



3.1.3 Verstärkung des Wasserkreislaufs – wichtiges Kennzeichen des Klimawandels

DANIELA JACOB & STEFAN HAGEMANN

Intensification of the hydrological cycle - An important signal of climate change: Future changes in the hydrological cycle may have important impacts on the society, e.g. with regard to flood risks, water availability and water quality. Although climate observations do not show consistent global trends in the hydrological cycle despite of the global warming in the past century, strong regional changes are possible. These changes may not only vary regionally but also seasonally. Even if for some regions the mean hydrological cycle may not change, a change in the intensity distribution of precipitation may have significant climate impacts.

Zwischen 1906 und 2005 wurde weltweit ein mittlerer Anstieg der Temperatur von 0,07 K pro Dekade beobachtet, wie aus dem 4. Zustandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007) ersichtlich ist. In den letzten 50 Jahren hat sich dieser Trend auf 0,13 K fast verdoppelt. Temperaturdaten des Goddard Institute for Space Studies (<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>) weisen darauf hin, dass 2010 das wärmste Jahr seit Beginn der Beobachtungen gewesen ist. Der Temperaturanstieg ist regional und von Jahreszeit zu Jahreszeit sehr unterschiedlich. Deutschland erfährt im Mittel eine überproportionale Erwärmung, wie SCHÖNWIESE (2004, 2008) berichtete. Eine höhere Temperatur der Atmosphäre lässt zunächst vermuten, dass sich der Wasserkreislauf intensiviert. Bis heute ist es jedoch noch nicht gelungen, eindeutige Aussagen über Veränderungen im Wasserkreislauf als Folge von Klimaänderungen zu machen.

Was ist der Wasserkreislauf und wie kann er durch Klimaänderungen beeinflusst werden?

Das Wasser auf der Erde befindet sich ständig im Kreislauf. Vereinfacht beschrieben verdunstet Wasser aus den

Meeren und über den Kontinenten und gelangt so in die Atmosphäre. Der Wasserdampf steigt auf, bildet Wolken und das Wasser fällt als Regen, Hagel oder Schnee wieder auf die Erde. Ein Teil des Niederschlages über den Landmassen wird von der Vegetation aufgefangen und kehrt durch Verdunstung wieder in die Atmosphäre zurück. Fällt der Niederschlag bis auf den Boden, so verdunstet auch hiervon ein Teil. Der Rest versickert im Erdreich, wo er langsam bis zum Grundwasser durchsickert oder hangabwärts fließt. So werden Seen und Flüsse gespeist, die das Wasser wieder bis in die Weltmeere transportieren.

Veränderungen im Wasserkreislauf können vielfältig sein. Die Speicherkapazität der Luft für Wasserdampf wird durch einen Temperaturanstieg nach der Clausius-Clapeyron-Beziehung erhöht. Die allgemein anerkannte Theorie besagt, dass, wenn die Temperatur der Atmosphäre steigt, mehr Wasser im Wesentlichen über den Meeren verdunsten kann und es mehr regnet, wovon ein Großteil über Land fällt. Zusätzlich können sich die Eigenschaften der Wolken- und Niederschlagsbildung in der Atmosphäre verändern. Hierbei spielt die Anzahl, Verteilung und Art von Aerosolen – kleinen Schwebstoffen in der Atmosphäre – eine große Rolle, da sie direkt die Wolkenbildung beeinflussen und auch in wolkenfreier Atmosphäre den Trübungsgrad

Aus: *WARNSIGNAL KLIMA: Genug Wasser für alle? 3. Auflage (2011)*
- Hrsg. Lozán, J. L. H. Graßl, P. Hupfer, L. Karbe & C.-D. Schönwiese

der Luft verändern können. Veränderungen im Wasserkreislauf können aber auch durch Änderungen der Verdunstungseigenschaften der Landoberflächen und Pflanzen hervorgerufen werden und somit auch mit der Speicherkapazität des Erdbodens wechselwirken.

Eine Verstärkung des Wasserkreislaufs bedeutet, dass sich alle einzelnen Komponenten verstärken, also mehr Verdunstung, mehr Niederschlag und mehr Abfluss.

Wurden in den letzten Dekaden Trends im Wasserkreislauf beobachtet?

Beobachtungen einzelner Komponenten des Wasserkreislaufs lassen unterschiedliche Trends in den letzten Dekaden erkennen. Eine Satellitendatenanalyse (www.hoaps.zmaw.de) zeigt von 1988–2002 eine Zunahme der Verdunstung über den Weltmeeren (Bakan, pers. Mitt. 2004), im Gegensatz zu einer beobachteten Abnahme der Verdunstung über Land, wie sie aus vielen Verdunstungsmessungen analysiert werden kann (RODERICK & FARQUHAR 2002). Diese Abnahme lässt sich so erklären, dass die Strahlungsmenge, die am Boden ankommt und somit die Verdunstung antreibt, weniger wird. Dies liegt an der Veränderung des Trübungsgrads der Atmosphäre, verursacht durch die steigende Anzahl von Aerosolen. Strahlungsmessungen zeigen, dass weltweit die am Boden ankommende Sonnenstrahlung in der Zeit von 1958 bis 1992 um mehr als 10% abgenommen hat (STANHILL & COHEN 2001).

BENGTSSON et al. (2004) nutzten einen globalen Re-Analyse Datensatz, der am Europäischen Zentrum für Mittelfristvorhersage für den Zeitraum 1958–2001 aus verfügbaren Messungen aller Art sowie Modellrechnungen erstellt wurde (SIMMONS & GIBSON 2000). Sie untersuchten mögliche Trends in der atmosphärischen Temperatur, der kinetischen Energie und dem Wasserdampfgehalt. Dieser stieg mit jedem Grad Temperaturzunahme global im Mittel um 1,55 mm (ca. 6%), ein Wert der im Einklang mit der Clausius-Clapeyron-Beziehung steht.

Weitere Komponenten des Wasserkreislaufs sind Niederschlag und Abfluss. Diese sind regional extrem variabel, so dass sich aus den Beobachtungen kein global einheitlicher Trend ableiten lässt.

Wie könnte sich der Wasserkreislauf durch mögliche Klimaänderungen verändern?

Um Aussagen über mögliche klimabedingte Änderungen im Wasserkreislauf machen zu können, werden

heute globale und regionale Klimamodelle verwendet. Diese Modelle beschreiben die physikalischen Prozesse im Klimasystem so gut wie möglich und berechnen z.B. den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre, die Verdunstung, den Niederschlag und den Abfluss global und auch in einzelnen Regionen der Erde für heutige Klimabedingungen und mögliche Zukunftsszenarien. Folgendes Vorgehen wird dabei verwendet: Zunächst werden die Modelle für vergangene Dekaden gerechnet. Ihre Ergebnisse werden mit Beobachtungen aller Art verglichen und so kann eine Aussage über die Güte der Klimamodells-Simulation gemacht werden. Dann wird angenommen, dass sich unter veränderten Klimabedingungen die physikalischen Gesetze nicht verändern.

Um eine zukünftige Entwicklung des Klimas berechnen zu können, wird von einer Veränderung der Treibhausgas-Konzentrationen in der Atmosphäre ausgegangen, die durch menschliche Aktivitäten hervorgerufen wird. Im IPCC sind mögliche Entwicklungen (Szenarien) der Weltbevölkerung und des Weltwirtschaftswachstums für heute bis 2100 in Treibhausgasemissionen umgerechnet worden. Diese gehen in die Klimamodellrechnungen ein. Globale Klimasimulationen zeigen nur eine geringe Verstärkung des Wasserkreislaufes; man kann jedoch extrem starke Veränderungen in bestimmten Regionen beobachten. Um diese genauer zu untersuchen, werden regionale Klimamodelle eingesetzt, die wesentlich mehr Details in der betreffenden Region berücksichtigen können. Zunächst werden jedoch globale IPCC-Simulationen durchgeführt, die dann zum einen direkt analysiert werden und zum anderen als Eingabegrößen (Randbedingungen) für die regionalen Berechnungen verwendet werden.

Berechnungen des Wasserkreislaufes können nicht nur vom Konzentrationsanstieg der Treibhausgase beeinflusst werden, sondern auch von Veränderungen der Aerosole, wie oben bereits erwähnt. LIEPERT et al. (2004) diskutieren die Möglichkeit, dass Aerosole eine Verstärkung des Wasserhaushaltes in einem wärmeren Klima verzögern können. Berechnungen mit dem globalen Klimamodell des Max-Planck-Institutes für Meteorologie zeigen, dass die Wechselwirkungen zwischen einer Erwärmung durch Treibhausgase und den direkten und indirekten Effekten von Aerosolen und Wolken die Beobachtungen erklären können. Diese zeigen, wie oben beschrieben, einen Temperaturanstieg trotz Abnahme der am Boden ankommenden Sonneneinstrahlung in den letzten 4 Dekaden. LIEPERT et al. (2004) zeigen, dass die Reduktion der ankommenden Sonnenstrahlung durch Wolken und Aerosole nur teilweise durch die verstärkte langwellige Strahlung der wärmeren und feuchteren Atmosphäre aufgehoben

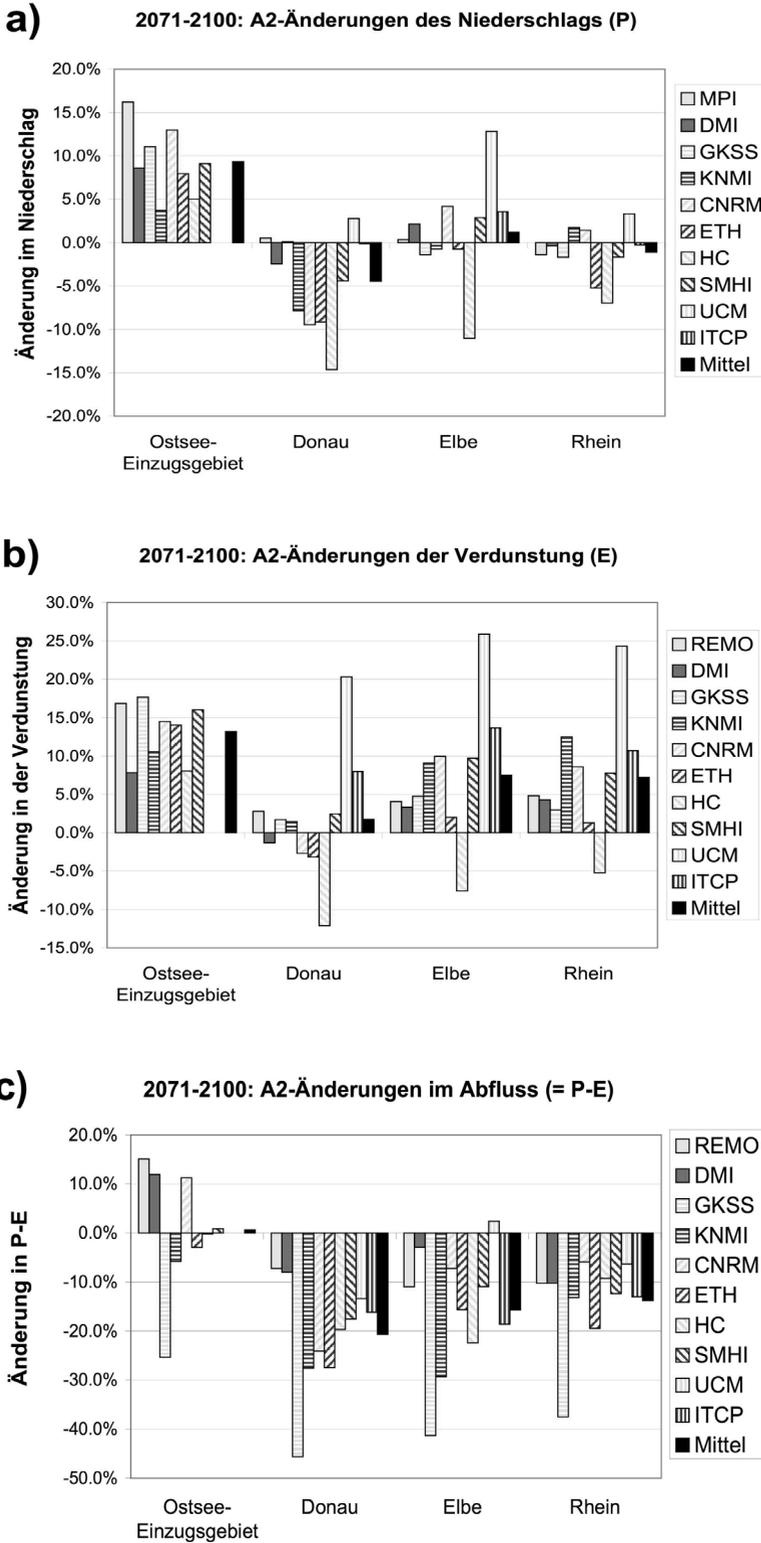
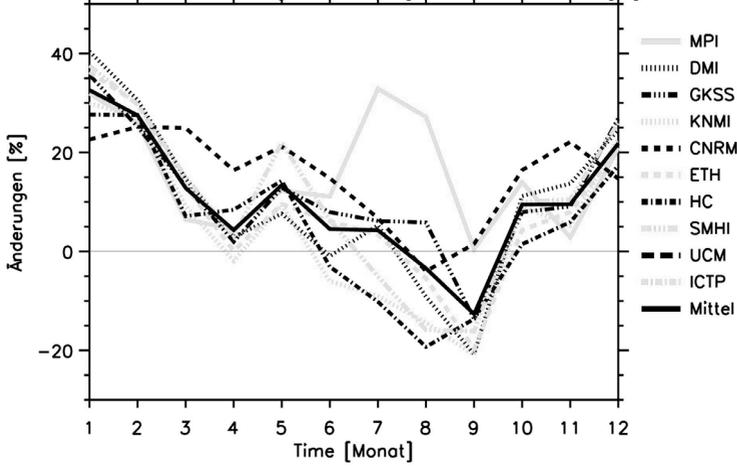


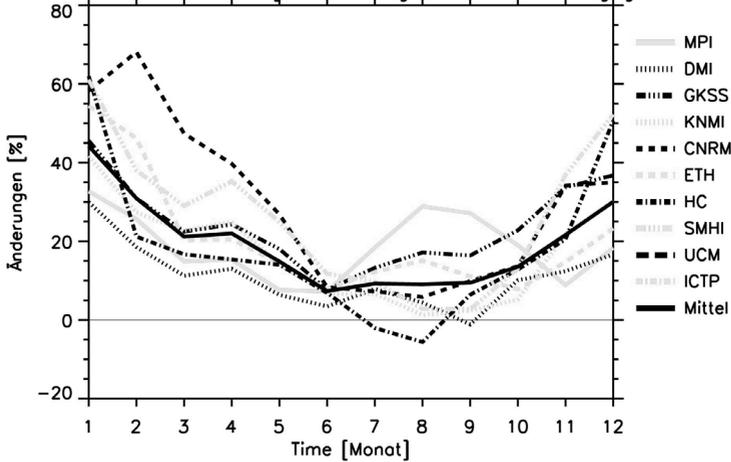
Abb. 3.1.3-1: Vorhergesagte Änderungen in a) Niederschlag, b) Verdunstung, und c) Abfluss in den Einzugsgebieten von Ostsee, Donau, Elbe und Rhein.

2071–2100 Niederschlags-Änderungen: Ostsee-Einzugsgebiet



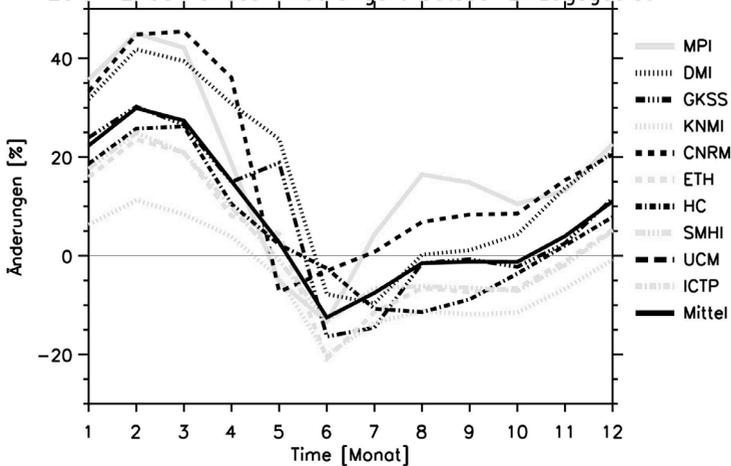
a)

2071–2100 Verdunstungs-Änderungen: Ostsee-Einzugsgebiet



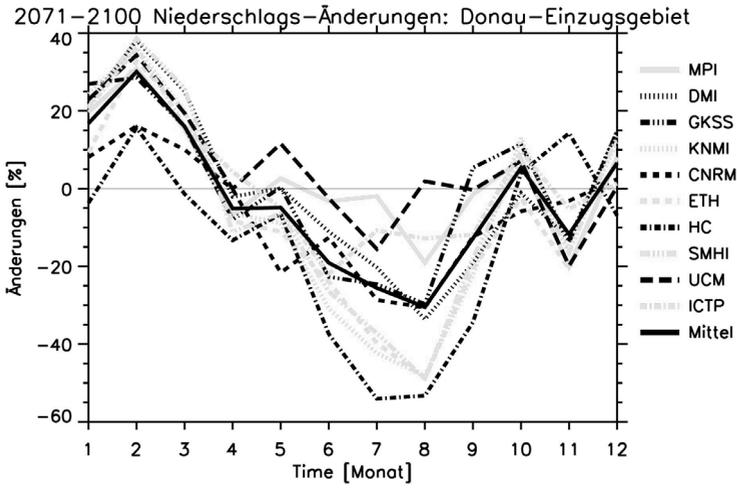
b)

2071–2100 Abfluss-Änderungen: Ostsee-Einzugsgebiet

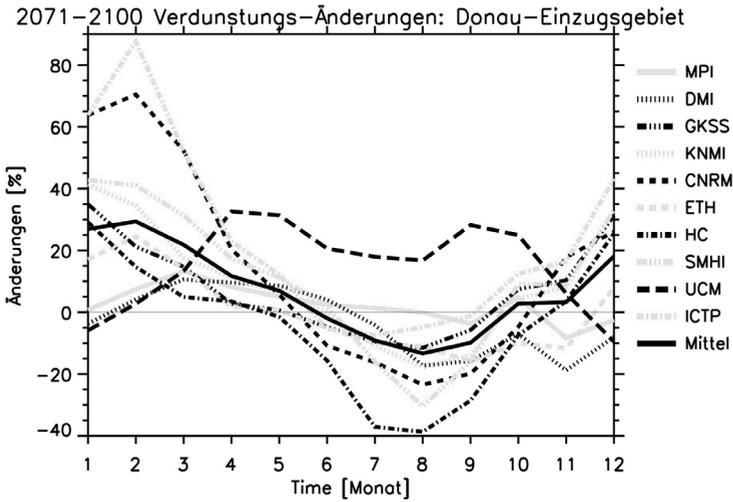


c)

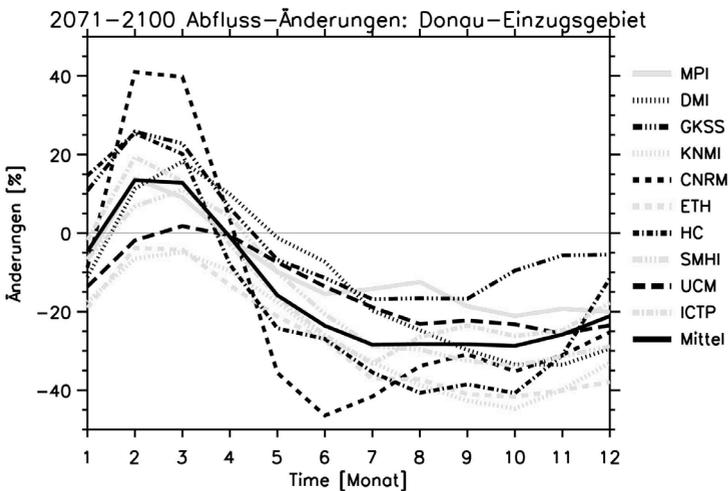
Abb. 3.1.3-2: Vorhergesagte Änderungen im Jahresgang a) des Niederschlags, b) der Verdunstung, und c) des Abflusses im Ostsee-Einzugsgebiet



a)



b)



c)

Abb. 3.1.3-3: Vorhergesagte Änderungen im Jahresgang a) des Niederschlags, b) der Verdunstung, und c) des Abflusses im Donau-Einzugsgebiet

werden kann. Trotz globaler Erwärmung wird somit an der Erdoberfläche die Verdunstung abgeschwächt, was auch zu einer Verringerung des Niederschlags führt. Beide Effekte, die Erwärmung der Atmosphäre durch Treibhausgase und der Einfluss von Wolken und Aerosolen, konkurrieren also und können zu einer verzögerten oder abgeschwächten Verstärkung des Wasserkreislaufs führen. Man geht jedoch davon aus, dass ein starker Erwärmungseffekt durch Treibhausgase den Aerosoleffekt im Laufe der Zeit überlagern wird.

Was sagen regionale Klimamodelle über den Wasserkreislauf in Europa aus?

Globale Klimamodelle liefern auch heute noch räumlich nur relativ grobe Informationen. Aus diesem Grund werden regionale Klimamodelle in globale Berechnungen eingebettet, um den Einfluss möglicher globaler Klimaänderungen auf eine bestimmte Region untersuchen zu können. Diese Aussagen sind natürlich ebenso von der Güte der globalen und regionalen Modelle abhängig wie vom gewählten Klimaszenario. Um die Wahrscheinlichkeit z.B. für eine Verstärkung des Wasserkreislaufes in Europa angeben zu können, werden deshalb viele verschiedene Modelle europäischer Klimaforschungsinstitutionen verwendet, so wie es in dem EU-Projekt PRUDENCE (prudence.dmi.dk) der Fall ist. Fokussiert auf Deutschland wurde dieses im BMBF-Projekt QUIRCS (<http://www.TU-Cottbus.De/meteo/Quircs/home.html>) des deutschen Klimafor-

schungsprogramms DEKLIM (www.deklm.de) getan.

Für das Klimaänderungsszenario A2, das von einem relativ starken Anstieg der Treibhausgase bis 2100 ausgeht (IPCC 2007) und eine global gemittelte Temperaturerhöhung um ca. 3,5° C bis 2100 bewirken könnte, wurden zahlreiche Simulationen innerhalb von PRUDENCE durchgeführt. Eine Analyse des Wasserkreislaufs in verschiedenen Flusseinzugsgebieten zeigt im Vergleich zu heutigen Bedingungen für den Zeitraum 2070–2100 einen Anstieg des Niederschlags im Ostsee-einzugsgebiet von etwa 10% im Jahresmittelwert (*Abb. 3.1.3-1*), wobei die stärkste Zunahme mit bis zu 40% für den Winter und eine geringe Niederschlagsabnahme für den Spätsommer berechnet wird (*Abb. 3.1.3-2a*). Die Verdunstungsänderung in dieser Region ist im gesamten Jahr positiv und hat ebenfalls ihr Maximum im Winter (*Abb. 3.1.3-2b*). Dies führt dazu, dass die Abflussmenge durch die Flüsse in die Ostsee Ende des Winters bzw. im Frühling um mehr als 20% zunehmen kann (*Abb. 3.1.3-2c*) im Einzelfall stark beeinflusst durch den Beginn der Schneeschmelze.

In den Einzugsgebieten von Rhein, Elbe und Donau wird eine andere Veränderung der Wasserhaushaltskomponenten berechnet. Es ergibt eine Reduktion des Abflusses von 10 bis 20% im Jahresmittel, hervorgerufen durch eine Zunahme der Verdunstung in diesen Einzugsgebieten bei weitgehend unverändertem Niederschlagsmittel (siehe erneut *Abb. 3.1.3-1*). Der berechnete Niederschlag nimmt nur in der zweiten Hälfte des Winters zu und zeigt eine starke Abnahme im Sommer. Ähnlich verhält sich die Verdunstung. Speziell bei

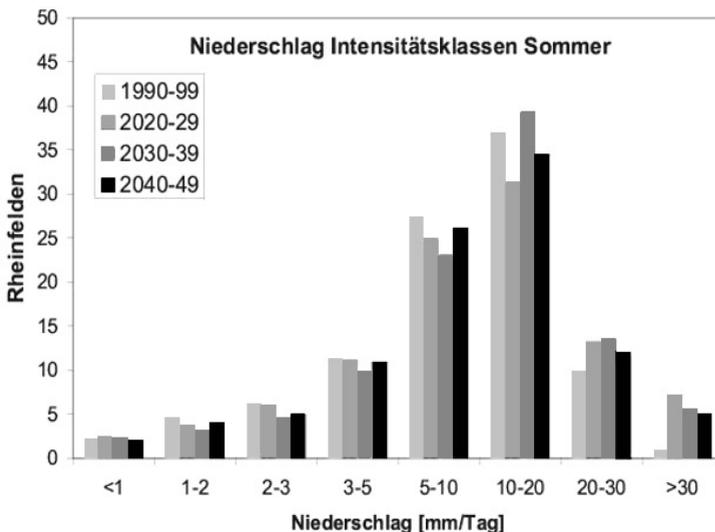


Abb. 3.1.3-4: Niederschlags-Intensitätsklassen im Rheinfelden-Einzugsgebiet

der Donau wirkt sich dieses Austrocknen im Sommer stark auf den Abfluss aus, der zwar im Februar/März durch den erhöhten Winterniederschlag (Abb. 3.1.3-3a) etwas zunimmt, im Rest des Jahres jedoch um bis zu 20% zurückgeht (Abb. 3.1.3-3c). Derartige Verringerungen im mittleren Abfluss werden sich signifikant auf die Wasserverfügbarkeit und Nutzbarkeit in den betroffenen Gebieten auswirken.

Aber nicht nur die Niederschlagsmengen können sich unter veränderten Klimabedingungen verändern, sondern auch die Niederschlagsintensitäten, d.h. die Niederschlagsmenge pro Zeiteinheit. Mit dem regionalen Klimamodell REMO des Max-Planck-Institutes für Meteorologie wurde im Projekt KLIWA (www.kliwa.de) ein IPCC B2 Szenario bis 2050 berechnet. Der Anstieg der Treibhausgase und somit auch der Anstieg der globalen Temperatur in A2 und in B2 ist bis 2050 sehr ähnlich. Allerdings wurden diese Berechnungen mit wesentlich höherer räumlicher Auflösung durchgeführt, so dass der Einfluss der topographisch sehr variablen Alpen auf die Niederschlagsbildung im Rheineinzugsgebiet adäquat berechnet werden konnte. Aus den Ergebnissen wird deutlich (Abb. 3.1.3-4), dass im alpinen Teil des Rheineinzugsgebiets (bis zum Pegel Rheinfelden) bis 2050 eine Zunahme der Starkniederschläge insbesondere in den Sommermonaten auftreten kann. Dies wird besonders deutlich im Voralpenland, aber auch in weiten Teile Europas zeigen die hochauflösenden regionalen Simulationen einen ähnlichen Trend.

Schlussbetrachtung

Trotz einer globalen Erwärmung im vergangenen Jahrhundert lassen die Beobachtungen keinen konsistenten Trend im globalen Wasserkreislauf erkennen. Experimente mit regionalen Klimamodellen zeigen jedoch, dass regional starke Veränderungen im Wasserkreislauf mit einer Erwärmung einhergehen können. Diese Veränderungen können sich dabei sowohl regional als auch saisonal sehr unterschiedlich auswirken. Neben einer Intensivierung des Wasserkreislaufs, wie es z.B. für das Ostsee-Einzugsgebiet vorhergesagt wird, kann es dabei auch zu einem Austrocknen kommen, wie es für das Donau-Einzugsgebiet berechnet wurde. Und selbst wenn sich der Wasserkreislauf im Mittel nicht stark ändert, kann eine Verschiebung in der Niederschlagsintensitätsverteilung zu klimarelevanten Veränderungen führen.

Danksagung: Wir danken Ralf Podzun für die technische Unterstützung bei der Durchführung der REMO-Klimasimulationen, und Katharina Bülow für die Bereitstellung ihrer Resultate für das Rheinfeldens-Einzugsgebiet. Die in diesem Kapitel beschriebenen Ergebnisse konnten Dank der Unterstützung durch das EU-Projekt PRUDENCE und das Projekt KLIWA erzielt werden.

Literatur

- BENGTSSON L., ST. HAGEMANN & K. I. HODGES (2004): Can Climate Trends be Calculated from Re-Analysis Data? *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, No. D11.
- IPCC (2007): *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, 996 pp.
- LIEPERT B. G., J. FEICHTER, U. LOHMANN & E. ROECKNER (2004): Can aerosols spin down the water cycle in a warmer and moister world? *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 31.
- RODERICK M. & G. FARQUHAR (2002): The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years, *Science*, 298, 1410-1411.
- SIMMONS A. J. & J. K. GIBSON (2000): The ERA-40 Project Plan, ERA-40 Project report Series No. 1, ECMWF, Reading, UK, 63 pp.
- STANHILL G. & S. COHEN (2001): Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences, *Agri. For. Meteorol.*, 107, 255-278.
- SCHÖNWIESE C.-D. (2008): *Klimatologie*. Ulmer (UTB), Stuttgart, 472 pp.
- SCHÖNWIESE C.-D. (2004): Globaler Klimawandel im Industriezeitalter. *Geogr. Rdsch.* 56, 4-9.

*Dr. Daniela Jacob & Dr. Stefan Hagemann
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Bundesstraße 53 - 20146 Hamburg
Daniela.Jacob@zmaw.de
Stefan.Hagemann@zmaw.de*