entwicklung gegeben.

### Gesellschaftliche und hydrologische Aspekte

Eindeutig zugenommen haben in den letzten Jahrzehnten die ökonomischen Kosten von wetterbedingten Naturkatastrophen. Sie erhöhten sich weltweit von 8,9 Mrd. US\$ in den Jahren 1977–1986 auf 45 Mrd. US\$ im Zeitraum 1997–2006 (BOUWER et al. 2007). Schätzungen über die Verluste in einzelnen Regionen zeigen eine ähnliche Tendenz. In Europa beliefen sich die Verluste durch größere Flutschäden zwischen 1970–2006 insgesamt auf 140 Mrd. US\$ in Werten von 2006, wobei sich seit Mitte der 1990er die Jahre mit größeren Verlusten häuften (BARREDO 2009) (Abb. 3.1.13-2).

Für die zunehmenden Hochwasserschäden sind zum einen sozio-ökonomische Ursachen wie eine wachsende Bevölkerung, die verstärkte Ansiedlung und die Zunahme von Sachwerten in hochwassergefährdeten Gebieten verantwortlich. Auch für Dürren sind Landnutzungsänderungen eine wesentliche Ursache. Überschwemmungen hängen aber direkt auch von den Abflussmengen, den Hochwasserständen, der räumlichen Ausdehnung und der Dauer von Überflutungen ab. Es ist schwierig, hier Trends festzustellen, da die Daten über Abflussmengen und Wasserstände in vielen Regionen oft zu kurz und durch Veränderungen der Messmethoden und Randbedingungen wenig homogen

sind. Extremereignisse sind außerdem per definitionem selten, und daher sind auch Datenserien über ein halbes Jahrhundert für Trendaussagen in der Regel zu kurz.

Nach groben Schätzungen gab es zwischen 1996 und 2005 pro Dekade doppelt so viele Flutkatastrophen wie zwischen 1950 und 1980 (IPCC 2007 b, 3.2). Landschaftsveränderungen haben diese Entwicklung stark beeinflusst. Wenig dazu beigetragen haben allerdings die mittleren hydrologischen Abflussmengen. Hier zeigen sich zwischen 1948 und 2004 signifikante Trends nur bei einem Drittel der größten Flüsse der Erde, wobei negative Trends überwiegen, für die als Hauptursache abnehmende Niederschläge vor allem in den niederen und einem Teil der mittleren Breiten verantwortlich gemacht werden (DAI et al. 2009). Dennoch sind bei den großen Hochwasserereignissen in der Regel meteorologische Extreme der bestimmende Faktor.

### Meteorologische Trends

Bei den meteorologischen Größen ist die Datenlage ebenfalls nur in wenigen Regionen der Welt zufriedenstellend, da es nur selten geschlossene und qualitativ ausreichende Datenreihen gibt, die weiter als bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts zurückreichen. Bei Berücksichtigung nur der Landgebiete mit ausreichenden Daten zeigt sich aber, dass der Anteil sehr niederschlagsreicher Tage an den Gesamtniederschlägen in den letzten Jahrzehnten höher ist als in früheren Jahrzehnten (IPCC 2007a, 3.8.2.2). So nahmen in Europa und den USA die Starkniederschläge relativ stärker zu als die Niederschläge insgesamt. Und auch wo die Gesamtniederschläge abnahmen oder sich kaum veränderten, wie in großen Teilen des Mittelmeerraumes, in Südafrika, Mittelamerika, Japan und im Nordosten

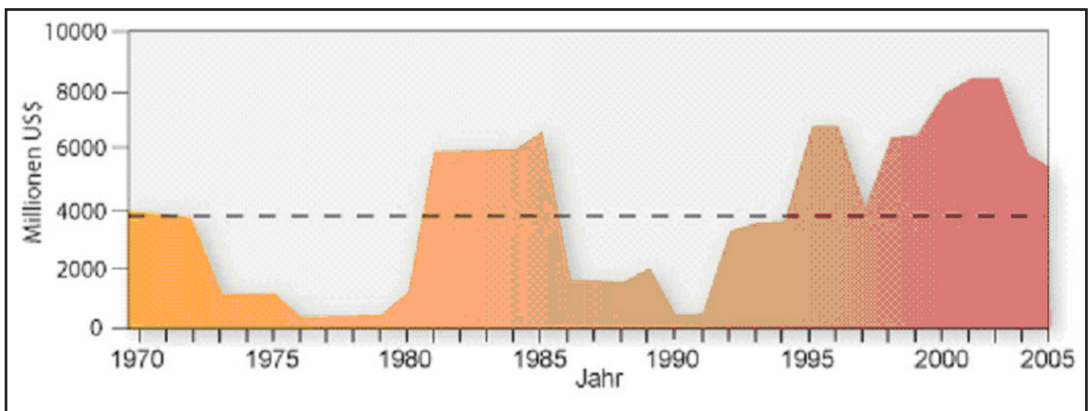


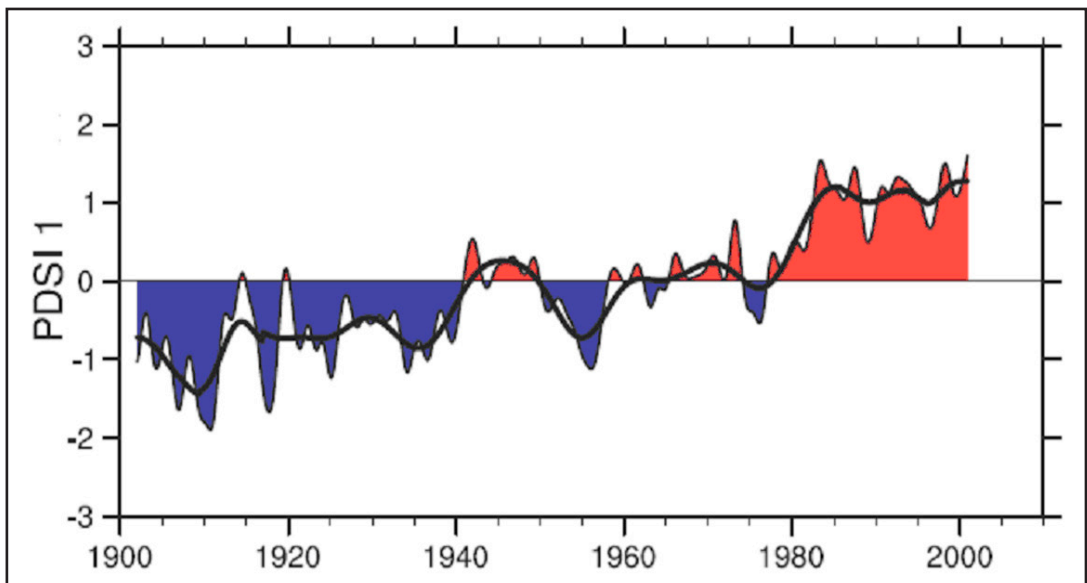
Abb. 3.1.13-2: Jährliche Flutschäden in Europa 1970–2006: 5-Jahresmittel in Werten von 2006; gestrichelte Linie: Mittelwert der gesamten Periode (nach BARREDO 2009).

der USA konnte eine Zunahme der starken Niederschläge beobachtet werden. Auch wenn einige Gebiete in Mittelasien oder Nordindien einen Rückgang der Starkniederschläge aufweisen, kann im globalen Mittel von einer sichtbaren Zunahme gesprochen werden. Auch Modellsimulationen des 20. Jahrhunderts zeigen über die letzten vier Jahrzehnte eine Tendenz zu mehr Starkregenereignissen (KARL et al. 2008; TEBALDI et al. 2006).

In einigen Regionen erlaubt es die Datenlage, differenziertere Trends aufzuzeigen, wobei allerdings wegen der unterschiedlichen Definitionen von Extremereignissen Vergleiche kaum möglich sind. So nahmen in den USA starke und sehr starke Niederschläge (definiert als die oberen 5 bzw. 1% der täglichen Niederschlagsmenge) um 14 und 20% zu, und zwar hauptsächlich während der letzten drei Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts (IPCC 2007a, 3.8.2.2). Auch europäische Untersuchungen zeigen eine deutliche Veränderung in der Charakteristik der Starkniederschlagsereignisse bzgl. Häufigkeit, Dauer und Intensität. So hat beispielsweise europaweit die Intensität von Starkregenereignissen, die in Verbindung mit mehrtägigen Feuchtperioden (länger als 5 Tage) auftreten um 6–8% pro Dekade seit 1950 zugenommen, wohingegen bei den Starkregenereignissen der kurzen Feuchtperioden (weniger als 3 Tage) eine deutliche Reduktion festgestellt wurde (ZOLINA et al. 2010). Eine Auswertung von mehr als 2000 westdeutschen Niederschlagsstationen zeigt eine deutliche Zunahme in den winterlichen Starkregenereignissen (abhängig von der Region bis zu über 10% pro Dekade) und eine deutliche Abnahme für die sommerlichen Ereignisse (ZOLINA et al. 2008).

Auch bei Niederschlagsdefiziten lassen sich weltweite Trends ausmachen. Eine globale Untersuchung, die den Niederschlag, die Temperatur und die Bodenfeuchte berücksichtigt, zeigt einen deutlichen Dürretrend über den Landgebieten der Nordhalbkugel seit der Mitte der 1950er Jahre, besonders über großen Teilen Eurasiens, Nordafrikas, Kanadas und Alaskas. Der Anteil der sehr trockenen Gebiete hat sich hiernach global seit den 1970er Jahren von 12% auf 30% mehr als verdoppelt, besonders seit Anfang der 1970er Jahre (IPCC 2007a, 3.3.4). Auch der Palmer Drought Severity Index PDSI, der am häufigsten verwendete Trockenheits-Index, zeigt seit Beginn des 20. Jahrhunderts eine deutliche Zunahme der Trockenheit über den globalen Landgebieten (Abb. 3.1.13-3).

Neben den USA und der afrikanischen Sahelzone wurden auch andere Regionen der Erde wie der Mittelmeerraum, Südafrika, Australien oder Süd- und Ostasien immer wieder von Dürren heimgesucht. In den USA fällt im 20. Jahrhundert die hohe Variabilität der trockenen Perioden auf. Deutlich ragen die Dürre-Ereignisse in den 1930er, 1950er, am Ende der 1980er Jahre und von 1999–2004 heraus, die es aber ähnlich auch in früheren Jahrhunderten gegeben hat. Für die Entstehung von Trockenheit ist in den pazifischen Gebirgsregionen der USA – neben Faktoren der Landschaftsänderung – auch die Schneeeakkumu-



**Abb. 3.1.13-3:** Änderung des Palmer Drought Severity Index (PDSI) 1900-2002 bezogen auf die globalen Landgebiete (IPCC 2007a, FAQ 3.2, Figure 1).

lation von Bedeutung, die in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts aufgrund der höheren Temperaturen in einigen Gebieten um bis zu 60% abgenommen hat (SERVICE 2004). Dadurch führen die Flüsse im Frühjahr und Sommer weniger Wasser, es verringert sich die Bodenfeuchtigkeit, und die Dürregefahr erhöht sich. Die extreme Abnahme der Niederschläge in der Sahel-Zone seit Ende der 1960er Jahre ist im 20. Jahrhundert weltweit einmalig. Teilweise lagen sie 170 mm unter dem langjährigen Mittel von 506 mm (IPCC 2007a, 3.3.4). Seit Ende der 1990er Jahre sind die Niederschläge wieder höher, so dass sich möglicherweise ein neuer Trend abzeichnet (Abb. 3.1.13-4). Auch der Mittelmeer-Raum, Südasien, Ostafrika und das südliche Australien weisen in den letzten Jahrzehnten Niederschlagsabnahmen auf (IPCC 2007a, 3.3.4).

## Niederschlagsextreme und globale Erwärmung

### Physikalische Grundlagen

Physikalische Überlegungen sprechen dafür, dass bei einer globalen Erwärmung in einigen Gebieten die Niederschläge und vor allem die Starkniederschläge zunehmen werden, in anderen aber Trockenheit und Dürren (Abb. 3.1.13-5). Höhere Temperaturen haben zwei entscheidende Folgen: 1. eine Verstärkung der Verdunstung und 2. eine Erhöhung der Wasserdampfkapazität der Atmosphäre. Die Zunahme der atmosphärischen Wasserdampfkapazität von 7% pro Grad Celsius und die höhere Verdunstung erhöhen den absoluten Wasserdampfgehalt der Luft. Die relative Feuchtigkeit verändert sich dagegen nur geringfügig. Dadurch ändert

sich in einem wärmeren Klima die Niederschlagshäufigkeit nur wenig. Pro Niederschlagsereignis steht aber mehr Wasserdampf zur Verfügung, und deshalb kommt es zu häufigeren Extremereignissen mit größeren Niederschlagsmengen. Außerdem ist es wahrscheinlich, dass sich die Atmosphäre in Bodennähe erwärmt und in der oberen Troposphäre abkühlt. Das erhöht die thermodynamische Instabilität der Atmosphäre und die Konvektion und verstärkt zusätzlich die Neigung zu Starkregen. Allgemein sollte es in vielen Regionen durch die globale Erwärmung eine Abnahme von leichten und moderaten Regenfällen geben und/oder eine Abnahme in der Häufigkeit von Niederschlagsereignissen, aber häufigere und intensivere Starkregen. Diese theoretischen Überlegungen können jedoch bisher vor allem quantitativ weder durch Daten noch durch Klimamodellrechnungen hinreichend bestätigt werden (vgl. Kap. 3.1.3 und regionale Untersuchungen in Kap. 3.1.6 und 3.1.7).

Wo die höhere Verdunstung nicht durch mehr Niederschläge ersetzt wird, kommt es zu erhöhter Trockenheit. In bestimmten Regionen spielt auch die Art der Niederschläge eine Rolle. In den Gebirgen der mittleren Breiten bilden die winterlichen Schneemassen eine Wasserreserve im Frühjahr und Sommer, wenn der Schnee schmilzt. Eine Erwärmung verursacht eine kürzere Schneesaison, und es fällt mehr Niederschlag in Form von Regen als in Form von Schnee, und der Schnee schmilzt früher. Im Frühjahr und Sommer steht weniger Bodenfeuchtigkeit zur Verfügung, was Trockenheit zur Folge haben kann. Dem wirkt allerdings entgegen, dass zumindest in den mittleren Breiten die Wolkenbedeckung zunimmt, was die Verdunstung verringern kann.

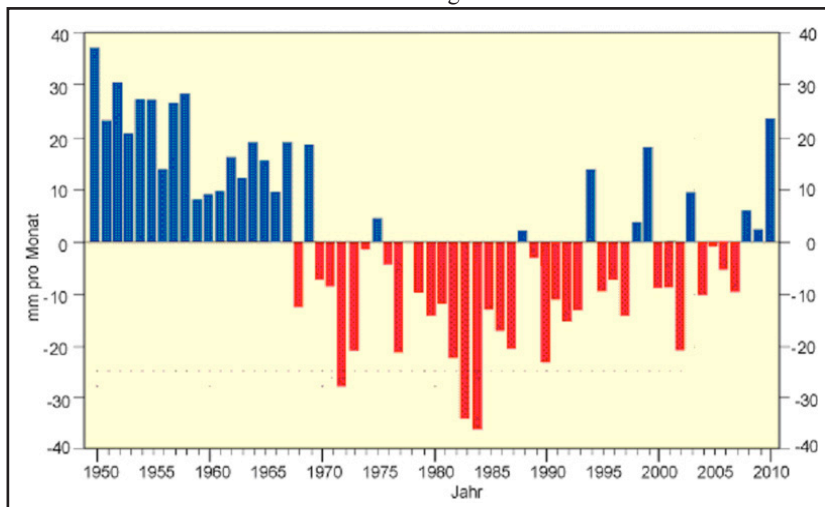


Abb. 3.1.13-4: Niederschläge im Juni-Oktober in der Sahelzone 1950–2010 in Bezug zum Mittel der gesamten Periode (nach MITCHEL 2010).

### Atmosphärische und ozeanische Dynamik

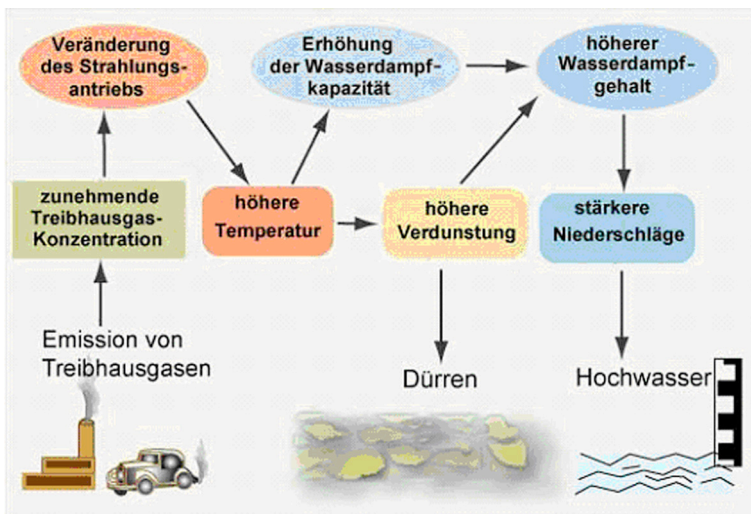
Physikalische Überlegungen sprechen somit bei einer globalen Erwärmung für eine Verstärkung von Dürren und Extremniederschlägen im globalen Mittel. Heftige Niederschläge und starke Trockenheit ereignen sich jedoch immer regional und werden durch bestimmte Wetterlagen gesteuert. Ob es in einem bestimmten Gebiet viel, wenig oder gar nicht regnet, hängt nur zu einem geringen Teil von Temperatur und Verdunstung in diesem Gebiet ab. Die Wassermenge bestimmter Niederschlagsereignisse stammt im globalen Durchschnitt zu ca. 90% aus Wasserdampf, der aus anderen Gebieten, im Wesentlichen den großen Ozeanbecken, herantransportiert wurde (TRENBERTH et al. 2003). Für den Wasserdampftransport sind atmosphärische Zirkulationssysteme, z.B. die tropischen Monsune und in den mittleren Breiten die durch die planetaren Wellen des Jetstreams gesteuerten Zughbahnen der Tiefdruckgebiete, von entscheidender Bedeutung. Diese Systeme werden über längere Zeiträume stark durch ozeanische Temperaturverhältnisse beeinflusst.

So gilt als unmittelbare Ursache der russischen Hitzewelle und der Überschwemmungen in Pakistan im Sommer 2010 eine ungewöhnlich lang anhaltende blockierende Wetterlage, eine im Mittel etwa ein bis zwei Wochen dauernde stationäre Lage der planetaren Wellen (HOERLING 2010). Dabei setzten sich größere Hoch- und Tiefdruckgebiete über längere Zeit fest und bewirkten eine lang anhaltende Hitzewelle auf der einen und Starkniederschläge auf der anderen Seite. Weitrei-

chende Wirkung auf Dürren und Starkniederschläge hat auch die pazifische ENSO-Schwankung, die durch einen Wechsel von Warm(El-Niño)- und Kalt(La-Niña)-Phasen im Oberflächenwasser des östlichen tropischen Pazifik charakterisiert ist.

Für stabile Lagen der Zirkulationsverhältnisse ist nicht selten der Ozean verantwortlich. So war die unmittelbare Ursache der 1998–2002 beobachteten Trockenheit in vielen Gebieten der niederen mittleren Breiten rund um die Nordhemisphäre ein Band von Hochdruckzellen in der oberen Troposphäre verantwortlich. Die lang anhaltende Dauer dieser Druckverteilung wurde jedoch durch den tropischen Ozean aufrechterhalten, nämlich durch den Gegensatz von ungewöhnlich warmen Oberflächentemperaturen im westlichen Pazifik und Indischen Ozean und La-Niña-bedingten ungewöhnlich kalten Temperaturen im östlichen Pazifik (HOERLING & KUMAR 2003). Auch die bekanntesten großen Dürren des 20. Jahrhunderts, die amerikanische Dust Bowl der 1930er Jahre und die Sahel-Dürre der 1970er und 1980er Jahre, wurden im wesentlichen durch die Temperaturverhältnisse im Oberflächenwasser der benachbarten Ozeane verursacht.

Zusammengefasst ist die beobachtete Zunahme der Extremereignisse nicht inkonsistent mit den erwarteten Veränderungen durch den anthropogenen Antrieb (IPCC 2007a, Box 3.6). Die Frage nach den definitiven Ursachen muss aber vorläufig unbeantwortet bleiben, insbesondere dann, wenn es um Festlegungen für ganz bestimmte regionale Ereignisse geht. Auch die natür-



**Abb. 3.1.13-5:** Durch die zunehmende Konzentration von Treibhausgasen wird die Atmosphäre erwärmt. Dadurch erhöhen sich die Verdunstung und die atmosphärische Wasserdampfkapazität. Die Folgen sind einerseits Dürren bei relativ hohem Luftdruck und andererseits mehr Wasserdampf in der Atmosphäre und stärkere Niederschläge bei relativ tiefem Luftdruck (eigene Darstellung).

lichen Schwankungen sind auf Zeitskalen von Dekaden relativ groß und können als mögliche Ursache oder eine der Ursachen für die Zunahme bestimmter Arten von Extremereignissen in den letzten Jahrzehnten nicht außer Acht gelassen werden können.

## Zukunftsprojektionen

Klima ist ein komplexes, nichtlineares System, bei dem eine Ableitung über das Vorkommen von einzelnen Ereignissen allein aus physikalischen Grundprinzipien nicht genügen kann. Modellberechnungen, die an wirklichen Klimaentwicklungen geeicht sind, stützen jedoch die theoretischen Befunde (IPCC 2007a, 9.5.4.2.2). Schon die frühesten Modellsimulationen kamen zu dem Ergebnis, dass bei einer Zunahme der Treibhausgaskonzentration die Intensität von Niederschlagsereignissen gesteigert und der prozentuale Anstieg von extremen Niederschlägen höher wird als der Anstieg der durchschnittlichen Niederschläge. Die Wiederkehrperiode von Extremniederschlägen wird hiernach nahezu überall verkürzt. Auch die Auswertungen im vierten Sachstandsbericht des IPCC (2007a) auf Basis einer Vielzahl von Modellen und Szenarien führten zu vergleichbaren Schlussfolgerungen. Nach diesen Auswertungen wird es als sehr wahrscheinlich angesehen, dass zukünftige Hitzeperioden intensiver, häufiger und länger sein werden (IPCC 2007a, Kap. 10). Die Intensität von Niederschlagsereignissen steigt insbesondere in den Gebieten der Tropen und hohen Breitengraden, in denen auch eine Zunahme der mittleren Niederschläge simuliert wird. Aber auch in Gebieten mit verringerten Niederschlagsmengen nimmt die Intensität einzelner Niederschlagsereignisse zu, dort allerdings kombiniert mit längeren Abständen zwischen den Ereignissen. Für die zentral-kontinentalen Gebiete besteht während des Sommers das Risiko zunehmender Trockenheiten. Für Europa zeigen insbesondere räumlich hochaufgelöste regionale Simulationen (IPCC 2007a, Kap. 11), dass es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Zunahme der extremen Niederschlagsereignisse in Nordeuropa kommen kann, und zu einem erhöhten Risiko für sommerliche Trockenheiten in Zentraleuropa und dem Mittelmeerraum.

Obwohl in den zurückliegenden Jahren deutliche Fortschritte in der Klimamodellierung und insbesondere der Auswertung bezüglich Extremereignisse erreicht wurden, verbleiben dennoch viele offene Fragen. Bei einigen Phänomenen, die starken Einfluss auf regionale Extremereignisse haben können, liefern verschiedene Klimamodelle stark abweichende Aussagen, beispielsweise bei der Frage der Variabilität der El-Niño-Southern-Oszillation (ENSO) oder der Nord-

atlantischen Oszillation (NAO). Beide Phänomene sind mit starken Auswirkungen auf die angrenzenden Kontinente Südamerika, Australien bzw. Europa verbunden. Hochaufgelöste Simulationen und entsprechende Auswertungen der Extremereignisse sind bisher nur für wenige Regionen systematisch durchgeführt worden.

## Schlussbetrachtung

Das Wissen über Extremereignisse ist in vielerlei Hinsicht immer noch ungenügend. Weder sind die Ursachen von Niederschlagsextremen und ihre Beziehung zur globalen Erwärmung endgültig geklärt noch wissen wir genügend über regionale Trends im 20. und noch weniger über künftige Entwicklungen im 21. Jahrhundert. Dennoch spricht einiges für die Möglichkeit, dass die Hochwasser der jüngsten Vergangenheit, und eventuell auch die Hitzewellen, Dürren und Waldbrände, nicht nur eine Laune der Natur waren, sondern auch durch die globale Erwärmung infolge der gestiegenen Treibhausgaskonzentration mit beeinflusst wurden. Damit zeichnet sich das durch physikalische Überlegungen gestützte und von Modellsimulationen prognostizierte Risiko ab, dass künftig häufiger mit solchen Katastrophen gerechnet werden muss. Die gesellschaftlichen Kosten würden dann ein Vielfaches dessen ausmachen, was heute und in nächster Zeit in eine vernünftige Klimaschutz- und Vorsorgepolitik investiert werden müsste, um diese Gefahr wenigstens zu verringern.

## Literatur

- BARREDO J.I. (2009): Normalised flood losses in Europe 1970-2006, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9, 97-104.
- BOUWER L.M., R.P. CROMPTON, E. FAUST, P. HÖPPE & R. A. PIELKE JR. (2007): Confronting Disaster Losses, *Science* 318, 5851 p. 753 DOI: 10.1126/science.1149628.
- DAI A., T. QIAN, K. E. TRENBERTH & J. D. MILLIMAN (2009): Changes in Continental Freshwater Discharge from 1948 to 2004, *Journal of Climate* 22, 2773-2792.
- HOERLING M. & A. KUMAR (2003): The Perfect Ocean for Drought, *Science* 299, 691-694.
- HOERLING M. (2010): The Russian Heat Wave of 2010 – online: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/csi/moscow2010/index.html>.
- IPCC (2007 a): Cambridge Univ. Press, Cambridge. 996 pp. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds: Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. Cambridge University Press, Cambridge, United

- Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC (2007 b): Climatic Change Impacts, Adaption and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 976 pp.
- KARL R.K., G.A. MEEHL, C.D. MILLER, S.J. HAS-SOL, A.M. WAPLE & W.L. MURRAY (eds.) (2008): Weather and Climate Extremes in a Changing Climate. Regions of Focus: North America, Hawaii, Caribbean, and U.S. Pacific Islands.
- MITCHEL T. (2010): Sahel rainfall index (20-10N, 20W-10E), 1900 - October 2010, Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean (JISAO): <http://www.jisao.washington.edu/datasets/sahel/> (letzter Zugriff 26.1.2011).
- SERVICE R.F. (2004): As the West Goes Dry, Science 303, 1124-1127.
- TEBALDI C., K. HAYHOE, J.M. ARBLASTER & G.A. MEEHL (2006): Going to the extremes. Climatic Change, 79 (3-4), 185-211.
- TRENBERTH K.E., A. DAI, R.M. RASMUSSEN & D.B. PARSONS (2003): The Changing Character of Precipitation, Bulletin of the American Meteorological Society 84, 1205-1217.
- ZOLINA O., C. SIMMER, S. K. GULEV & S. KOLLET (2010): Changing structure of European precipitation: Longer wet periods leading to more abundant rainfalls. Geophysical Research Letters, 37, L06704.
- ZOLINA O., C. SIMMER, A. KAPALA, S. BACHNER, S. GULEV & H. MÄCHEL (2008): Seasonally dependent changes of precipitation extremes over Germany since 1950 from a very dense observational network. Journal of Geophysical Research, 113, D06110.

*Dr. Dieter Kasang  
Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ)  
Bundesstrasse 53 - 20146 Hamburg  
dieter.kasang@zmaw.de*