

2.6 Erwärmung des Meeres und Zunahme des Niederschlags

STEFAN HAGEMANN, DANIELA JACOB & STEPHAN BAKAN

Warming of the ocean and increase in precipitation: Despite of the global warming in the past century, observations do not show a consistent trend in the global water cycle. Satellite data indicate that precipitation averaged over the global oceans is increasing and the Hadley circulation is enhancing, with increasing precipitation in the inner tropics and decreasing values in the subtropics. Even though these changes are not very significant, they are in line with changes of the global precipitation field that are calculated for a warmer world.

Mit der Erwärmung der Meere und der Atmosphäre steigt die Kapazität der Atmosphäre, Wasserdampf aufnehmen zu können. Dies kann zu weltweiten Veränderungen der Niederschläge führen. Hierzu gehören die Veränderungen der Niederschlagsintensitäten und -Häufigkeiten ebenso wie Veränderungen der räumlichen Verteilungsmuster. Über den Landmassen können diese Veränderungen relativ gut gemessen werden, auch wenn es immer noch Regionen weltweit gibt, in denen der Niederschlagsmessnetz nur sehr dünn ist und die Informationen aus Satellitenmessungen noch mit Unsicherheiten verbunden sind. Über den Ozeanen ist die Analyse der Niederschläge jedoch wesentlich schwieriger.

Großflächige Niederschlags-Beobachtungen über den Ozeanen

Da es so gut wie keine Niederschlags-Messstationen über den Ozeanen gibt, werden großflächige Niederschlagsverteilungen üblicherweise aus Satellitendaten abgeleitet. Die Satelliten messen den Niederschlag jedoch nicht direkt, sondern er wird mit Hilfe von Fernerkundungsalgorithmen aus gemessenen Strahlungsdaten

in verschiedenen Frequenzbändern (bevorzugt im Mikrowellenbereich) bestimmt. Dabei hängt die Qualität der abgeleiteten Niederschläge stark vom verwendeten Messprinzip und dem zugehörigen Algorithmus sowie den verfügbaren Zusatzinformationen ab. Da der Niederschlag ein intermittierendes Ereignis mit großer räumlicher und zeitlicher Variabilität ist, weisen die verfügbaren Beobachtungsdatensätze teilweise große Unterschiede auf, auch wenn die generellen Muster ähnlich sind (siehe z.B. HAGEMANN 2002 oder ANDERSSON et al. 2011).

Abb. 2.6-1 zeigt die Verteilung der mittleren Niederschlagsintensität über dem globalen eisfreien Ozean und den Jahresgang der zonalen Mittel für den Zeitraum von 1988 bis 2005 in HOAPS (Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite Data) (ANDERSSON et al. 2011). Neben den starken Niederschlagsmaxima in der innertropischen Konvergenzzone und der südostasiatischen Warmpool-Region fallen vor allem die hohen Winter-Niederschläge über den warmen westlichen Randströmen von Atlantik und Pazifik auf.

Die größten Unterschiede zwischen den Klimatologien existieren über dem tropischen Pazifik und den hohen Breiten (ANDERSSON et al. 2011). Ergebnisse von

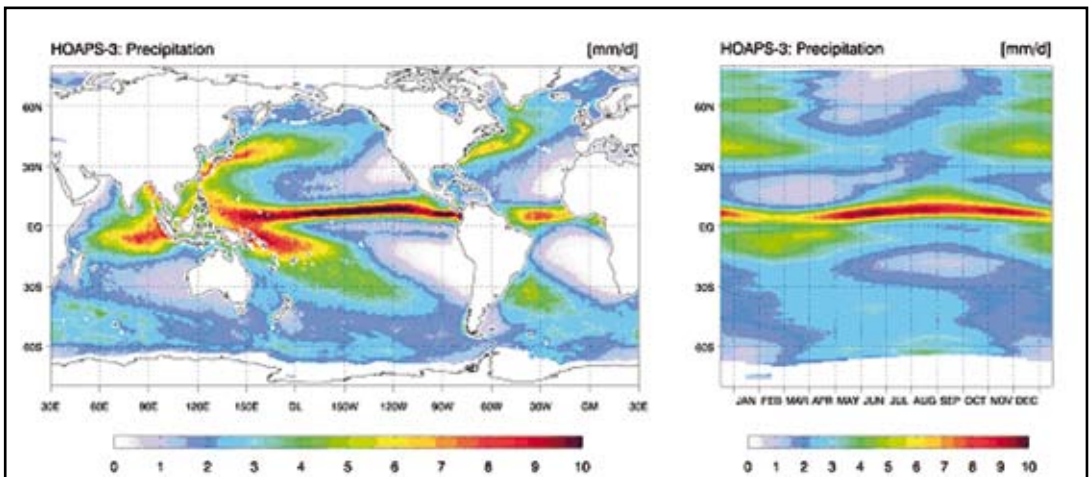


Abb. 2.6-1: Globale Verteilung der mittleren Niederschlagsintensität (in mm/d) über dem eisfreien Ozean im HOAPS-Datensatz für den Zeitraum 1988–2005 (**links**) und zugehöriger Jahresgang der zonalen Mittel (**rechts**) nach ANDERSSON et al. (2010).

KLEPP et al. (2005, 2010) weisen jedoch darauf hin, dass die HOAPS-Daten (www.hoaps.org) extreme Niederschläge über dem Nordatlantik häufig besser darstellen als vergleichbare Produkte.

Beobachtete Trends

Trotz der großen Fortschritte bei der Nutzung von Satellitendaten ist die Ableitung von Niederschlagstrends über dem globalen Ozean noch immer reichlich unsicher. Abb. 2.6-2 zeigt den Verlauf der Niederschlagsrate über dem globalen Ozean in dem durch Satelliten gut abgedeckten Zeitraum seit 1988 für vier verschiedene Datensätze. HOAPS verwendet zur Ableitung ausschließlich und das GPCP (Global Precipitation Climatology Project) weitgehend Informationen von passiven Mikrowelleninstrumenten, für TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission der NASA und JAXA) (erst ab 1998 verfügbar) wird zusätzlich die Information eines aktiven Niederschlagsradars genutzt und ERA-Interim ist die aktuellste Reanalyse der global verfügbaren Beobachtungsdatensätze des EZMWF (Europäischen Zentrums für mittelfristigen Wettervorhersage). Während sich die Ergebnisse aus HOAPS und GPCP nur unwesentlich unterscheiden, liegt der durchschnittliche Niederschlag in ERA-interim um etwa 5 bis 10% höher und beim TRMM-Produkt um etwa 5 bis 10% niedriger. Die zeitlichen Entwicklungen unterscheiden sich aber deutlich. Die HOAPS-Datenreihe zeigt einen schwachen aber statistisch nicht signifikanten Anstieg des Niederschlages über den Zeitraum 1988–2006. Dagegen nimmt die Niederschlagsrate im TRMM-Datensatz ziemlich rapide und eher unplausibel ab. Trotz der potentiell höheren Genauigkeit durch das Niederschlagsradar scheint die Beimischung weiterer Datenquellen in diesem Produkt noch nicht zufriedenstellend gelungen zu sein.

In der ERA-interim-Reanalyse nimmt die mittlere Niederschlagsrate ebenfalls leicht ab, was aber im

Gegensatz zum deutlichen Anstieg dieser Größe in der hier nicht gezeigten NCEP-Reanalyse steht.

Die Frage danach, was denn nun richtig ist, lässt sich nicht leicht beantworten. Generell ist bei zunehmender Lufttemperatur und der Annahme konstanter relativer Feuchte nach der CLAUSIUS-CLAPEYRON'schen Gleichung eine Zunahme des atmosphärischen Wasserdampfgehalts von etwa 7% pro Grad Lufttemperatur zu erwarten. Damit könnte eine ähnliche Zunahme aller Elemente des Wasserkreislaufes, also auch des Niederschlages verbunden sein. WENTZ et al. (2007) zeigten, dass ihre Ableitung des globalen Niederschlags aus passiven Mikrowellendaten über dem Ozean und plausiblen Annahmen über Land in den letzten 2 Jahrzehnten die erwartete Zuwachsrate aufweist. Die erwähnte, wenn auch statisch nicht signifikante, Zunahme des global gemittelten ozeanischen Niederschlag in HOAPS weist ebenfalls etwa diese erwartete Größe auf.

Auch die räumliche Verteilung des linearen Niederschlagstrends in HOAPS ist in den wenigsten Gebieten signifikant. Dominant ist eine Zunahme des Niederschlags im tropischen Warmpool und in der Innertropischen Konvergenzzone. Zusammen mit der eher abnehmenden Tendenz in den angrenzenden subtropischen Regionen deutet sich hier die Auswirkung einer verstärkten Hadley-Zirkulation an. Polwärts davon findet man in HOAPS tendenziell eine Abnahme über den warmen Randströmen und eine Niederschlagszunahme nahe der Eiskanten.

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

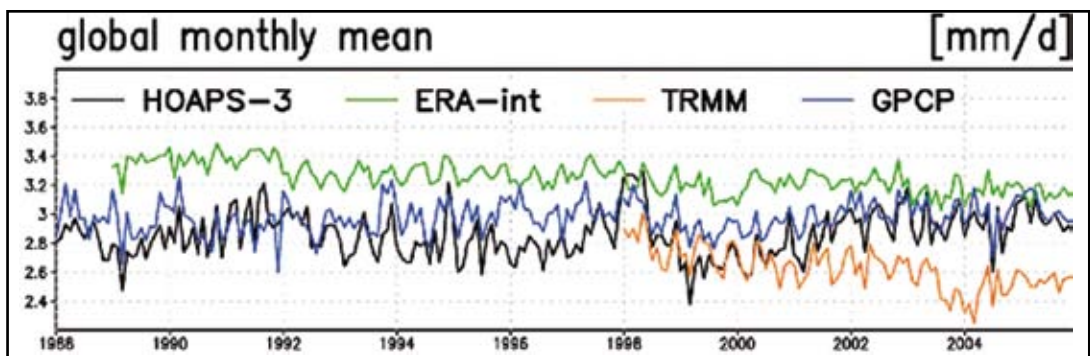


Abb. 2.6-2: Zeitlicher Verlauf der mittleren Niederschlagsintensität (in mm/d) über dem eisfreien Ozean für den Zeitraum 1988–2006 in verschiedenen Datensätzen nach ANDERSSON et al. (2010).

im Klimasystem so gut wie möglich und berechnen z.B. den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre, die Verdunstung, den Niederschlag und den Wasserabfluss 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 des Klimamodells 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 weitgehend durch menschliche Aktivitäten beeinflussten Veränderung der Treibhausgase in der Atmosphäre ausgegangen. Im IPCC sind mögliche Entwicklungen (Szenarien) der Weltbevölkerung und des Weltwirtschaftswachstum 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 aus der Region berücksichtigen können. Zunächst werden jedoch globale IPCC Simulationen durchgeführt, die dann zum einen direkt analysiert werden und zum anderen als Eingabegrößen für die regionalen Berechnungen verwendet werden.

Berechnungen des Wasserkreislaufes können nicht nur von dem Anstieg der Treibhausgase beeinflusst werden, sondern auch von Veränderungen der Aerosole, wie oben berichtet. 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 zeigen, dass die Wechselwirkungen zwischen einer Erwärmung durch Treibhausgase und den direkten und indirekten Effekten von Aerosolen und Wolken die Beobachtungen eines Temperaturanstieges trotz Abnahme der am Boden ankommenden Sonneneinstrahlung in den letzten 4 Dekaden erklären können. 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 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 stärker werdender Erwärmungseffekt durch Treibhausgase den Aerosoleffekt im Laufe der Zeit übertreffen wird.

Was sagen globale Klimamodelle über zukünftige Änderungen des Niederschlags aus?

Ungefähr 21 verschiedene GCMs (General Circulation Models) wurden benutzt, um Klimaänderungssimulationen für den 4. Sachstandsbericht des IPCC durchzuführen. Diese Simulationen folgen hauptsächlich drei Emissions-Szenarien, die von eher niedrigen (B1), moderaten (A1B) und relativ starken (A2) Anstiegen der Treibhausgase bis 2100 ausgehen. In allen drei Szenarien ist die projizierte globale Erwärmung über Land größer als über den Meeren, und sie ist besonders ausgeprägt in den hohen Breiten, wie *Abb. 2.6-3* am Beispiel des A1B-Szenarios zeigt. Dort erkennt man auch, dass die GCMs in Mustern der projizierten Erwärmung weitgehend übereinstimmen. Die Multimodell-Mittelwerte der projizierten globalen Erwärmung (2080–2099 verglichen mit 1980–1999) betragen 1.79°C, 2.65°C und 3.13° für die drei Szenarien (IPCC 2007).

Einhergehend mit dieser Erwärmung nimmt der globale Niederschlag generell in allen drei Szenarien zu, was auf eine Verstärkung des globalen Wasserkreislaufs hinweist. DOUVILLE et al. (2002) haben gezeigt, dass dies u.a. mit einer größeren Wasserhalte-Kapazität der Atmosphäre zusammenhängt. Deren Multi-Modell-Mittelwert variiert ungefähr proportional zur mittleren Erwärmung, wobei größere Unsicherheiten im Verhalten des zukünftigen Wasserkreislaufs teilweise dadurch entstehen, dass die Modelle unterschiedliche Reaktionen des tropischen Niederschlags auf die globale Erwärmung zeigen (DOUVILLE et al., 2005). Insgesamt nimmt der Niederschlag über Land um ca. 5% zu, während die Zunahme über dem Ozean 4% beträgt, mit Änderungen, die von Region zu Region verschieden und gegensätzlich ausfallen. Hierbei machen die Änderungen über den tropischen Ozeanen zwischen 10°S und 10°N ungefähr die Hälfte des Anstiegs im globalen Mittelwert aus.

Anders als für die Temperatur zeigen die 21 GCMs weniger Übereinstimmung in Richtung und Betrag der möglichen Änderungen des Niederschlags im 21. Jahrhundert, wobei substantielle räumliche und saisonale Unterschiede auftreten, selbst im Multi-Modell-Mittelwert (*Abb. 2.6-4*, links).

Die Modelle zeigen eine konsistente Zunahme des Niederschlags in den hohen Breiten sowohl im Som-

mer als auch im Winter, wobei häufig eine mittlere Zunahme von mehr als 20% projiziert wird (EMORI & BROWN 2005). Letzteres trifft auch auf den äquatorialen pazifischen Ozean, Ostafrika, Zentralasien und das Tibetische Plateau zu. Zunahmen des Niederschlags über den tropischen Ozeanen und in einigen Monsunregionen (z.B. südasiatischer Monsun in JJA, australischer Monsun in DJF) sind erwähnenswert. Obgleich weniger lokal konsistent, existiert auch eine breite Übereinstimmung in den Tropen, speziell über den tropischen Teilen Zentralamerikas und der Karibik (NEELIN et al. 2006). Es werden weitläufige Abnahmen des Sommer-niederschlags in mittleren Breiten projiziert, abgesehen von Zunahmen im östlichen Asien. Es fallen Niederschlagsrückgänge in vielen subtropischen Regionen ins Auge, speziell an den subtropischen Westküsten der Kontinente, sowie beträchtliche Abnahmen in der Karibik und der Mittelmeer-Region, die bis zu 20% betragen können. Die Konsistenz in der Richtung der projizierten Änderung ist oft hoch, speziell in einigen Regionen wie den tropischen Bereichen Zentralamerikas und der Karibik.

Regionen mit großer Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung des Niederschlags liegen häufig nahe den Grenzen zu den Regionen, die ein robustes Signal (nasser oder trockener) aufweisen, wobei diese Grenzen von Modell zu Modell verschieden sind. Diese Regionen zeigen teilweise jahreszeitlich unterschiedliche Signale, wie z.B. Zentraleuropa, wo die Niederschläge im Winter vermutlich zunehmen, im Sommer dagegen abnehmen werden. Hochoaufgelöste Modellergebnisse zeigen, dass einige dieser großskaligen Signale in Regionen mit einem starken orographischen Einfluss lokal deutlich unterschiedlich ausfallen können. In manchen Fällen kann dies zu Signalen führen, die in die gegensätzliche Richtung zum großskaligen Verhalten weisen. Außerdem sind großflächige und Rasterbox gemittelte Projektionen des Niederschlags oft sehr verschieden zu den lokalen Änderungen innerhalb eines Gebietes (GOOD & LOWE 2006). Dies wurde auch unterstützt von HAGEMANN et al. (2009), deren Studie ergab, dass die bessere Beschreibung von Oberflächenprozessen, einer höheren Auflösung und der nichtlinearen Wechselwirkungen in einem regionalen Klimamodell eine

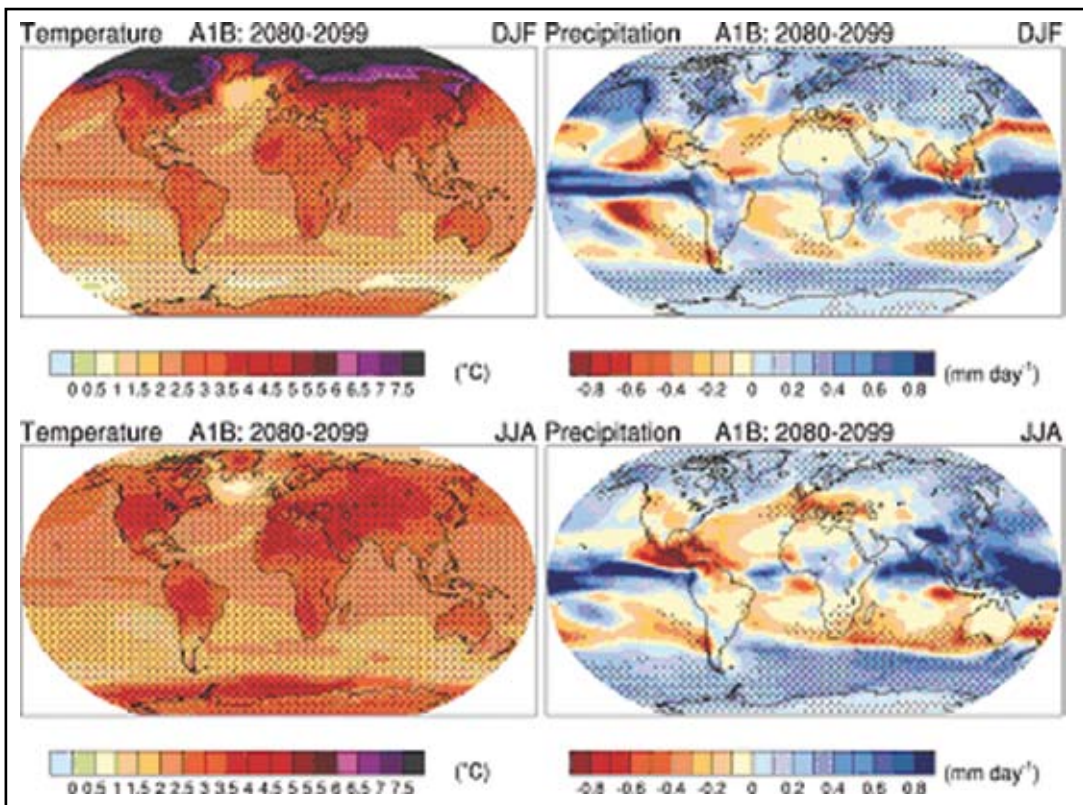


Abb. 2.6-3: Mittelwerte der projizierten Multi-Modell-Änderungen der bodennahen Luft-Temperatur (°C, links) und des Niederschlags (mm/Tag, rechts) für die borealen Winter (DJF, oben) und Sommer (JJA, unten). Gezeigt sind die Änderungen nach dem SRES A1B-Szenario für den Zeitraum 2080-2099 relativ zu 1980-1999. Punktierte Flächen kennzeichnen Regionen, wo die Größe der mittleren Änderung größer als die Inter-Modell-Standardabweichung ist (IPCC 2007).

bessere Beschreibung des heutigen Klimas liefert, und damit auch eine glaubwürdigere Projektion von Klimaänderungen als das antreibende GCM. Diese Punkte demonstrieren, dass es inadäquat ist, das Verhalten auf kleinen Skalen von großflächigen Mittelwerten abzuleiten.

Die Zunahme des globalen Niederschlags (Abb. 2.6-4, links) geht einher mit projizierten Anstiegen des global-gemittelten Wasserdampfs und der Verdunstung. Hier lieferten WETHERALD & MANABE (2002) eine gute Beschreibung der Mechanismen von hydrologischen Änderungen, wie sie von einem GCM simuliert werden. In GCMs kompensieren die mittleren Änderungen der Verdunstung die Änderungen des Niederschlags global, aber nicht lokal, da sich auch der Transport des Wasserdampfs in der Atmosphäre ändert. Die mittlere jährliche Verdunstung (Abb. 2.6-4, rechts) nimmt über großen Teilen der Ozeane zu, wobei die räumlichen Variationen dazu tendieren, der Erwärmung der Oberfläche (Abb. 2.6-3) zu folgen. Die Konvergenz atmo-

sphärischer Feuchte nimmt über den äquatorialen Ozeanen und über den hohen Breiten zu (KUTZBACH et al. 2005; BOSILOVICH et al. 2005). Über Land werden die Änderungen des Niederschlags von Änderungen der Verdunstung und des Abflusses kompensiert.

Schlussbetrachtung

Trotz einer globalen Erwärmung im vergangenen Jahrhundert zeigen die Beobachtungen keinen konsistenten Trend im globalen Wasserkreislauf. Satellitendaten deuten daraufhin, dass der über den globalen Ozeanen gemittelte Niederschlag zunimmt und sich die Hadley-Zirkulation verstärkt, mit zunehmenden Niederschlägen in den inneren Tropen und abnehmenden Werten in den Subtropen. Diese wie auch die wesentlichen außertropischen Änderungen sind, obwohl nicht besonders signifikant, durchaus kompatibel mit den für eine wärmere Welt berechneten Änderungen im globalen Niederschlagsfeld.

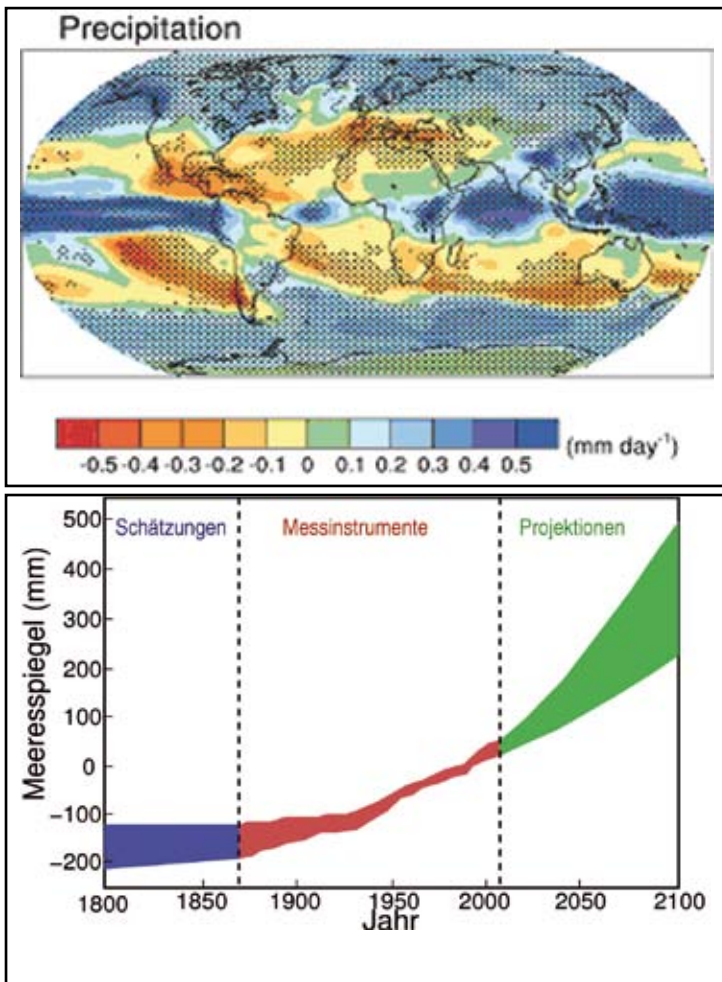


Abb. 2.6-4: Mittelwerte der projizierten Multi-Modell-Änderungen des Niederschlags (mm/day, oben) und der Verdunstung (mm/day, unten). Gezeigt sind die Änderungen im Jahresmittelwert nach dem SRES A1B-Szenario für den Zeitraum 2080–2099 relativ zu 1980–1999. Punktierte Flächen kennzeichnen Regionen, wo mehr als 80% der Modelle in der Richtung der mittleren Änderung übereinstimmen (IPCC 2007).

Rechnungen mit regionalen Klimamodellen zeigen, 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 Wasserkreislauf (z.B. hohe Breiten, Ostsee-Einzugsgebiet) kann es dabei auch zu einem Austrocknen kommen (z.B. Mittelmeer, Donau-Einzugsgebiet). Und selbst wenn sich der Wasserkreislauf im Mittel nicht wesentlich verändert, kann allein eine Verschiebung in der Niederschlagsintensitätsverteilung schon zu spürbaren Klima-Veränderungen führen.

Literatur

- ANDERSSON A., K. FENNIG, C. KLEPP, S. BAKAN, H. GRASSL & J. SCHULZ (2011): Evaluation of HOAPS-3 ocean surface freshwater flux components. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 50, 379-398, doi: 10.1175/2010JAMC2341.1
- BOSILOVICH M.G., S.D. SCHUBERT & G.K. WALKER (2005): Global changes of the water cycle intensity. *J. Clim.* 18, 1591-1608.
- DOUVILLE H., D. SALAS-MÉLIA & S. TYTECA (2005): On the tropical origin of uncertainties in the global land precipitation response to global warming. *Clim. Dyn.* 26, 367-385.
- DOUVILLE H., ET AL. (2002): Sensitivity of the hydrological cycle to increasing amounts of greenhouse gases and aerosols. *Clim. Dyn.* 20, 45-68.
- EMORI S. & S.J. BROWN (2005): Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate. *Geophys. Res. Lett.* 32, L17706, doi:10.1029/2005GL023272.
- GOOD P., & J. LOWE (2006): Emergent behavior and uncertainty in multimodel climate projections of precipitation trends at small spatial scales. *J. Clim.* 27(4), 357-375.
- HAGEMANN S. (2002): Validierung des Niederschlags in globalen Klimamodellen, K. Stephan, H. Bormann und B. Dieckrüger (Hrsg.): 5. Workshop zur hydrologischen Modellierung - Möglichkeiten und Grenzen für den Einsatz hydrologischer Modelle in Politik, Wirtschaft und Klimafolgenforschung, Kassel University Press, Kassel, 115-127.
- HAGEMANN S., H. GÖTTEL, D. JACOB, P. LORENZ & E. ROECKNER (2009): Improved regional scale processes reflected in projected hydrological changes over large European catchments, *Clim. Dyn.* 32, doi: 10.1007/s00382-008-0403-9.
- 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.
- KLEPP C. P., S. BAKAN & H. GRABL (2005): Missing North Atlantic cyclonic precipitation in ECMWF numerical weather prediction and ERA-40 data detected through the satellite climatology HOAPS II. *Meteorol. Z.* 14, 809-821, DOI: 10.1127/0941-2948/2005/0088.
- KLEPP C., K. BUMKE, S. BAKAN & P. BAUER (2010): Ground Validation of Oceanic Snowfall in Satellite Climatologies during LOFZY. *Tellus A*, 62, 469-480.
- KUTZBACH J.E., J.W. WILLIAMS & S.J. VAVRUS (2005): Simulated 21st century changes in regional water balance of the Great Lakes region and links to changes in global temperature and poleward moisture transport. *Geophys. Res. Lett.* 32, L17707, doi:10.1029/2005GL023506.
- 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
- NEELIN J.D., ET AL. (2006): Tropical drying trends in global warming models and observations. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 103, 6110-6115.
- WETHERALD R.T., & S. MANABE (2002): Simulation of hydrologic changes associated with global warming. *J. Geophys. Res.* 107, 4379.
- WENTZ F. J., L. RICCIARDULLI, K. HILBURN & C. MEARS (2007): How Much More Rain Will Global Warming Bring? *Science*, 317, 233-235, DOI: 10.1126/science.1140746.

Dr. Stefan Hagemann

Prof. Dr. Daniela Jacob

Dr. Stephan Bakan

Max Planck Institut für Meteorologie

Bundesstrasse 53 - 20146 Hamburg

stefan.hagemann@zmaw.de

daniela.jacob@zmaw.de

stephan.bakan@zmaw.de