

I. Umweltwandel und die Folgen für den Landschaftswasserhaushalt

Einleitung

Sonja Germer, Barbara Köstner, Herbert Sukopp, Jost Heintzenberg

Der globale Wandel zeigt sich, wie eingangs ausgeführt, regional in unterschiedlicher Ausprägung. Die Faktoren, die den Umweltwandel in der Fokusregion beeinflussen, sind selbst Teil des globalen Wandels. Hierzu zählen Einflussfaktoren des Klimas wie die zunehmende Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre, ein vermehrter Aerosoleintrag aus dem urbanen Gebiet, aber auch die Reduktion von Luftverunreinigungen durch entsprechende Maßnahmen. Einflüsse auf den Wasserhaushalt betreffen Veränderungen des Klimas selbst sowie Landnutzungsänderungen oder ein sich änderndes Wassernutzungsverhalten aufseiten von Landwirtschaft, Privathaushalten und Industrie. Um den Umweltwandel analysieren und bewerten zu können, sind sowohl die Einflussfaktoren als auch die Veränderungen innerhalb der Ökosysteme systematisch zu erheben. Beobachtungssysteme für die regionale und lokale Ausprägung der Umweltveränderungen, die Analyse der Variabilität und Wechselwirkungen der Veränderungen sowie die Beachtung der regionalen Spezifika sind eine wesentliche Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung (NKGCF 2005).

Für die Fokusregion Berlin-Brandenburg reichen Beobachtungen von Umweltveränderungen, insbesondere beim Wasserhaushalt und den vom Wasser geprägten Lebensräumen, sehr weit zurück. So existieren Aufzeichnungen über die Biodiversität von Algen in Brandenburgischen und Berliner Seen seit dem 18. Jahrhundert (Sukopp et al. 2010). Die Vielfalt der Ufervegetation und die Ausdehnung der Röhrichtgürtel sind stark zurückgegangen (am Tegeler See auf 9 % der Uferlinie), sodass wertvolle ökologische Leistungen dieses Ökosystems nicht nur hinsichtlich der Artenvielfalt, sondern auch der Selbstreinigungskraft und Kohlenstoffsenke verloren gingen. Diese Umweltveränderungen gehen überwiegend auf Veränderungen des Landschaftswasserhaushalts zurück. Der Wasserhaushalt in der Fokusregion ist seit Jahrhunderten sowohl durch klimatische Veränderungen als auch durch anthropogene Eingriffe geprägt (Driescher 2003; Lischeid 2010). Natürliche Klimavariationen wie die „Kleine Eiszeit“ zwischen dem 15. und 19. Jahrhundert veränderten die Wasserstände des Grundwassers und der Seen. Seit etwa dem 12. Jahrhundert greift zusätzlich der Mensch durch den Bau von Schifffahrtswegen, die Regulierung von Wasserständen, den Ausbau und die Begradigung von Flussläufen sowie durch Maßnahmen zur Entwässerung grundlegend in das hydrologische Regime dieser Region ein. Als Folge dieser Maßnahmen ist die Mehrzahl aller Fließgewässer in Brandenburg künstlich angelegt. Von den 33.000 km Fließgewässern sind

24.000 km überwiegend künstliche Meliorationsgräben (Freude 2007). Flächenhafte Hydromeliorationen begannen Anfang des 18. Jahrhunderts. Die intensiven Komplexmeliorationen mit tiefen Dränagen, Pumpanlagen und Staubewässerung wurden erst in den 1960er- und 1970er-Jahren initiiert (Pollack 1991). Als Folge eines umfangreichen Ursachenkomplexes von Wasserwirtschaft, Landnutzung und Klima einerseits und von Siedlungsgebieten, Tagebau- und Rieselfelderbewirtschaftung andererseits setzen sich bis heute qualitative und quantitative Veränderungen des Landschaftswasserhaushaltes fort (Germer et al. 2011).

So ergab eine Auswertung des Landesmessnetzes für die Jahre 1976 bis 2005 überwiegend fallende Grundwasserstände in den Grundwasserneubildungsgebieten von meist -1 bis -3 cm/a (LUA 2009). Während der Umweltdatenbericht (LUA 2009) keine Aussage über die statistische Signifikanz beinhaltet, konnten Landgraf und Krone (2002) zeigen, dass bei einer entsprechenden Auswertung für die Jahre 1970 bis 1999 für mehr als die Hälfte der Grundwasserpegel ein signifikant negativer Trend festgestellt werden kann. Gemäß dem Landesumweltamt Brandenburg (LUA 2009) treten die stärksten natürlichen Grundwasserstandsänderungen von -6 bis -10 cm/a in der Nähe von Wasserscheiden auf. Eine entsprechende Übersicht über die prozentuale Veränderung von Seespiegeln in Brandenburg gibt es zurzeit noch nicht. Aufgrund der unverfestigten Sedimente und der weitflächig oberflächennahen Grundwasserspiegel steht eine Vielzahl der Brandenburger Seen in hydrologischer Verbindung mit dem Grundwasser. Für zahlreiche Seen mit oder ohne Grundwasseranbindung konnten negative Trends der Wasserstände nachgewiesen werden (vgl. Germer et al. 2011).

Für die beiden bedeutendsten Flüsse der Fokusregion, Oder und Elbe, deren Einzugsgebiete jedoch nur zu einem geringen Teil in Brandenburg liegen, wurden für die letzten Dekaden nur geringe Veränderungen des Abflusses festgestellt (1976–2005; LUA 2009), die nach Petrow und Merz (2009) zudem nicht signifikant sind. Für kleinere Flüsse mit Einzugsgebiet in Brandenburg ist das negative Trendverhalten deutlicher ausgeprägt – nicht nur in den Gebieten des Braunkohlebergbaus (1976–2005; LUA 2009). Trendanalysen von 81 Abflusspegeln in Brandenburg für den Zeitraum 1980 bis 1999 ergaben für 67 % der Pegel einen signifikanten negativen Trend (Landgraf & Krone 2002).

Auch für das hinsichtlich der Umweltveränderungen so oft in den Vordergrund gestellte Klima wurden bereits Veränderungen in der Fokusregion belegt. Für die letzten Dekaden konnte ein statistisch signifikanter Temperaturanstieg nachgewiesen werden (1961–1998: $+1$ K; Lahmer & Pfützner 2003). Der jährliche Niederschlag hingegen weist keinen signifikanten Trend auf, auch wenn sich eine innerjährliche Verlagerung der Niederschläge zugunsten höherer Winterniederschläge andeutet (Lahmer & Pfützner 2003), wobei die Sommerniederschläge regional um teils über 40 % abnehmen (Köstner et al. 2010).

Vor diesem Hintergrund haben die Kapitel in diesem Abschnitt das Ziel, Umweltveränderungen der Fokusregion beispielhaft darzustellen und daraus Ansatzpunkte für Forschung und Handeln abzuleiten. Zu diesem Zweck fanden sich Fachleute zusammen, die in den Bereichen „Atmosphäre“, „Biosphäre“ und „Hydrosphäre“ vom globalen bis zum lokalen Maßstab forschen. Sie nutzen Messungen

und Modelle und betrachten Umweltveränderungen mit Blick auf das Klimasystem der Erde, auf Ökosysteme und Organismen sowie menschliche Eingriffe, insbesondere bei der Wasserwirtschaft. Beispielhaft für den bereits nachweisbaren Klimawandel stellen *Ulrich Cubasch* und *Christopher Kadow* eine langzeitige Messreihe der Lufttemperatur Berlins vor. Einen Blick in die Zukunft eröffnet *Eberhard Schaller* in seinem Beitrag, in dem regionale Klimaprojektionen für die Fokusregion und die damit verbundenen Unsicherheiten diskutiert werden. Um zukünftige Auswirkungen des Klimawandels auf ökohydrologische Funktionen abschätzen und Anpassungen entwickeln zu können, müssen räumliche Unterschiede beachtet werden. Dies wird von *Barbara Köstner* und *Matthias Kuhnert* am Beispiel der Verdunstung von Wald und Grasland in der Uckermark aufgezeigt. Seen spielen in der Fokusregion eine herausragende Rolle. Ihre ökologischen und kulturellen Dienstleistungen sind bereits heute von Umweltveränderungen stark betroffen oder gefährdet (*Michael Hupfer, Brigitte Nixdorf, Klement Tockner*). Die Funktionen der terrestrischen und aquatischen Ökosysteme stehen in enger Wechselwirkung mit dem Landschaftswasserhaushalt. Seine aktuelle anthropogene Steuerung durch Landnutzung und Trinkwassergewinnung wird von *Gunnar Lischeid* ausgeführt. Die starke Einflussnahme des Menschen auf den Landschaftswasserhaushalt stellt hohe Erwartungen an die nachhaltige Bewirtschaftung der Ressource Wasser. Dafür sind korrekte Bilanzierungen des Wasserhaushalts grundlegend (*Uwe Grünewald*).

Aus diesen Beispielen von Umweltwandel und seinen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt lassen sich Herausforderungen für Wissenschaft und Ressourcenbewirtschaftung ableiten. Wie diesen begegnet werden kann, wird abschließend in möglichen Ansatzpunkten für Forschung und Handeln zusammengefasst.

Temperaturaufzeichnungen in Berlin für die letzten 310 Jahre*

Ulrich Cubasch, Christopher Kadow

Einleitung

Der Klimawandel in Großstädten ist Gegenstand vieler Studien. Schlünzen et al. (2009) etwa analysieren die Niederschlags- und Temperaturveränderung in der Großstadtregion von Hamburg. Der Bericht des Weltklimarats (Solomon et al. 2007) greift das Thema der Großstädte nicht explizit auf, sagt aber aus, dass auf regionaler Skala der Klimawandel stärker ausgeprägt sein kann als im globalen Mittel. Insgesamt kann man davon ausgehen, dass ein verstärkter Wärmeinsel-Effekt durch das Wachstum der Großstädte zusammen mit der globalen Erwärmung zu deutlich höheren Temperaturen in einer Großstadt führen kann, als es der global gemittelte Temperaturanstieg vermuten lässt.

Klimabeobachtungen in Berlin

Für Berlin existiert eine der längsten Temperaturaufzeichnungen weltweit. Sie fand als eine von vier historischen Klimaaufzeichnungen ihren Weg in den letzten IPCC-Bericht (Solomon et al. 2007). Die ersten Wetteraufzeichnungen in Berlin begannen schon im Jahr 1677. Seit der Gründung der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften im Jahr 1700 wurden regelmäßige Temperaturmessungen unternommen, zuerst von dem Akademiemitglied und Astronomen Gottfried Kirch und seiner Familie. Diese Messungen waren in wissenschaftlicher Hinsicht mangelhaft: a) Der Messort wurde mehrfach verändert, b) es gibt Lücken in der Messreihe wegen des Ausfalls der Instrumente, und c) die Eichung der Instrumente ist nur unvollständig dokumentiert und nicht konsistent. Die Situation verbesserte sich, als das Königlich Preußische Meteorologische Institut gegründet wurde, das die Verantwortung für die Messungen übernahm.

Derzeit gibt es drei Datensätze für den Berliner Großraum (Abb. 5):

1. Die erste Messreihe des *Berlin & Dahlem*-Temperaturdatensatzes beginnt 1701 und reicht bis 1907. Diese Messungen, die in der Stadtmitte durchgeführt wurden,

* Eine englische umfangreichere Ausfertigung dieses Textes findet sich in Cubasch, U. & Kadow, C. (2011): The change of the global climate and regional climate aspects of Berlin and Brandenburg. Die Erde 142 (1/2), im Druck.

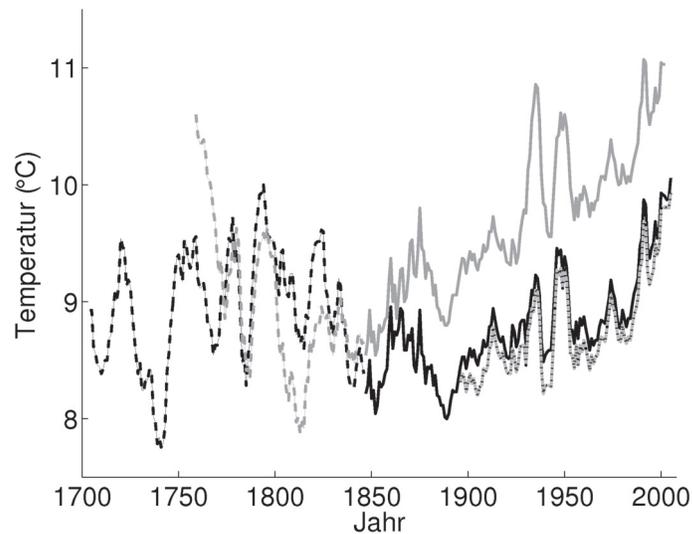


Abb. 5. Die Temperaturentwicklung (7-jähriges gleitendes Mittel) für *Berlin & Dahlem* (schwarz), *H & C* (grau) und *Potsdam* (grau gepunktet). Die Werte, die vor der Gründung des Preußischen Meteorologischen Instituts ermittelt wurden, werden gestrichelt dargestellt. Sie können wegen ihrer Ungenauigkeit und nicht mehr nachvollziehbaren Kalibrierung nicht für eine Trendbetrachtung genutzt werden

wurden im Hinblick auf den Wärmeinsel-Effekt korrigiert und mit der Dahlemer Temperaturmessreihe zusammengeführt. Seit 1908 wird diese in der Königlich Preußischen Gärtner-Lehranstalt in Berlin-Dahlem, damals einer Vorstadt von Berlin, erstellt. Der Messort ist nach 1945 an verschiedene Standorte in Berlin-Dahlem verschoben worden und befindet sich seit 1997 im Botanischen Garten. Details zu dieser Zeitreihe finden sich in Pelz (1997, 2000, 2007).

2. Die *H & C*-Messreihe, die von Hupfer & Chmielewski (2007) beschrieben wird, basiert auf den Messungen aus der Stadtmitte für 1756 bis 1930 und wurde dann von 1931 an mit der Temperaturreihe von Berlin-Dahlem ergänzt. Zu der Dahlemer Reihe wurde dabei ein Zuschlag, der den Wärmeinsel-Effekt repräsentieren soll, addiert. Diese Temperaturmessreihe steigt daher schneller an als der *Berlin & Dahlem*-Datensatz und ist im Jahr 2000 ungefähr $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ wärmer als dieser.

Obwohl beide Zeitreihen bis 1901 zumindest theoretisch auf derselben Datenbasis beruhen, so sind sie doch vor 1947 nur teilweise konsistent. Vor 1760 stimmen sie nicht überein, sie sind fast identisch zwischen 1760 und 1800 und zeigen dann ein ähnliches Verhalten, aber mit unterschiedlicher Amplitude zwischen 1800 und 1830. Die Gründe für diese Unterschiede werden aus den Dokumentationen der Datenreihen nicht ersichtlich.

3. Die *Potsdamer Säkular-Reihe* basiert auf meteorologischen Beobachtungen seit 1893 für Potsdam, das ungefähr 20 km von Dahlem entfernt ist (Klimareihe 2010). Anhand dieser Reihe kann wegen der geringen räumlichen Distanz die Konsistenz der anderen beiden Temperaturreihen überprüft werden, um eventuelle Feh-

ler bei den Messungen zu identifizieren. Eine Fortführung der *Berlin & Dahlem*-Reihe und der *Potsdam*-Reihe ist essenziell, um einen hohen Qualitätsstandard der Messungen zu behalten.

Die Temperaturentwicklung der letzten 310 Jahre

Abbildung 5 zeigt die Temperaturentwicklung ab 1700. Deutlich erkennbar ist das Temperaturminimum im Jahr 1740, dem Krönungsjahr von Friedrich II. In vielen Aufzeichnungen wird es als extrem kaltes Jahr mit geringen Ernteerträgen und einer Hungersnot beschrieben. Der unterschiedliche Verlauf der Temperaturkurven vor 1850 ist auf Probleme der Messinstrumente, bei der Durchführung der Messungen und der Kalibrierung zurückzuführen. Die Kurven werden deshalb gestrichelt gezeichnet, da sie nicht zuverlässig genug sind, um sie in eine Betrachtung mit einzubeziehen. Besonders der Zeitraum 1780 bis 1835 gilt nach Pelz (2000) als kritisch in der *Berlin & Dahlem*-Reihe. Nur zum Teil dokumentiert, wurden die Werte mehrfach und vor allem nach oben korrigiert, sodass sich im Vergleich zu den Folgejahren eine nicht realistische Abkühlung abzeichnet. Mit der Einrichtung des Königlich Preußischen Meteorologischen Instituts im Jahre 1847 entstand eine wissenschaftliche Basis für die Wetteraufzeichnungen.

Die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts beginnt mit einer kalten Periode, von der aus die Temperatur in der *Berlin & Dahlem*-Reihe kontinuierlich mit einer Rate von 0,104 K/Dekade (100-jähriger linearer Trend) ansteigt. Dieser Anstieg wird von einer Stabilisierung in den Jahren von 1910 bis 1985 unterbrochen, die auch in der globalen Mitteltemperaturkurve von 1940 bis 1970 zu erkennen ist. Sie wird hervorgerufen durch die ständig wachsende Industrialisierung und dem damit einhergehenden vermehrten Aerosoleintrag, der in der Atmosphäre zu einer Abkühlung führt. Gleichzeitig kommt es zu einer Erwärmung durch die zunehmende Konzentration der Treibhausgase. Beide Effekte haben sich in dieser Zeit kompensiert. Erst nach 1970 führen Maßnahmen zur Reduktion der Luftverschmutzung bei gleichzeitig immer noch ansteigender Treibhausgaskonzentration dazu, dass die Atmosphäre sich deutlich erwärmt (Solomon et al. 2007). Der 100-jährige Trend in Berlin ist mit 0,104 K/Dekade höher als der im IPCC 2007 genannte globale Mittelwert von 0,075 K/Dekade, was auf die kontinentale Lage von Berlin zurückzuführen ist. Die *Potsdamer* Temperaturkurve folgt in ihrem Verlauf im Wesentlichen der *Berlin & Dahlem*-Reihe. Das zeigt, dass das Klima in Potsdam und Dahlem sich nicht wesentlich unterscheiden. Dank der Parallelmessungen in Potsdam ist eine unabhängige Verifikation der Messungen in Dahlem möglich.

Die Häufigkeitsverteilung der Jahresmitteltemperatur zeigt eine Zunahme der höheren Werte, wenn man die Periode 1860 bis 1909 mit dem Zeitabschnitt 1960 bis 2009 (Abb. 6) vergleicht. Während vor etwas über 100 Jahren eine Jahresmitteltemperatur von 6,5 °C in 5 % aller Jahre erreicht wird, werden derartig kalte Jahresmitteltemperaturen heutzutage fast nicht mehr beobachtet. Eine Jahresmitteltemperatur von 10,5 °C wurde im 19. Jahrhundert nur für 3 % der Jahre aufgezeich-

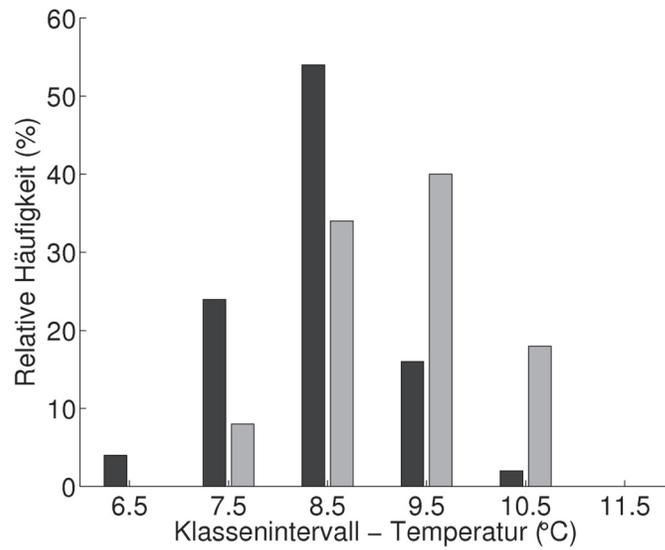


Abb. 6. Die Häufigkeitsverteilung der mittleren Jahrestemperatur berechnet anhand der *Berlin & Dahlem*-Temperaturreihe für die Zeitabschnitte 1860 bis 1909 (schwarz) und 1960 bis 2009 (grau)

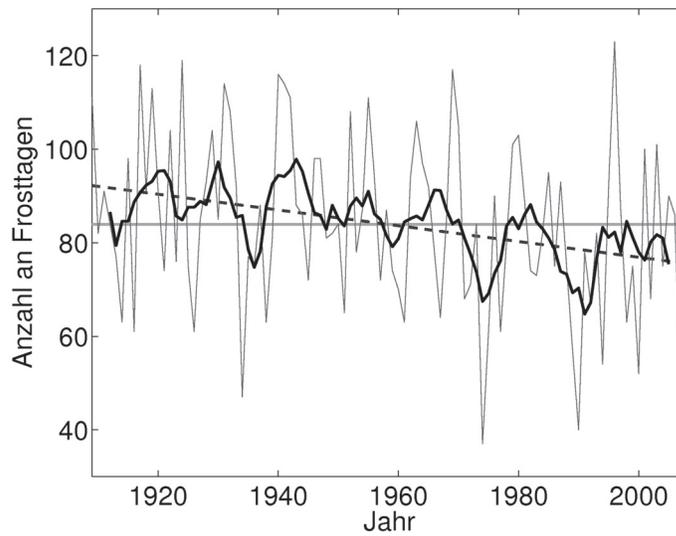


Abb. 7. Die Anzahl der Tage im Jahr mit Temperaturen unter 0 °C (Frosttage) für *Berlin & Dahlem* (graue dünne Kurve, 7-jähriges gleitendes Mittel: schwarze Kurve); der Mittelwert für die Jahre 1909–2008 wird durch die graue gerade Linie angezeigt, der 100-jährige signifikante lineare Trend durch die gestrichelte schwarze Linie (95 % Niveau, Mann-Kendall-Test; Schönwiese 2006)

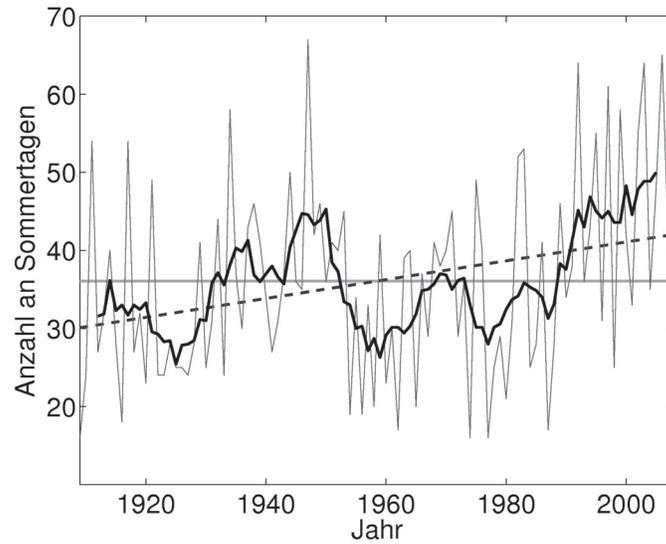


Abb. 8. Die Anzahl der Tage im Jahr mit Temperaturen über 25 °C (Sommertage) für *Berlin & Dahlem* (graue dünne Kurve, 7-jähriges gleitendes Mittel: schwarze Kurve); der Mittelwert für die Jahre 1909 bis 2008 wird durch die graue Linie angezeigt, der 100-jährige signifikante lineare Trend durch die gestrichelte schwarze Linie (95 % Niveau, Mann-Kendall-Test; Schönwiese 2006)

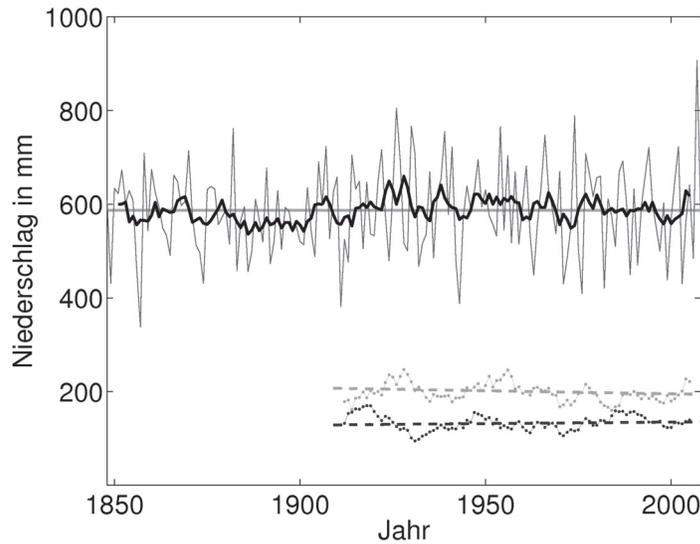


Abb. 9. Der Niederschlag von 1848 bis 2008 (graue dünne Kurve, 7-jähriges gleitendes Mittel: schwarze Kurve) in mm im Jahr sowie der 161-jährige Mittelwert (graue Linie) für *Berlin & Dahlem*; der 7-jährig gemittelte Niederschlag für Winter (DJF) wird in schwarz gepunktet dargestellt, für Sommer (JJA) in grau; die 100-jährigen nicht signifikanten Trends werden durch die gestrichelten Linien dargestellt (95 % Niveau, Mann-Kendall-Test; Schönwiese 2006)

net, am Ende des 20. Jahrhunderts jedoch für über 12 %. Gegenüber dem Ende des 19. Jahrhunderts hat die Anzahl der Frosttage (unter 0 °C) signifikant um 17 Tage abgenommen und liegt jetzt bei 80 Tagen (Abb. 7). Die Anzahl der Tage mit Temperaturen über 25 °C (Sommertage) hat im gleichen Zeitraum signifikant um ungefähr 12 Tage pro Jahr zugenommen (Abb. 8).

Die Niederschlagsentwicklung der letzten 110 Jahre

Der mittlere Jahresniederschlag in der *Berlin & Dahlem*-Reihe verändert sich nur marginal und unsignifikant mit einem Anstieg von 0,2 % seit Anfang des 20. Jahrhunderts (Abb. 9 oben). Es ist eine Tendenz zu mehr Winterniederschlag (ca. 3 % während der letzten 100 Jahre) und weniger Sommerniederschlag zu verzeichnen (ca. 4 % weniger, Abb. 9 unten). Im Jahresmittel heben sich beide Effekte auf. Die Niederschlagstrends sind nicht signifikant und bestätigen die Ergebnisse von Hupfer & Chmielewski (2007).

Ausblick

Der globale Klimawandel ist auch in Berlin bereits sichtbar und wird sich fortsetzen. Auf Basis von Simulationen mit einem Regionalmodell (Jacob et al. 2008) kann man für das Ende des 21. Jahrhunderts von einem Temperaturanstieg von 3,0 bis 3,5 °C für das mittlere IPCC-Szenarium A1B ausgehen, zusammen mit einem Anstieg des Winterniederschlags um 10 bis 20 % und einer Abnahme des Sommerniederschlags um 10 bis 30 %. Dieses entspricht den Ergebnissen von Gerstengarbe et al. (2003).

Die Temperaturmessungen vor 1850 sind sehr unzuverlässig und können in der hier abgebildeten Form nicht zur Herleitung von Klimatrends verwendet werden. Eine Abhilfe kann die Untersuchung von Baumringweiten und -dichten schaffen. Mit ihnen als Proxy kann man die Temperaturen rekonstruieren (Briffa et al. 2004). Für Berlin macht Freund (2010) einen ersten Versuch, die Berliner Temperaturreihe aus den Kiefernbeständen des Tegeler Forstes herzuleiten. Allerdings reicht diese Rekonstruktion nur bis in das Jahr 1840 zurück. Es müssen daher ältere Baumbestände ausfindig gemacht werden, mit denen man die Rekonstruktionen verlängern kann.

Geht man von diesem Szenario aus, wird es mehr Sommertage, aber auch weniger Frosttage geben. Besonders die Zunahme der heißen Tage bedeutet ein erhöhtes Risiko für die Gesundheit, aber auch für die Infrastrukturen allgemein. Die Stadt Berlin sollte entsprechende Vorsorgemaßnahmen treffen.

Die tendenzielle Änderung des Niederschlags bedeutet, dass man längerfristig Wasserspeicher braucht, um eine gleichmäßige Versorgung zu gewährleisten.

Schlussfolgerung

Die hier diskutierten Daten lassen erkennen, in welchem Maße sich der globale Klimawandel bereits in Berlin auswirkt. Dank der Weitsicht der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften vor mehr als 300 Jahren liegen heute in Berlin die weltweit längsten Messreihen vor. Die Fortführung der Messungen ist unabdingbar, damit man auch in Zukunft auf lang zurückreichende Daten zurückgreifen kann, um den Klimawandel zu beschreiben und die globalen Projektionen des IPCC's für Berlin zu skalieren. Die heutige Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften sollte darauf drängen, dass beide, die Messungen in Berlin-Dahlem und in Potsdam, auch in Zukunft weitergeführt werden. Um die *Berlin & Dahlem*-Reihe vor 1850 vernünftig interpretieren und validieren zu können, sind weitere Studien und Forschung wie die Baumring- und Isotopenanalyse der Dendroklimatologie notwendig. Die Akademie sollte diese Forschung aktiv unterstützen und auch prüfen, ob man die Zeitreihe noch weiter in die Vergangenheit ausdehnen kann und welche Baumbestände im Großraum Berlin-Brandenburg für eine derartige Studie geeignet sind.

Danksagung

F. Chmielewski und G. Myrcik (2009) stellten die Daten bereit. Viele Diskussionen mit I. Kirchner, M. Freund, G. Myrcik und J. Heise halfen, die Entstehung der Datenreihen besser zu verstehen und sie zu interpretieren. C. Deetz unterstützte uns bei der Formatierung des Literaturverzeichnisses, M. Schuster übernahm das Korrekturlesen. Ihnen allen sei herzlich gedankt. Diese Arbeit basiert auf einem Vortrag zu einem Kolloquium anlässlich des 300. Todestages von Gottfried Kirch, der in *Cubasch, U. & C. Kadow (2010): Die Berliner Temperaturreihe. Acta Historica Astronomiae 41, 112–132* abgedruckt wurde.

Simulation des gegenwärtigen und zukünftigen Klimas von Brandenburg

Eberhard Schaller

Einleitung

Wie von *Cubasch* und *Kadow* im vorherigen Beitrag gezeigt worden ist, haben sich die atmosphärischen Kenngrößen bereits im 20. Jahrhundert mit der Zeit langfristig verändert. Am deutlichsten wird dies bei der bodennahen Lufttemperatur. Damit stellt sich die Frage, wie sich diese Trends in der Zukunft entwickeln werden. Ein Werkzeug zur Beantwortung dieser Frage ist die Klimamodellierung, mit deren Hilfe die zeitliche Entwicklung der atmosphärischen Kenngrößen als Ergebnis von unterschiedlichen Annahmen über das menschliche Verhalten zunächst global in die Zukunft, z. B. bis 2100, projiziert werden kann.

Globale und regionale Klimamodellierung

Die horizontale Skala globaler Klimamodelle (GCMs: global climate models) liegt bei 100 km und mehr, das heißt, Informationen von einem GCM sind repräsentativ für Flächenelemente von mehreren 10.000 km². Bei einer Fläche Brandenburgs von knapp 30.000 km² erhält man also aus einem GCM für ein Gebiet von dieser Größe keine räumlich differenzierten Informationen über die Klimakenngrößen, wie sie als Voraussetzung z. B. für planerische Zwecke benötigt werden. Globale Berechnungen mit feinerer horizontaler Auflösung und über Zeiträume von einem Jahrhundert und mehr sind wegen der begrenzten Rechnerressourcen jedoch bis heute nicht verfügbar. Eine räumliche Verfeinerung geht daher immer mit einer Begrenzung des Rechengebiets, z. B. auf einen Kontinent, einher. Modelle dieses Typs (verfeinerte horizontale Auflösung bis herunter zu 10 km für ein begrenztes Rechengebiet, z. B. Mitteleuropa) bezeichnet man als dynamische (oder auch prozessbasierte) regionale Klimamodelle (dRCMs: dynamical regional climate models). Abbildung 10 zeigt, wie gut das Gebiet von Brandenburg in den dRCMs CLM und REMO räumlich aufgelöst wird.

Eine zweite Möglichkeit, die räumlich groben Informationen eines GCMs zu verfeinern, bietet das statistische „Downscaling“ (sD). Dieses Prinzip verwenden z. B. die Modelle STAR (z. B. Orłowsky et al. 2008) und WEREX/WETTREG (beispielsweise Spekat et al. 2007). Bei dieser Methode wird die räumliche Verteilung der Klimakenngrößen aus typischerweise nach dem Zweiten Weltkrieg ge-

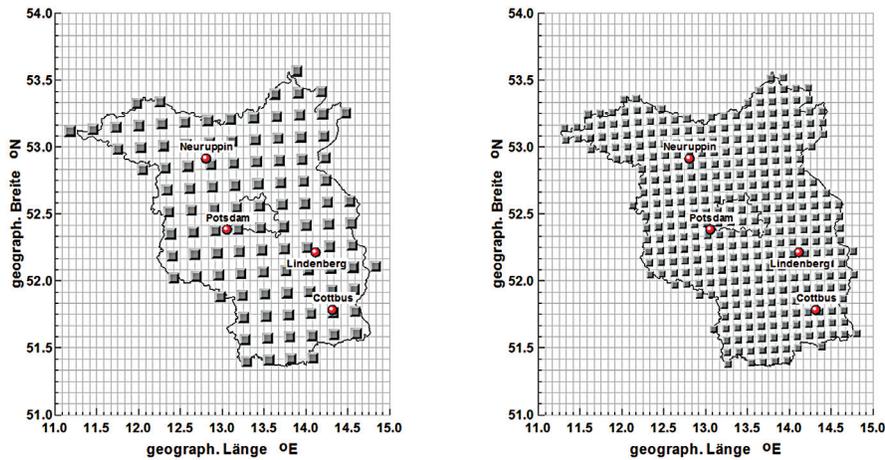


Abb. 10. Räumliche Auflösung der regionalen Klimamodelle CLM (ca. 18 km, links) und REMO (ca. 10 km, rechts) für Brandenburg

wonnenen Beobachtungen mit dem Klimaänderungssignal des GCMs kombiniert. Wegen der Verwendung gegenwartsnaher Beobachtungen schneiden sD-Ansätze beim Vergleich zwischen Modellergebnissen und Beobachtungen für das Gegenwartsklima im Allgemeinen besser ab als dRCMs, bei denen die Wahrscheinlichkeit systematischer Abweichungen viel höher ist, da hier keinerlei Beobachtungen von Klimakenngrößen verwendet werden (müssen). Der Schluss, dass damit die sD-Ansätze auch die zukünftige Klimaentwicklung realitätsnäher beschreiben, ist jedoch unzulässig, da sich systematische Unterschiede zwischen zukünftigen und gegenwärtigen Klimawerten aufheben. Dann kommt der Vorteil der dRCMs, auf der Basis physikalischer Gesetzmäßigkeiten auch Veränderungen der räumlichen Verteilungsmuster und ggf. bisher nicht beobachtete Extremwerte erzeugen zu können, in vollem Umfang zum Tragen. Es ist eine offene, hier nicht weiter diskutierte wissenschaftliche Frage, wie sich dRCMs und sD-Ansätze optimal oder mindestens besser als bisher kombinieren lassen.

Evaluierung der dynamischen regionalen Klimamodelle für das Gegenwartsklima

Im Folgenden werden die Ergebnisse von CLM (z. B. Böhm et al. 2006) und REMO (z. B. Jacob 2001) für Brandenburg weiter besprochen. Abbildung 11 zeigt in der oberen Reihe links für die Temperatur und rechts für den Niederschlag die systematischen Unterschiede zwischen CLM (drei Modellläufe) und REMO (eine Simulation) auf der einen und den Beobachtungen am Observatorium Lindenberg des Deutschen Wetterdienstes auf der anderen Seite. Der Jahresverlauf beider Parameter wird in etwa gleich wiedergegeben. Besonders beim Niederschlag ist jedoch eine gleichmäßige Differenz (systematische Abweichung, „Bias“), die für die

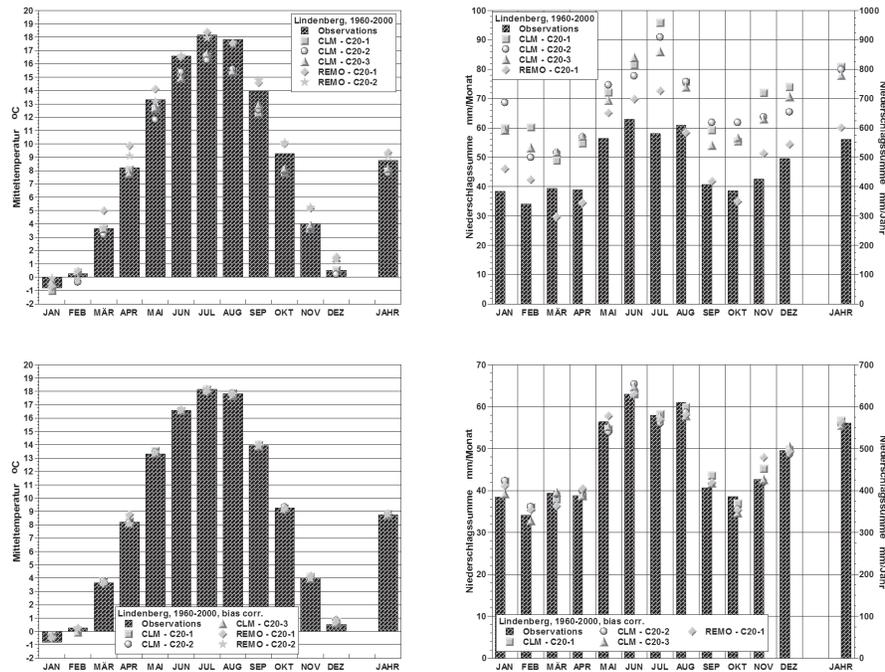


Abb. 11. Systematische Unterschiede zwischen Beobachtungen und Simulationen für den mittleren Jahresgang und den Jahresmittelwert der Periode 1960 bis 2000 an der Station Lindenberg des Deutschen Wetterdienstes vor (obere Reihe) und nach (untere Reihe) der systematischen Korrektur, links für die Temperatur, rechts für den Niederschlag

einzelnen Simulationen unterschiedlich groß ist, festzustellen. Deshalb werden die Simulationen – jede für sich – nach folgendem Verfahren korrigiert:

- Die Monatswerte werden der Größe nach sortiert. Damit wird der Zeitbezug entfernt.
- Für jeden Monat werden die Differenzen zwischen Beobachtung und Simulationsergebnissen separat ermittelt. Für den Zeitraum 1960 bis 2000 erhält man so pro Monat 41 Differenzen.
- Diese Differenzen werden erneut der Größe nach sortiert, und der Median (bei 41 Werten der 21. Wert) wird als systematische Korrekturgröße (Bias-Korrektur) ausgewählt, mit dem alle Modellwerte verschoben werden.
- Der modifizierte Jahresmittelwert wird aus den korrigierten Monatsmitteln gebildet.

In der unteren Reihe ist das Ergebnis dieses recht einfachen Korrekturverfahrens dargestellt. Man erkennt eine deutliche Verkleinerung der Unterschiede zwischen beobachteten und berechneten Werten. Die Unterschiede liegen nur noch bei wenigen Zehntel Grad bzw. einigen Millimetern pro Monat. Somit scheint die Annahme, dass die Unterschiede zwischen Messungen und dRCM-Ergebnissen primär syste-

matischer Natur sind, zuzutreffen. Ähnliche Ergebnisse erhält man auch für zahlreiche weitere Stationen, und zwar sowohl in Brandenburg als auch beispielsweise in Bayern, wo die Unterschiede in der Orographie deutlich stärker ausgeprägt sind.

Die Bias-Korrektur kann jedoch nicht für alle Mittelungsintervalle und auch nicht für jeden Klimaparameter sinnvoll angewendet werden. So funktioniert sie beim Niederschlag zwar für Monats-, nicht jedoch für Tagesmittelwerte, weil die Anzahl der Tage mit und ohne Niederschlag in den beobachteten und den modellierten Zeitreihen nicht identisch ist, was zu unrealistischen (positiven und negativen) Korrekturen führen würde. Die relative Feuchte ist ein Beispiel für einen Klimaparameter, für den die Anwendung einer Bias-Korrektur nicht sinnvoll ist.

Klimaentwicklung für Brandenburg im 21. Jahrhundert

Nun lassen sich die Bandbreiten der langfristigen Veränderungen für die Temperatur und den Niederschlag abschätzen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verwendeten Rechenläufe. Sowohl für CLM als auch für REMO wurden die Projektionen A1B und B1 des IPCC (Nakićenović et al. 2000) zugrunde gelegt. Das Untersuchungsgebiet von CLM umfasst dabei ganz Europa (NW-Ecke: westlich von Island, SO-Ecke im Vorderen Orient), während ganz Europa mit REMO nur mit einer Auflösung von ca. 50 km gerechnet wurde und die reduzierte Auflösung von ca. 10 km nur für Mitteleuropa (Deutschland, Österreich und Schweiz) vorliegt. An den Rändern benötigen beide Modelle die Ergebnisse eines GCMs, die in allen Fällen von ECHAM5 (Röckner et al. 2006) bereitgestellt wurden. Von ECHAM5 liegen für beide Emissionsprojektionen mehrere globale Simulationen vor, die mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen gestartet wurden. Somit konnten mit beiden dRCMs mehrere (je zwei) Läufe mit regionaler Verfeinerung durchgeführt werden. Für REMO ist zusätzlich eine Simulation auf der Basis der Projektion A2 verfügbar.

Tabelle 1. Anzahl der Realisierungen der einzelnen Zukunftsprojektionen

Modell	IPCC-SRES-Emissionsprojektion (Nakićenović et al. 2000)		
	A2	A1B	B1
CLM (Hollweg et al. 2008)	–	2	2
REMO (Jacob et al. 2008)	1	2	2

A2 und A1B sind eher pessimistische Szenarien mit im Lauf des 21. Jahrhunderts deutlich ansteigenden anthropogenen CO₂-Emissionen, wobei sich die Unterschiede zwischen beiden Zeitverläufen erst in der zweiten Jahrhunderthälfte merklich ausprägen, sodass beide Projektionen in ihrer Auswirkung auf die Klimakenngrößen zusammengefasst werden können, da sich die angesprochenen Emissionsunterschiede erst nach 2100 darauf auswirken. B1 ist eine eher optimistische Sicht auf das Verhalten der Menschen im 21. Jahrhundert. In diesem Szenario haben die durch menschliche Aktivitäten bedingten CO₂-Emissionen am Ende des 21. Jahr-

hundreds nach einem Maximum zur Mitte des Jahrhunderts in etwa die gleiche Größenordnung wie im Jahr 2000.

Tabelle 2 fasst die Bandbreiten der Temperaturveränderung zur Mitte (für das 30-jährige Mittel 2036 bis 2065) und gegen Ende (für 2071 bis 2100) des 21. Jahrhunderts im Vergleich zu 1961 bis 1990 zusammen. Die Spannweiten betragen, mit Ausnahme des Klimamittels 2036 bis 2065 im Winter bei den Projektionen A2/A1B, nur wenige Zehntel Grad, was auch daran liegen mag, dass die Anfangs- und Randwerte für beide dRCMs vom gleichen Globalmodell (ECHAM5) stammen. Die erhöhte Spannweite von 1,4 Grad deutet an, dass bei Vergrößerung des Ensembles von dRCM-Simulationen sowie bei Einbeziehung der sD-Ansätze größere Bandbreiten wahrscheinlich sind. Zum Vergleich: Die relative Genauigkeit der Temperaturdifferenzen in den einzelnen Simulationen liegt bei $\pm 0,5$ Grad.

Tabelle 2. Spannweite der Temperaturveränderung zur Mitte (für das 30-jährige Mittel 2036 bis 2065) und gegen Ende (für 2071 bis 2100) des 21. Jahrhunderts im Vergleich zur Periode 1961–1990; in Klammern ist die Anzahl der Modellläufe im jeweiligen Ensemble (5 = 2 x CLM und 3 x REMO, 4 = 2 x CLM und 2 x REMO, 3 = 2 x CLM und 1 x REMO) angegeben

IPCC-SRES-Emissionsprojektion	Winter (DJF) 2036–2065	Sommer (JJA) 2036–2065	Jahr 2036–2065
A2 / A1B	1,8 ... 3,2 K (5)	1,7 ... 1,9 K (5)	1,6 ... 2,3 K (5)
B1	1,3 ... 1,6 K (3)	1,0 ... 1,3 K (3)	1,0 ... 1,4 K (3)
	2071–2100	2071–2100	2071–2100
A2 / A1B	3,7 ... 4,3 K (5)	2,9 ... 3,3 K (5)	3,0 ... 3,4 K (5)
B1	2,6 ... 2,7 K (3)	1,9 ... 2,2 K (3)	2,0 ... 2,4 K (3)

Tabelle 3 gibt die entsprechenden Spannweiten für den Niederschlag an. Es fällt auf, dass sich die Jahressummen im Verlauf des 21. Jahrhunderts praktisch nicht verändern, während sich allmählich eine Abnahme des Niederschlags im Sommer und eine fast gleich große Zunahme im Winter ausprägen.

Tabelle 3. Spannweite der prozentualen Änderung des Niederschlags zur Mitte (für das 30-jährige Mittel 2036 bis 2065) und gegen Ende (für 2071 bis 2100) des 21. Jahrhunderts im Vergleich zur Periode 1961–1990; in Klammern ist wieder die Anzahl der Modellläufe genannt

IPCC-SRES-Emissionsprojektion	Winter (DJF) 2036–2065	Sommer (JJA) 2036–2065	Jahr 2036–2065
A2 / A1B	2 ... 8 % (4)	–13 ... –8 % (4)	–2 ... 3 % (4)
B1	–4 ... 3 % (3)	–5 ... 1 % (3)	–1 ... 3 % (3)
	2071–2100	2071–2100	2071–2100
A2 / A1B	13 ... 17 % (4)	–21 ... –14 % (4)	–2 ... 3 % (4)
B1	8 ... 11 % (3)	–16 ... –9 % (3)	1 ... 3 % (3)

Die vorgestellten Bandbreiten für Brandenburg wurden aus einem noch sehr kleinen Ensemble von Simulationen ermittelt. Im Rahmen des EU-Vorhabens ENSEMBLES (Hewitt und Griggs 2004; Déqué 2009) liegt eine Reihe weiterer regionaler

Simulationen für Europa mit horizontalen Auflösungen zwischen 25 und 50 km vor, die in eine weiterführende Untersuchung einbezogen werden könnten. Weitere Erfolg versprechende Aktivitäten (neue Simulationen) sind gegenwärtig in Vorbereitung.

Simulation von Wasserhaushaltskomponenten unter dem Wandel des regionalen Klimas

Barbara Köstner, Matthias Kuhnert

Einführung

Der Wasserhaushalt einer Landoberfläche wird primär vom Niederschlag bestimmt. Dieser teilt sich auf in die Komponenten „Verdunstung“ und „Abfluss“. Der Abfluss steht für die Grundwasserbildung und Versorgung von Gewässern zur Verfügung. Mehr als die Hälfte des Niederschlages wird in der Regel wieder verdunstet. Die Verdunstung setzt sich zusammen aus dem Niederschlag, der nicht auf den Boden gelangt, sondern direkt von Pflanzenoberflächen aufgefangen wird (Interzeption), und aus den Anteilen, die von Pflanzen (Transpiration) und offenem Boden (Bodenevaporation) verdunstet werden. Die Verteilung des Wassers in einer Landschaft ist von deren Topographie, Geologie und Bodeneigenschaften sowie von der Pflanzenbedeckung und den meteorologischen Bedingungen abhängig. Sie steuern auf unterschiedlichen zeitlichen Skalen die Aufteilung des verfügbaren Wassers (vgl. jeweils *Lischeid*, S. 57–62, und *Grünewald*, S. 63–70). Bei Landökosystemen liegt das größte Potenzial der Einflussnahme auf die Wasserbilanz in der Steuerung der Verdunstung und des Wasserrückhalts. Dies geschieht vor allem durch die räumliche Verteilung von Landnutzungstypen und Pflanzenarten, den Anteil der Bodenbedeckung, die Wasserspeicherfähigkeit von Boden und Humus und die Art der Bodenbearbeitung.

Der Klimawandel hat unterschiedlichen Einfluss auf die Komponenten des Wasserhaushalts. Während die Klimamodelle keinen eindeutig gerichteten Trend der Jahresniederschläge zeigen (vgl. *Schaller*, S. 37–42), lassen Beobachtungen auf eine Zunahme der Niederschläge im Winterhalbjahr und eine Abnahme im Sommerhalbjahr schließen (vgl. *Cubasch/Kadow*, S. 30–36). Dies bedeutet, dass gerade zu Zeiten eines hohen Bedarfs im Sommer, zum Beispiel für das Pflanzenwachstum, die Verfügbarkeit von Wasser niedriger ist und Pflanzen auf das im Boden gespeicherte Wasser oder Bewässerung angewiesen sind. Dagegen steigt die Hochwassergefahr im Winterhalbjahr, da die Abflüsse erhöht und die Verdunstung niedrig ist. Die langjährigen Beobachtungen wie auch die Klimaprojektionen gehen übereinstimmend von einer Zunahme der Jahresmitteltemperaturen aus, womit ein höherer Verdunstungsanspruch verbunden ist. Die über verschiedenen Landnutzungen gemessene Verdunstung weist hohe Heterogenität auf, die mit beginnender Bodentrockenheit steigt (Beyrich 2004). Da die Verdunstung von vielen Faktoren gesteuert wird, ist sie großflächig schwer zu quantifizieren und ihr Verhalten unter

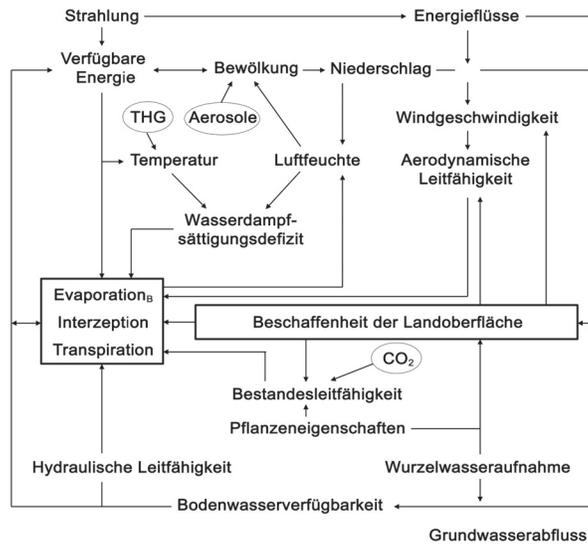


Abb. 12. Wechselbeziehungen von Faktoren, die die Verdunstung beeinflussen (THG = Treibhausgase, Evaporation_B = Bodenevaporation)

Klimawandel unklar (Abb. 12). Auf globaler Ebene geht man von einer allgemeinen Zunahme der potenziellen Verdunstung und, zumindest über Wasserflächen, auch der realen Verdunstung aus (Bates et al. 2008). Allerdings wurde in den letzten Jahrzehnten eine Abnahme der mit Verdunstungspflanzen bestimmten potenziellen Verdunstung beobachtet. Dies wird besonders auf eine Reduktion der Strahlungsenergie durch Aerosole („global dimming“) zurückgeführt (Gifford 2005; Roderick et al. 2009). Ein abnehmender Trend ist seit den letzten Jahren jedoch nicht mehr zu erkennen. Die auf Messdaten basierte reale Verdunstung von Landökosystemen zeigt in südlichen Breiten seit dem letzten Jahrzehnt einen abnehmenden Trend, der mit Limitierung durch Bodentrockenheit begründet wird (Jung et al. 2010). Für die Simulation der zukünftigen Verdunstung innerhalb des Wasserhaushalts und die Bestimmung des Vorzeichens (zunehmend/abnehmend) wird daher entscheidend sein, ob die relevanten Prozesse in den Modellen berücksichtigt und korrekt miteinander verrechnet sind. Zur räumlichen Bilanzierung müssen in ausreichender Dichte auch die erforderlichen Daten zur Extrapolation und Validierung verfügbar sein.

Modellsimulationen und Datenbedarf

Modellsimulationen von Wasserhaushaltskomponenten dienen zum einen der theoretischen Zusammenfassung und Prüfung des Prozessverständnisses und zum anderen der räumlichen und zeitlichen Extrapolation der Wasserflüsse. Im Zusammenhang mit der Klimafolgenabschätzung spricht man bei Modellen, die Auswirkungen des Klimawandels simulieren, von Wirkungsmodellen. Im vorliegenden Fall wä-

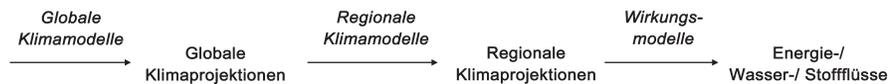


Abb. 13. Abfolge von Modellen und Simulationsergebnissen von der globalen Ebene bis zu regionalen oder lokalen Auswirkungen

ren dies Wasserhaushalts- oder Boden-Vegetation-Atmosphäre-Transfer-Modelle (SVAT-Modelle), die Wirkungen auf Energie-, Wasser- und Stoffflüsse quantifizieren (Abb. 13). Von den einzelnen Komponenten ist der Anteil der Verdunstung, insbesondere die Transpiration schwierig zu quantifizieren. Im Prinzip hängt die Verdunstung einer nassen Oberfläche von der verfügbaren Energie, dem Sättigungsdefizit der Luft und der aerodynamischen Leitfähigkeit ab. Praktisch lassen sich diese Größen über Strahlung, Wärmeströme, Luftfeuchte, Temperatur und Windgeschwindigkeit bestimmen. Für die Transpiration der Pflanzen muss zudem die „mittlere“ Blattleitfähigkeit und für die räumliche Extrapolation auf einen Pflanzenbestand oder Landschaftsausschnitt die Summe aller aktiven Blattflächen bekannt sein. Dafür können nur Näherungswerte angegeben werden.

Die Blattleitfähigkeit ist selbst ein sehr komplexer Pflanzenparameter, dessen zeitliche Dynamik von der Photosynthese abhängt. In Pflanzenmodellen wird die Blattleitfähigkeit daher vom CO_2 -Austausch abgeleitet. Ein deutliches Defizit bei der Simulation besteht darin, dass die Modelle die Transpiration bei zunehmender Bodentrockenheit unzureichend simulieren und zur Überschätzung der Verdunstung neigen (Falge et al. 2005; Schwärzel et al. 2007). Ein Nachteil von Wasserhaushaltsmodellen bzw. klassischen SVAT-Modellen besteht darin, dass sie entweder nur die Gesamtverdunstung simulieren oder die Transpiration unabhängig von der Photosynthese der Pflanzen betrachten. Dies führt meist zu einer geringeren Variabilität der Transpiration (vgl. Jochheim et al. 2001). Der Anstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentration wird zunehmend die Blattleitfähigkeit reduzieren. Annahmen über die Blattleitfähigkeit ohne Berücksichtigung der CO_2 -Abhängigkeit sind folglich für Simulationen der Verdunstung unter zukünftigem Klimawandel ungeeignet.

Für die räumliche Simulation der Transportprozesse werden standortgenaue Daten zu Transferfunktionen von Vegetation und Boden benötigt. Dafür werden Übertragungsfunktionen entwickelt, die allerdings die Variabilität der Werte in heterogenen Landschaften nur eingeschränkt wiedergeben können. Zur punktuellen Überprüfung werden langzeitliche Messwerte benötigt, die kaum vorhanden sind. Die räumliche Extrapolation erfolgt anhand von gitterbasierten Daten zu Topographie, Boden, Vegetation und Landnutzung. Diese Daten sollten in hoher Auflösung und über große Räume möglichst einheitlich vorhanden sein. Kartierungen am Boden können durch Produkte aus der Fernerkundung unterstützt und ergänzt werden (Langer et al. 2010). Die zeitliche Dynamik von Simulationen ist vor allem durch saisonale Änderungen der Vegetationsentwicklung (Phänologie) und kurzzeitliche Änderungen der meteorologischen Variablen gegeben. Simulationen unter zukünftigem Klimawandel benötigen regionale Klimaprojektionen mit möglichst hoher räumlicher Auflösung (vgl. Schaller, S. 37–42). Um die Spannweite von möglichen Ergebnissen, d. h. die Unsicherheit, darstellen zu können, müssen verschiedene Pro-

jektionen bzw. Modelle (Ensembles) kombiniert werden. Hinsichtlich regionaler Klimaprojektionen und ihrer Verknüpfung mit Wirkungsmodellen besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Derzeit werden hierfür Klimaprojektionen aus statistischem Downscaling bevorzugt, da sie nicht nachträglich korrigiert werden müssen. Im Folgenden wird eine erste Kombination mit einer Projektion aus einem dynamischen Klimamodell vorgestellt.

Beispiel Uckermark

Beispielhaft sollen Simulationen von Verdunstungskomponenten für Wald- und Grasland in der Uckermark vorgestellt werden. Die Untersuchungen erfolgten mit dem Modell SVAT-CN (Falge et al. 2005), das im Rahmen des Projekts LandCaRe 2020 (Köstner et al. 2009; Köstner et al. 2010) eingesetzt wurde. Mit dem Entscheidungshilfesystem LandCaRe-DSS können weitere Komponenten des Wasserhaushalts wie der Grundwasserabfluss in Abhängigkeit von heutiger und möglicher zukünftiger Verteilung von Ackerkulturen simuliert werden. Für die vorliegende Untersuchung wurden nur Wald und Grasland betrachtet, da bei diesen Landnutzungen der Einfluss des natürlichen Standorts deutlicher wird. Vereinfachend wurde für Laubwald die Eiche und für Nadelwald die Kiefer angenommen. Saisonale Verschiebungen der Wachstumsperiode im Simulationszeitraum sind durch ein Phänologiemodell berücksichtigt. Landnutzungsverteilung und maximale Blattflächen wurden nicht verändert. Für den Boden lag die Karte der mittelmaßstäbigen Standortkartierung in der räumlichen Auflösung von 100 m zugrunde. Als Klimadaten wurden CLM-Projektionen im 18-km-Gitter für die Emissionsszenarien A1B und B1 herangezogen (vgl. Schaller, S. 37–42; Rockel et al. 2008). Die Simulationen erfolgten für jeweils drei Dekaden um 1994 (1990–1999), 2020 (2016–2025) und 2040 (2036–2045). Da die CLM-Projektionen die Niederschläge überschätzen (vgl. Schaller, S. 37–42), wurden die Simulationen mit korrigierten Niederschlägen durchgeführt (Lindau & Simmer 2010). Die nachträgliche Korrektur von einzelnen Klimaelementen stellt einen weiteren Unsicherheitsfaktor dar.

Zunächst lässt sich festhalten, dass in den Simulationen die absoluten Werte der jährlichen Transpiration für die verschiedenen Landnutzungen zwischen 50 und 320 mm variierten und die der Gesamtverdunstung (Evapotranspiration) zwischen 150 und 450 mm. Die Gesamtverdunstung lag für Kiefernwald am höchsten, gefolgt von Grasland und Eichenwald. Eine hohe Variabilität in der Fläche ist in Abhängigkeit von der Pflanzenart und den Bodenbedingungen vor allem für die Transpiration zu verzeichnen. Sie nimmt im Flächenmittel 75 % der Gesamtverdunstung ein. Dieser Anteil verringert sich bis 2040 im Mittel um 8 %, wobei dies hauptsächlich auf Abnahmen bei Kiefernwald und Grasland zurückzuführen ist.

Für die Darstellung von Simulationsergebnissen unter zukünftigem Klima eignen sich relative Änderungen zwischen zwei Zeiträumen. Die Verdunstungskomponenten zeigten beim Vergleich der Dekaden je nach Standort und Vegetation sowohl Zunahmen als auch Abnahmen. Im ersten Vergleichszeitraum (2020/1994) des A1B-Szenarios überwog eine Abnahme der Evapotranspiration, während diese im

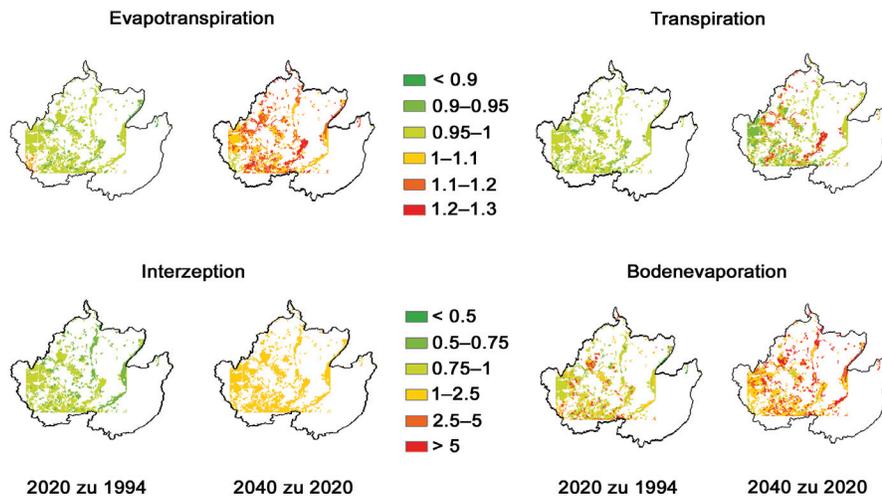


Abb. 14. Relative Änderungen zehnjähriger Mittelwerte der Evapotranspiration, Transpiration, Interzeption und Bodenevaporation in der Uckermark von 2020 zu 1994 und 2040 zu 2020 für das Emissionsszenario A1B

zweiten Vergleichszeitraum (2040/2020) anstieg (Abb. 14). Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Klimaprojektion für die Dekade um 2040 nicht nur höhere Temperaturen, sondern auch deutlich höhere Niederschläge aufwies als um 2020.

Die Transpiration zeigte nur für die Eichenstandorte zunehmende Tendenzen. Auch die Wasserspeicherkapazität des Bodens hat Einfluss auf die räumlichen Muster. Sie können oft nicht eindeutig interpretiert werden, da die Kombination von Boden- und Pflanzeigenschaften und die zeitlich variierende Überschreitung von Schwellenwerten unterschiedlich wirksam werden. Im Flächenmittel aller Vegetationstypen nahm die Transpiration in beiden Vergleichszeiträumen ab. Dies ist auf geringere Blattleitfähigkeiten unter höherer atmosphärischer CO_2 -Konzentration und teils auf Bodentrockenheit zurückzuführen. Generell waren Veränderungen unter dem B1-Szenario weniger ausgeprägt.

Auch die anderen Komponenten der Verdunstung zeigen beim Vergleich der Dekaden räumlich unterschiedliche bzw. entgegengerichtete Tendenzen. Im Flächenmittel nimmt vor allem die Interzeption um 2040 wegen der höheren Niederschläge zu. Dies wird am deutlichsten bei der immergrünen Kiefer (34%), gefolgt von Grasland (27%) und Eiche (20%). Die Bodenevaporation hat den niedrigsten Anteil an der Gesamtverdunstung. Sie nimmt bei Eiche und Grasland im Vergleichszeitraum 2020/1994 leicht ab und steigt bei allen Landnutzungen im Zeitraum 2040/2020. Vervielfachungen der Bodenevaporation traten nur bei sehr geringen absoluten Raten auf. Ihr Anteil an der Gesamtverdunstung blieb niedrig.

Grundlage für die Transpirationsergebnisse war die Simulation der Primärproduktion. Die Bruttoprimärproduktion zeigte durchweg einen zunehmenden Trend mit räumlich und zeitlich unterschiedlicher Ausdifferenzierung. Offensichtlich überwog der Einfluss höherer Temperaturen und atmosphärischer CO_2 -Konzentrationen

im A1B-Szenario im Vergleich zu einer limitierenden Wasserverfügbarkeit. Das Emissionsszenario B1 hatte auf die Primärproduktion einen weniger positiven Einfluss. In den meisten Fällen war auch die Wassernutzungseffizienz erhöht, die aus dem Quotienten von Bruttoprimärproduktion und Transpiration gebildet wurde. Nur an Eichenstandorten nahm die Wassernutzungseffizienz unter dem A1B-Szenario im Zeitraum 2040/2020 leicht ab. Generell bestätigten die Simulationen experimentelle Ergebnisse, dass unter erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentration Bäume Wasser sparen bzw. die Wassernutzungseffizienz steigt (Leuzinger & Körner 2007).

Schlussfolgerungen zur Unsicherheit von Klimawirkungsanalysen

Für die Abschätzung von zukünftigen Klimawirkungen ist zunächst ein vertieftes Prozessverständnis erforderlich. Seitens der Klimamodellierung liegen besonders hohe Unsicherheiten in der Projektion von Niederschlägen. Im Vergleich zur Temperatur sind Niederschläge wesentlich schwieriger zu beschreiben, insbesondere auch hinsichtlich der räumlichen Muster. Die Verdunstung spielt eine Schlüsselrolle bei der Kopplung atmosphärischer Prozesse mit der Erdoberfläche und bei der Kopplung mit dem Kohlenstoffhaushalt durch die Vegetation. Hinsichtlich der Landoberfläche bestehen noch große Unsicherheiten in der räumlich-expliziten Beschreibung von Eigenschaften des Bodens und der Vegetation sowie Unterschieden zwischen naturnahen und bewirtschafteten Flächen. Ein wichtiger räumlicher Skalierungsfaktor ist die aktive Oberfläche, zum Beispiel der Blattflächenindex. Hier bestehen Verbesserungsmöglichkeiten durch Fernerkundung, während andere steuernde Größen wie Wurzeltiefen und -dichten schwieriger einzuschätzen sind. Mit zunehmender Bodentrockenheit und bei, durch die steigende CO₂-Konzentration, angeregter Pflanzenproduktion können sich zukünftig Wurzel-Spross-Verhältnisse zugunsten der unterirdischen Biomasse verschieben. In diesem Zusammenhang sind Kenntnisse über den CO₂-Düngeneffekt unter Freilandbedingungen zu verbessern und auch beim Wasserhaushalt zu berücksichtigen.

Die Simulationen für die Uckermark zeigen, dass Bedarf besteht, die absoluten Wertebereiche von Klimaelementen dynamischer Klimamodelle für die Wirkungsmodellierung besser an Beobachtungsdaten anzupassen. Unsichere, zu hohe Niederschläge können besonders physikalisch gesteuerte Komponenten wie die Interzeptions- und Bodenverdunstung überschätzen. Die Simulation von Dekaden ist für Aussagen zu generellen Trends nicht ausreichend. Dies sollte anhand von 30-jährigen Zeitreihen geschehen. Dennoch zeigen die simulierten Dekaden, dass ein mit steigender Temperatur erhöhter Verdunstungsanspruch nicht notwendigerweise zu erhöhter Verdunstung führt. Besonders der Anteil der Transpiration nahm überwiegend ab. Neben Temperatur und Niederschlag spielen andere Klimaelemente wie Strahlung, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle. Für deren Überprüfung stehen jedoch weit weniger langzeitliche und räumliche Daten zur Verfügung. Die Wirkungsmodellierung unter Klimawandel eignet sich derzeit eher zur Untersuchung mittlerer Trends, als dass sie kurzfristige Schwankungen und Extreme aufzeigen könnte.

Die Emissionsszenarien A1B und B1 ergaben deutliche Unterschiede bei der Auswirkung auf die Verdunstung. Dabei waren beim A1B-Szenario entgegengerichtete Trends der Gesamtverdunstung und ihrer einzelnen Komponenten innerhalb der betrachteten Fläche besonders ausgeprägt. Die räumlichen Muster waren von Boden und Landnutzung beeinflusst. Räumliche Bilanzierungen hängen daher sehr stark davon ab, in welchem Maße die heterogenen Eigenschaften der Landoberfläche berücksichtigt werden. Das bedeutet jedoch, dass eine veränderte Landnutzung ein Mittel der Steuerung ist. Simulationen können dazu beitragen, die wirksamsten Schaltstellen und den Grad ihrer Veränderung zu benennen, um zu positiven Auswirkungen auf den Wasserhaushalt zu gelangen. Mit limitierter Bodenwasserverfügbarkeit und zunehmendem CO₂-Anstieg gewinnt die Wassernutzungseffizienz an Bedeutung. Künftig sollten daher in der Klima- und Wirkungsmodellierung Wasser- und Kohlenstoffhaushalt besser gekoppelt werden. Fortschritte in der Informationstechnologie ermöglichen routinemäßige Simulationen für einzelne Regionen mit mehreren Modellen und Datenkonstellationen. Solche neuen Werkzeuge sollten verstärkt genutzt werden. Sie unterstützen auch die Entwicklung von regionalen Risikokarten für zukünftige Trends bei Wasserhaushalt und Landnutzung.

Reaktionen von Seeökosystemen auf Umweltveränderungen

Michael Hupfer, Brigitte Nixdorf, Klement Tockner

Aktuelle Entwicklungen

Seen sind sensible Indikatoren für Klima- und andere Umweltveränderungen. Aufgrund ihrer topographischen Lage an der tiefsten Stelle in der Landschaft integrieren und akkumulieren sie – teils zeitverzögert – die Veränderungen des ober- und unterirdischen Einzugsgebietes sowie der Atmosphäre. Neben der Dokumentation und Interpretation von Signalen für diese Veränderungen besteht derzeit die vorrangige Herausforderung darin, die Entwicklung von Gewässerökosystemen unter den herrschenden Gegebenheiten der Kulturlandschaft vorherzusagen und entsprechende Vorsorge zur Erhaltung ihrer Funktionsfähigkeit zu treffen. Die dazu nötigen Forschungsansätze reichen von paläolimnologischen Erhebungen über die Interpretation von historischen und rezenten Zeitreihen bis hin zu komplexen dynamischen Modellen, die Prognosen zum Gewässerzustand unter sich rasch ändernden Klima- und Landnutzungsbedingungen ermöglichen.

Wie einleitend zu diesem Kapitel beschrieben, sind Stand- und Fließgewässer in Berlin-Brandenburg sowohl durch klimatische Veränderungen als auch durch menschliche Aktivitäten geprägt, so dass z. B. ein Großteil der Fließgewässer heutzutage künstlichen Ursprungs ist oder sich die Wasserspiegel vieler Seen stark verändert haben (Driescher 2003). Die Rekonstruktion früherer Phosphor- und Stickstoffkonzentrationen mithilfe im Sediment abgelagerter Diatomeen (Kieselalgen) zeigt, dass Eutrophierungsschübe bereits sehr früh durch die erste Besiedlung, Rodungen, die beginnende landwirtschaftliche Nutzung, die Einleitung von Abwässern sowie die Fischzucht ausgelöst wurden (Schönfelder 1997).

Welche hydrologischen und ökologischen Veränderungen sind mit der jüngsten Klimaentwicklung verbunden? Sinkende Wasserstände und Austrocknung von Gewässern sind ein deutliches Zeichen rezenter Veränderungen. So sind in den letzten 25 Jahren die Wasserspiegel in einigen grundwassergespeisten Seen der Uckermark, in der Grunewaldseenkette oder dem Spreewald um bis zu drei Meter gefallen. Der einsetzende Klimawandel in Nordostdeutschland verstärkt diese Entwicklung und wirkt gemeinsam mit weiteren natürlichen und anthropogenen Einflüssen in sehr komplexer Weise auf die Hydrodynamik und die Ökologie der Gewässer ein (Germer et al. 2011; Kaiser et al. 2011). Dafür spricht auch, dass sich die Wasserspiegel in den letzten 100 Jahren als sehr dynamische Größe erwiesen, bei denen sich hohe und niedrige Stände oft zyklisch abwechselten. In einigen

Regionen wurde in den letzten Jahren sogar eine Zunahme der Grundwasserstände registriert. Die räumlich und zeitlich unterschiedlichen Veränderungen der Grundwasserstände sind das Ergebnis von Fließgewässerbegradigung und -eintiefung, Bergbauaktivitäten, Trinkwasserförderung, Grundwasserabsenkungen, von ober- und unterirdischen Dränagen und insbesondere der Trockenlegung von 95 % aller Moore in Brandenburg.

Die klimatischen Veränderungen beeinflussen primär die Temperatur- und Lichtverhältnisse, das Schichtungsverhalten und die Eisbedeckung der Seen, wobei die Gewässer abhängig von der Morphologie unterschiedlich auf veränderte Klimafaktoren reagieren. In tiefen Seen ist die Eisbedeckung aufgrund der höheren Wärmekapazität natürlicherweise kürzer, eisfreie Winter sind daher häufiger. In Flachseen hingegen ist die Eisbedeckung in erster Linie Folge von spezifischen Wetterkonstellationen, während in tiefen Seen die Häufigkeit der Eisbildung durch längerfristige klimatische Trends erklärt werden kann. Langzeitdaten zur Dauer der Eisbedeckung zeigen bei hoher Variabilität zwischen den Jahren bislang keinen statistisch gesicherten Trend, obwohl in den letzten 60 Jahren am Beispiel von acht Seen in Berlin-Brandenburg ein Rückgang der Eisbedeckung von drei bis siebzehn Tagen zu verzeichnen war (Bernhardt 2009).

In den letzten 50 Jahren stiegen die Wassertemperaturen an der Seeoberfläche in der Fokusregion Berlin-Brandenburg um ca. 0,3 K pro Dekade an (Kirillin 2010). Für geschichtete Seen kann ein schwacher Trend zur Verlängerung der sommerlichen Schichtungsdauer registriert werden, wobei insbesondere der Beginn der Schichtung jahreszeitlich früher einsetzt. Am Beispiel des Stechlinsees werden die Entwicklungen der Luft- und Wassertemperaturen im Frühjahr sowie die Schichtungsdauer beispielhaft dargestellt (Abb. 15). Ohne Berücksichtigung des Einflusses des Kernkraftwerks verlängerte sich in den letzten 50 Jahren die Schichtungsdauer signifikant um 0,35 Tage pro Jahr.

Aktuelle Trends zeigen, dass in durchmischten Flachseen wie dem Müggelsee die Häufigkeit und Dauer von sommerlichen Schichtungsphasen zunimmt (Wilhelm & Adrian 2008). Paradox erscheint jedoch, dass trotz Zunahme der Lufttemperatur die mittlere Temperatur eines Sees und insbesondere die Temperatur der bodennahen Wasserschichten abnehmen können. Durch den früheren Beginn der thermischen Schichtung werden die tieferen Wasserschichten von der atmosphärischen Wärmeversorgung abgeschnitten und bleiben somit kühler. Durch die sinkenden Temperaturen im Tiefenwasser und in Sedimentnähe verlangsamen sich gewässerinterne Stoffumsetzungsprozesse. Dieses Phänomen der Temperaturabnahme im Tiefenwasser ist auch für die Seen Brandenburgs nachgewiesen (Bsp. Stechlinsee, Abb. 15). Die ökologischen Reaktionen in Seen werden ganz besonders von der Dauer und Intensität der Winter- und Frühjahrsperioden bestimmt.

Ein weiteres Phänomen in der Region Berlin-Brandenburg ist die Ausbreitung gebietsfremder aquatischer Arten, die von steigenden Temperaturen profitieren. Aktuelle Befunde zeigen, dass toxische Cyanobakterien aus subtropischen Regionen sich bereits erfolgreich etablieren konnten (Wiedner et al. 2008).

Eine der Herausforderungen in der Analyse der Zeitreihen von Seen in der Fokusregion Berlin-Brandenburg ist es jedoch, klimabedingte Trends von zeitgleichen

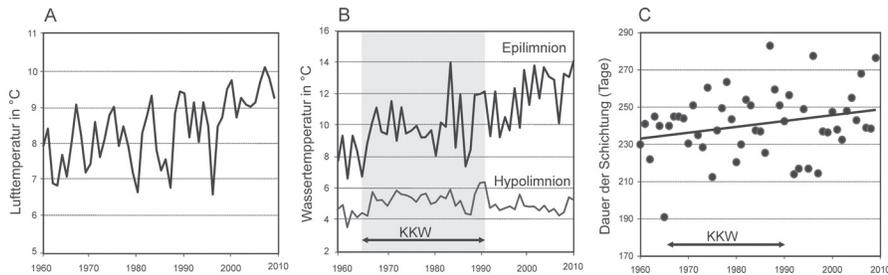


Abb. 15. Entwicklung der Luft- und Wassertemperaturen (Mittelwerte von März bis Juni) für den Stechlinsee seit 1960 (A/B). In der durchmischten Wasserschicht (Epilimnion) steigt die Temperatur, während im Tiefenwasser (Hypolimnion) die Temperatur ab 1990 leicht abfällt (B). Die Dauer der sommerlichen Schichtung nimmt signifikant zu (C). Zwischen 1965 und 1990 wurden die Temperaturverhältnisse im See durch Kühlwasser des Kernkraftwerks (KKW) Rheinsberg beeinflusst (grau hinterlegt)

anderen Veränderungen durch die Belastung mit industriellen und kommunalen Abwässern oder die Landnutzung nach der deutschen Wiedervereinigung zu unterscheiden. Mehr denn je sind ausreichend lange Zeitreihen gefragt, um natürliche Oszillationen, die Dynamik und Schwankungen zwischen den Jahren sowie andere Trends von Klimaeffekten zu identifizieren. Langzeituntersuchungen an Seen stellen hohe Anforderungen an die Qualität der Daten, an eine hinreichende zeitliche und taxonomische Auflösung sowie die Einbeziehung von Stoffeinträgen aus dem Einzugsgebiet. Dringend benötigt wird ein umfangreiches langfristiges Monitoringprogramm. Zugleich stellen die bereits vorhandenen Daten eine vielversprechende und noch nicht ausreichend genutzte Informationsquelle dar.

Die Gewässergüte von Seen in Berlin-Brandenburg wird gegenwärtig hauptsächlich durch die Eutrophierung beeinträchtigt. Durch Industrialisierung und Intensivierung der Landwirtschaft wurde die anthropogen bedingte Eutrophierung ab Mitte des letzten Jahrhunderts auch in der Fokusregion Berlin-Brandenburg zu einem gravierenden Problem, welches die Nutzungen vieler Gewässer erheblich einschränkte. Ab dem Jahr 1991 ist die Nährstoffbelastung in den meisten Seen Berlin-Brandenburgs durch die Reduzierung von Nährstoffeinträgen aus punktuellen Quellen rückläufig. Viele Seen reagieren wegen der langen Wassererneuerungszeit, trophischer Rückkopplungsmechanismen und des hohen internen Nährstoffvorrates aber deutlich verzögert auf die verminderten Einträge (Nixdorf et al. 2009). Für etwa zwei Drittel der Seen Brandenburgs ist daher „unwahrscheinlich“ bzw. „unklar“ (LUA 2007), ob sie gemäß Wasserrahmenrichtlinie bis 2015 das Ziel eines „guten“ ökologischen Zustandes erreichen. Ursache ist die andauernde diffuse Nährstoffbelastung aus den Einzugsgebieten. Hier können stark zeitverzögert frühere Belastungen wirken, deren Eintragspfade bislang schwer zu erfassen sind.

Ein besonderes Güteproblem in urbanen und periurbanen Räumen wie Berlin und dem Umland stellen Arzneimittelrückstände dar, die nicht oder nur teilweise in den Kläranlagen eliminiert werden (Winker 2010). Bedeutsam sind in diesem Zusammenhang Analgetika, Antibiotika, Betablocker, hormonelle Verhütungsmittel,

Psychopharmaka oder Zytostatika. Die zahlreichen Eintragspfade in die aquatische Umwelt, die Vielzahl an Stoffen und Abbauprodukten sowie die sehr stark variierende und die immer noch größtenteils unbekanntes Auswirkungen der Rückstände auf die Flora und Fauna im Wasser sind derzeit Gegenstand intensiver Forschungen.

Welche Zukunft haben die Seen?

Die aktuelle Klimasituation in Berlin-Brandenburg befindet sich an einem Punkt, an dem viele Seen selbst bei einer moderaten Klimaerwärmung mit einem veränderten Schichtungsregime, kürzeren Eisbedeckungen, niedrigeren bzw. wechselnden Wasserständen und Veränderungen der Biodiversität reagieren werden. Es sind die morphologischen, hydrologischen und trophischen Merkmale der Gewässer sowie die bestehenden und aus der Vergangenheit nachwirkenden Belastungsfaktoren, welche die Reaktion der jeweiligen Seen auf klimatische Veränderungen bestimmen. Wenn die derzeit beobachtete Erwärmung anhält, ist mit folgenden direkten und indirekten Wirkungen auf die Seen zu rechnen:

1. Die Tendenz zu wechselnden oder fallenden Wasserständen wird sich verstärken, was somit die morphologischen, physikalischen, chemischen und biologischen Merkmale eines Sees grundlegend verändern wird (Wantzen et al. 2008). Dazu gehören die Licht- und Temperaturverhältnisse, der Verlust wertvoller ufernaher Lebensräume, eine stärkere Vernetzung mit der terrestrischen Umgebung, eine verminderte Pufferwirkung gegenüber externen Belastungen und mögliche Regimewechsel hin zu Zuständen mit verstärktem Phytoplanktonwachstum. Dadurch verändert sich auch die Funktion des Gewässers als Senke oder Quelle für Nährstoffe und Kohlenstoff in der Landschaft. Für den regionalen Kohlenstoffhaushalt ist insbesondere die Rolle kleiner Gewässer, deren Existenz vom Klimawandel besonders betroffen ist, nicht bekannt, aber vermutlich relevant. Hier fehlen Studien für die Region und Methoden, um lokale Messergebnisse von aquatischen und terrestrischen Ökosystemen auf größere Landschaftsgebiete zu übertragen.
2. Unmittelbare und deutliche Änderungen sind hinsichtlich der physikalischen Struktur der Gewässer zu erwarten (Kirillin 2010). Zeitpunkt, Dauer und Häufigkeit der Schichtung werden besonders deutlich durch den zu erwartenden Anstieg der Temperaturen in den Wintermonaten beeinflusst. Einige bisher durchmischte flachere Seen werden längere Schichtungsperioden aufweisen und sich allmählich zum dimiktischen Mischungstyp (zwei Vollzirkulationen im Jahr) hin entwickeln. Winterliche Erwärmung und abnehmende Eisbedeckung sorgen zudem dafür, dass andere Seen wiederum monomiktisch werden (nur eine Vollzirkulation im Jahr). Durch die jetzt schon erkennbare Tendenz der früher einsetzenden Erwärmung wird sich als positiver Effekt die Badesaison verlängern.
3. Es wird angenommen, dass sich mit dem erwarteten Klimawandel die Eutrophierung verstärkt (Nixdorf et al. 2009), wie es für vergleichbare Gewässer in wärmeren Breitengraden bekannt ist. Die pauschale Einschätzung, dass alle Seen mit einer Zunahme der Eutrophierung und mit einer Verschlechterung des Gü-

tezustandes auf den prognostizierten Klimawandel reagieren, ist allerdings nur bedingt zutreffend. Die Etablierung einer stabileren Schichtung führt dazu, dass die Nährstoffversorgung der euphotischen Zone aus dem Tiefenwasser während der Vegetationsperiode vermindert wird. Keine oder eine kürzere Eisbedeckung bedeuten weniger oder keinen Sauerstoffschwund im Tiefenwasser und damit auch kein Fischsterben im Winter.

4. Die bereits jetzt stattfindende Einwanderung subtropischer Arten wird sich verstärken. Diese können die trophischen Interaktionen verändern und standortangepasste Arten verdrängen. Mit der Erwärmung und anderen Veränderungen ist zudem das Verschwinden von Arten verbunden. Das saisonale Muster im Lebenszyklus von Arten kann sich auch bei moderat veränderten Temperatur- oder Lichtverhältnissen verschieben, insbesondere dann, wenn diese Veränderungen zu „kritischen“ Zeitpunkten zwischen dem Ende des Winters und dem Beginn des Sommers stattfinden. Dadurch können die Phänologie, also die jahreszeitliche Abfolge des Auftretens von Arten und damit die trophischen Interaktionen und damit das eingespielte Gefüge zwischen Nahrungsangebot und Konsumption gravierend verändert werden. Die Analyse von milden und kalten Wintern im Müggelsee ergab, dass durch milde Winter das Auftreten von Cyanobakterien begünstigt wird (Shatwell et al. 2008). Entscheidend ist dabei, dass die Erwärmung die Phytoplanktonentwicklung stärker als die Zooplanktonentwicklung beeinflusst.
5. Der zu erwartende Klimawandel wird nach jetzigem Kenntnisstand den Eintrag von Nährstoffen aus dem terrestrischen Umland erhöhen, weil durch Wasserstandsschwankungen und/oder Starkniederschläge ein pulsartiger Eintrag von Stoffen aus dem Einzugsgebiet erfolgt. Dabei haben nicht nur die Nährstoffe Phosphor und Stickstoff als eigentliche Auslöser der Eutrophierung Bedeutung, sondern auch Stoffe, die die Nährstoffverfügbarkeit im Wasserkörper beeinflussen (z. B. Sulfat, Calcium, Kohlenstoff).

Anhand dieser Beispiele zeigt sich, dass die Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf den Gewässerzustand im Zusammenwirken mit anderen Einflussfaktoren komplex sind und allgemeingültige Vorhersagen erschweren. Besonders kritisch sind die Übergangsperioden, weil es zu überdurchschnittlichen Reaktionen in den Systemen kommen kann. Das betrifft Veränderungen im trophischen Gefüge durch das Verschwinden oder die Zuwanderung von Arten sowie die pulsartige Mobilisierung von Nährstoffvorräten im Sediment bei veränderten Temperatur- und Sauerstoffbedingungen. Nicht alle erwarteten Änderungen des Klimawandels wirken allerdings für Seeökosysteme negativ im Hinblick auf die anthropogene Nutzung.

Vorsorgender Gewässerschutz

Besondere Aufmerksamkeit ist der Verbesserung des Landschaftswasserhaushalts zu widmen. Alle Maßnahmen sollten darauf zielen, die Verweildauer des Wassers in der Landschaft zu erhöhen und zu sichern. Unabhängig von einem erwarteten Klimawandel sind folgende Maßnahmen von hoher Dringlichkeit:

- Revitalisierung und Schutz von Mooren und anderen Feuchtgebieten wie z. B. Flussauen
- Waldumbau (vom Kiefern- zum Misch- und Laubwald)
- Rückbau der Fließgewässerbegradigungen und Schaffung von (Hochwasser-) Retentionsflächen
- Intelligente Rückführung von gereinigten Abwässern in die Landschaft

Ein wichtiges Instrument ist das „Moorschutzprogramm“ in Brandenburg, das den landesweiten Schutz und die Revitalisierung der Moore und anderer Feuchtgebiete vorsieht (Landgraf 2010). Damit können sie in der Landschaft als effizienter Wasserspeicher wirken. Erfolgreiche Moorschutzmaßnahmen führen zu wassergesättigten Bedingungen, wodurch Torfbildung eingeleitet wird und Moore wieder zu bedeutenden Stoffsenken in der Landschaft werden. Als entscheidende Voraussetzung für die Umsetzung von Wiedervernässungsmaßnahmen erweist sich dabei der Erwerb von betroffenen Flächen, indem auf diesen Flächen nach dem Prinzip „Land für Wasser“ Nutzungen eingeschränkt, verändert oder aufgegeben werden. Ausreichende Wasserbereitstellung für Wiedervernässungsmaßnahmen ist nur durch eine deutliche Verbesserung des Wasserhaushalts im Einzugsgebiet mit steigenden Grundwasserständen möglich. Von großer praktischer Bedeutung ist die bislang ungeklärte Frage, wie sich vor allem die initiale Phase der Wiedervernässung von Mooren auf die regionale Kohlenstoffbilanz und die Emissionen von klimarelevanten Gasen auswirkt.

Die Umsetzung der Vorgaben der EU-Wasserrahmenrichtlinie zur Erreichung des „guten ökologischen Zustandes“ stellt die wirksamste Anpassungsstrategie hinsichtlich des zu erwartenden Klimawandels dar, weil die Anfälligkeit intakter aquatischer Ökosysteme gegenüber klimabedingten Veränderungen prinzipiell sinkt. Im Sinne eines „Integrierten Gewässermanagements“ setzen solche Maßnahmen sowohl extern im Einzugsgebiet als auch intern bei der Optimierung der Gewässerstruktur an. Erhöhung des Wasserrückhaltes in der Landschaft bedeutet auch, natürliche Retentionsräume für Nährstoffe wieder in Funktion zu setzen.

Zur Verminderung der Eutrophierung steht eine Vielzahl gewässerinterner Maßnahmen zur Verfügung. Diese „Ökotechnologien“ zielen auf die Beeinflussung der gewässerinternen Struktur, sodass bestimmte Funktionen wie etwa die Retention von Nährstoffen im Gewässer besonders wirksam werden und dadurch externe Belastungen teilweise kompensiert werden können. Beispiele für solche Verfahren sind die Ausfällung von Nährstoffen, das Anpflanzen von Makrophyten oder die Nahrungsnetzsteuerung (Biomanipulation). Ihr Einsatz ist besonders dann sinnvoll, wenn mit einem langen Beharrungsvermögen bereits eingeleiteter Maßnahmen im Einzugsgebiet zu rechnen ist. Mit zusätzlichen gewässerinternen Maßnahmen kann sich der gewünschte Zielzustand schon Jahre früher einstellen. Außerdem können einige dieser Verfahren einen „Regimewechsel“ auslösen, der trotz klimabedingter Einflüsse oder fortbestehender Restbelastung zur Selbststabilisierung des gewünschten Zustandes führt. Modernes Seenmanagement sollte daher seeinterne Ökotechnologien in ihrer gesamten Breite als Teil einer Gesamtstrategie zur Bewältigung von Güteproblemen einbeziehen. Die wissenschaftlichen Grundlagen zum

Zusammenspiel von externen und internen Maßnahmen an Seen unter dem Aspekt des Klimawandels sind bisher jedoch unzureichend.

Die Ausarbeitung und Auswahl geeigneter Anpassungsstrategien hinsichtlich des Klimawandels erfordert einen Wissensvorlauf, was die potenziellen regionalen und lokalen Auswirkungen von Klimatelementen und von Wetterextremen auf die aquatischen Ökosysteme betrifft. Eine wissenschaftliche Herausforderung besteht darin, hydrologische Modelle mit Stoffumsetzungsmodellen so zu koppeln, dass sie auf Landschafts- bzw. Einzugsgebietsebene räumlich-explizite Prognosen erlauben und zur Entscheidungsunterstützung herangezogen werden können. Welche Lebensgemeinschaften können wir in Zukunft in unseren Gewässern erwarten und wie wird sich eine rasch ändernde Biodiversität auf unterschiedliche Ökosystemfunktionen auswirken? Wie können die teils konkurrierenden Ziele des Gewässerschutzes, der Klimaanpassung und des Artenschutzes in Einklang gebracht werden? Und wie müssen wir die Gewässer und deren Umland bewirtschaften um eine Sicherung ökosystemarer Dienstleistungen, wie Bereitstellung sauberen Trinkwassers, Erhaltung einer standortgerechten biologischen Vielfalt und Erholungswert einer Landschaft zu erreichen? Diesen zentralen Fragen müssen sich in den kommenden Jahren die Wissenschaft und die Fachbehörden gemeinsam stellen.

Anthropogene Einflussfaktoren des Landschaftswasserhaushalts*

Gunnar Lischeid

Einleitung

Wasser wird in der Fokusregion Berlin-Brandenburg zunehmend zu einem knappen Gut. Langjährig sinkende Grundwasser- und Seewasserspiegel sowie zurückgehende Abflüsse (Einleitung zu diesem Kapitel; LUA 2009) verdeutlichen einen grundlegenden Wandel. Im Folgenden werden die aktuellen anthropogenen Einflussfaktoren des Landschaftswasserhaushalts dargestellt, die zu erwartenden Änderungen skizziert und mögliche Anpassungsstrategien vorgestellt.

Landnutzung

Nach der Niederschlagsmenge stellt die Evapotranspiration die zweitwichtigste Größe des Landschaftswasserhaushalts der Fokusregion dar. Für den Wasserhaushalt von Kleingewässern spielt weniger die Verdunstung von der Wasseroberfläche als vielmehr die Transpiration der Vegetation im Uferbereich eine entscheidende Rolle. Die Jahresraten der Evapotranspiration dichter Schilfbestände liegen in der Regel deutlich, teils bis zum Dreifachen über der Jahresniederschlagsmenge (Herbst & Kappen 1993; Behrendt et al. 2001; Dannowski & Balla 2004; Müller et al. 2005). Generell weisen Oberflächengewässer und Feuchtgebiete in der Region Brandenburg-Berlin eine negative Wasserbilanz in Höhe von ca. 100 mm/a auf, die durch den Grundwasserzstrom benachbarter Flächen kompensiert wird (Tab. 4).

Auf grundwasserfernen Standorten nimmt die Sickerwasserspende bzw. Grundwasserneubildung von Nadelwald über Laubwald bis zu ackerbaulich oder als Grünland genutzten Flächen zu (Dannowski & Steidl 2000; Fohrer et al. 2001; Schindler et al. 2008). Die Unterschiede können dabei mehr als 100 mm/a betragen und liegen somit im Bereich der mittleren Grundwasserneubildung der Region Berlin-Brandenburg. Bereits eine Erhöhung des Laubwaldanteils zulasten der vorherrschenden

* Eine englische umfangreichere Ausfertigung dieses Textes findet sich in Lischeid, G. & Natkhin, M. (2011): The potential of land use change to mitigate water scarcity in Northeast Germany – a review. *Die Erde* 142 (1/2), im Druck.

Tabelle 4. Simulierte Abflusshöhen für verschiedene Landnutzungstypen in Brandenburg und Berlin unter aktuellen klimatischen Verhältnissen (Daten: Dannowski & Steidl 2000)

	Jahressumme [mm]	Summe für das Winterhalbjahr [mm]	Summe für das Sommerhalbjahr [mm]
Brachland	309	96	213
urbane Fläche	244	94	150
Landwirtschaft	127	75	52
Wald	56	94	-38
Oberflächengewässer	-103	133	-236

Nadelbäume hätte spürbare Auswirkungen auf Grund- und Seewasserspiegel (Bolte et al. 2001; Wattenbach et al. 2007; Mey & Pfützner 2008; Natkhin 2010).

Seit Mitte des 18. Jahrhunderts wurden im Bereich der Niederungen verbreitet Entwässerungsmaßnahmen durchgeführt, um eine landwirtschaftliche Produktion zu ermöglichen. Das Fließgewässernetz in Brandenburg ist zum allergrößten Teil künstlich geschaffen oder zumindest massiv anthropogen überprägt worden (Driescher 2003; Blackbourn 2007). Aufgrund der geänderten sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen werden die wasserbaulichen Anlagen heute nur noch in geringem Umfang weiter unterhalten und betrieben (Schleyer 2002).

Bedingt durch die niedrigen Niederschlagsraten, die hohen Evapotranspirationsraten und die überwiegend leichten Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität spielte die landwirtschaftliche Bewässerung in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts in Ostdeutschland eine wichtige Rolle. Nach Simon (2009) wurden in der damaligen DDR im Jahr 1989 10,6 % der Landesfläche der DDR bewässert, und zwar zur Hälfte durch Beregnung bzw. durch Staubewässerung in den Niederungen. Für die Klarwasserberegnung wurden im Mittel 75 bis 100 mm/a angesetzt, für die Staubewässerung 180 bis 200 mm/a (Simon 2009). Nach der Wende nahm der Anteil der Bewässerungsflächen sehr schnell wieder ab. Im Jahre 2002 wurden nur noch 18 % der vormaligen Beregnungsflächen weiterhin bewässert (Simon 2009).

Trinkwassergewinnung

Der auf die Einwohnerzahl bezogene Wasserverbrauch betrug 2007 in Brandenburg 118 l/d, und in Berlin 152 l/d (Statistisches Bundesamt 2009). Wird für die Fokusregion Berlin-Brandenburg eine mittlere Grundwasserneubildungsrate von 86 mm/a (Lahmer & Pfützner 2003) angesetzt, so ergibt sich daraus für Brandenburg eine erforderliche Fläche von 550 m² und für Berlin von 643 m² pro Einwohner. Bezogen auf die jeweilige Gesamtfläche entspricht dies in Brandenburg 4,3 % der Landesfläche. Die Wasserversorgung der Stadt Berlin benötigt dagegen rein rechnerisch annähernd das Zweieinhalbfache der Landesfläche. Die Wasserversorgung Berlins kann also nur dank massiver Importe, überwiegend in Form von Uferfiltrat aus Spree und Havel, gewährleistet werden.

Bergbau

Der Bergbau im Lausitzer Revier hat gravierende Auswirkungen auf den Wasserhaushalt großer Teile Brandenburgs und Berlins. Für die Förderung der Braunkohle im Tagebau war bzw. ist eine Absenkung des Grundwasserspiegels um bis zu 70 m erforderlich (Sonntag 2007). Das Maximum der Absenkung wurde 1989/1990 erreicht. Das Wasserdefizit wird mit 7 Mia. m³ (LMBV 2009) bzw. 13 Mia. m³ (Sonntag 2007) angegeben, von denen ca. ein Drittel auf die zu flutenden Tagebaurestlöcher und zwei Drittel auf den wieder aufzufüllenden Grundwasserspeicher entfallen. Wird für die Wiederauffüllung durch die natürliche Grundwasserneubildung mit einer mittleren Rate von 86 mm/a (Lahmer & Pfützner 2003) auf der Fläche des Absenkungstrichters gerechnet, ergibt sich unter Vernachlässigung lateraler Grundwasserzu- und -abströme ein Zeitbedarf von mindestens 60 Jahren.

Die über einen Zeitraum von fast 100 Jahren erfolgten Einleitungen von Sumpfungswässern aus den Tagebauen in die Spree haben dort zu einer deutlichen Erhöhung des Abflusses geführt (Sonntag 2007), die sich vor allem in Phasen des Niedrigwasserabflusses deutlich bemerkbar machte. Inzwischen allerdings wird zunehmend Wasser aus den Fließgewässern für die Flutung der Tagebaurestseen benötigt. Im Jahr 1990 wurden im Mittel 3,3 m³/s in die Spree eingeleitet, 2000 nur noch 1,3 m³/s (Sonntag 2007). Dies hat gravierende Auswirkungen auf die limnischen Ökosysteme (Pusch & Hoffmann 2000). Sinkende Abflüsse in der Spree stellen eine Gefährdung der ausgedehnten Feuchtgebiete im Spreewald dar. Sinkende Grundwasserstände in dieser Region würden außerdem zu einer weiteren Mineralisierung der noch vorhandenen Torfe und somit zur Freisetzung großer Mengen Kohlenstoffs führen (Lorenz et al. 2005).

Für Berlin ist eine Mindestwasserführung nicht nur für die Schifffahrt und aus ökologischen Gründen, sondern auch zur Verdünnung der innerhalb des Stadtgebietes in die Vorfluter eingespeisten gereinigten Abwässer erforderlich. Mit den Oberliegern wurde deshalb eine Mindestwasserführung der Spree am Pegel Große Tränke, bei Erreichen des Stadtgebietes von Berlin, von 8 m³/s vertraglich vereinbart. Werden die Verdunstungsverluste im Spreewald (Koch et al. 2009) mit berücksichtigt, bedeutet das, dass während der Vegetationsperiode ein Mindestzufluss von 16 m³/s in den Spreewald gewährleistet werden muss. Dies bereitete in den letzten Jahren zunehmend Probleme (Grünwald & Uhlmann 2004). Deshalb ist vorgesehen, in den besonders kritischen Phasen im Sommer den Niedrigwasserabfluss durch die Nutzung der Speicherbecken Lohsa II, Bärwalde und Cottbusser See zu stützen (Koch et al. 2009).

In den trocken gefallen Bereichen des Grundwasserleiters sowie im abgelagerten Kippenmaterial führt der Zutritt von Sauerstoff zur Oxidation der in den Sedimenten enthaltenden Pyrite und Markasite zu Sulfat (Graupner et al. 2007; Sonntag 2007), das bei der anschließenden Flutung in Lösung geht. Es wird deshalb versucht, die Tagebaurestlöcher möglichst schnell mit unkontaminiertem Oberflächenwasser zu füllen, um einen hydrostatischen Gegendruck gegen die lateral zuströmenden, hochgradig belasteten Grundwässer aufzubauen und so eine Versauerung der Tagebaurestseen zu verhindern (Gröschke et al. 2002; Grünwald & Uhlmann 2004).

Prognosen

Aufgrund der geringen aktuellen Grundwasserneubildungsraten, der hohen Evapotranspirationsraten und der überwiegend sandigen Böden mit geringer Wasserhaltekapazität reagiert der Landschaftswasserhaushalt in der Fokusregion Berlin-Brandenburg wesentlich empfindlicher auf Änderungen der natürlichen und anthropogenen Rahmenbedingungen als in anderen Regionen Deutschlands. Umso mehr interessiert die Frage, welche Handlungsoptionen zur Verfügung stehen. Im Mittelpunkt der allgemeinen Diskussion steht der Klimawandel. Hierzu liegen inzwischen zahlreiche Studien vor (Suckow et al. 2002; Gerstengarbe et al. 2003; Wechsung 2005; Spekat et al. 2007; Jacob et al. 2008). Dagegen fällt es deutlich schwerer, die zukünftige Entwicklung etwa der sozio-ökonomischen Randbedingungen abzuschätzen. Nichtsdestotrotz wird der Nutzungsdruck auf die Landschaft vermutlich weiterhin hoch bleiben, sodass nicht mit gravierenden Änderungen der Landnutzung zu rechnen ist.

Generell stimmen die verschiedenen regionalen Klimamodelle für die Fokusregion Berlin-Brandenburg hinsichtlich eines deutlichen Temperaturanstiegs innerhalb der nächsten 50 bis 100 Jahre überein. Bei den Niederschlägen wird tendenziell eine Abnahme der Sommer- und eine Zunahme der Winterniederschläge erwartet. Dies führt dazu, dass die potenzielle sommerliche Evapotranspiration ansteigt und generell mit einer Verringerung der Abflussbildung bzw. Grundwasserneubildung zu rechnen ist (Suckow et al. 2002; Gerstengarbe et al. 2003; Wechsung 2005; Spekat et al. 2007; Jacob et al. 2008). Die Auswirkungen auf landwirtschaftliche Erträge werden jedoch für die nächsten Jahrzehnte als gering eingeschätzt. Die Auswirkungen der abnehmenden Wasserverfügbarkeit werden demnach durch den Temperaturanstieg und die Düngungswirkung höherer CO₂-Gehalte in der Atmosphäre weitgehend kompensiert (Gerstengarbe et al. 2003; Wechsung et al. 2008). Dabei wurden jedoch weder der zu erwartende züchterische Fortschritt noch Verbesserungen in der Anbautechnik, in der Düngung oder im Pflanzenschutz berücksichtigt. Außerdem wurde keine Zunahme der Bewässerung vorausgesetzt.

Für Südbrandenburg fällt der erwartete Rückgang von Abfluss- und Grundwasserneubildung zeitlich mit dem erhöhten Wasserbedarf zur Flutung der Tagebaurestlöcher in der Lausitz zusammen. Die damit verbundene Ausweitung der Wasserflächen führt wiederum zu einer verstärkten Verdunstung. In der Modellstudie von Koch et al. (2009) würde ab 2020 im statistischen Mittel in 20 von 100 Jahren die Spree trockenfallen. Diskutiert werden deshalb Überleitungen aus der Elbe oder der Oder. Bei der Oderwasserüberleitung wären Aspekte der Wasserbeschaffenheit zu beachten, gegen die Elbewasserüberleitung spricht neben den sehr hohen Kosten auch die dort zunehmend problematischer werdende Niedrigwasserführung.

Anpassungsmaßnahmen

Der prognostizierte Klimawandel wird nach dem heutigen Kenntnisstand den Wassermangel in der Fokusregion Berlin-Brandenburg weiter verschärfen. Selbst bei ei-

ner sofortigen und vollständigen Reduktion der Emission aller Treibhausgase wäre aufgrund der Reaktionsträgheit des Klimasystems erst in einigen Jahrzehnten eine spürbare Entlastung zu erzielen.

Angesichts der sich mutmaßlich weiter zuspitzenden Situation des Landschaftswasserhaushalts muss dem Rückhalt des Wassers in der Landschaft wieder Vorrang gegenüber der immer noch weitgehend praktizierten schnellstmöglichen Abführung des Wassers aus der Landschaft eingeräumt werden. Eine Schließung der Rohrdrainagen und Verfüllung der Entwässerungsgräben hätte allerdings zur Folge, dass diese Flächen nicht mehr in der üblichen Weise bewirtschaftet werden könnten. Hier wäre zu überlegen, wiedervernässte Flächen alternativ als Paludikulturen zu nutzen, beispielsweise durch Anbau von Schilf, Weiden-Erlen-Gebüsch oder Pappeln zur stofflichen und energetischen Verwertung (Schäfer 2005; Wichtmann & Schäfer 2007; Tanneberger et al. 2008).

Jedoch ist die Evapotranspiration von diesen Flächen sehr hoch. Die Erhaltung bzw. Wiedervernässung eines Feuchtgebiets ginge dann zulasten der Unterlieger. In vielen Fällen wäre es deshalb sinnvoller, die vorhandenen Anlagen in den Niederungen wieder für eine aktive Steuerung des Wasserhaushalts, d. h. Entwässerung im Frühjahr und Staubewässerung im Sommer, zu nutzen. Somit wäre eine höhere Ertragssicherheit zu erreichen. Auf grundwasserfernen Standorten wird voraussichtlich in Zukunft die Notwendigkeit zur Bewässerung steigen. Bei der heute in Brandenburg verwendeten Beregnungstechnik sind allerdings die Verluste aus Boden- und Interzeptionsverdunstung noch recht hoch (Lüttger 2001). Eine optimierte Ausbringungstechnik, z. B. als Tröpfchenbewässerung, könnte hier deutliche Einsparungen bringen. Allerdings rentieren sich solche Anlagen unter den zurzeit herrschenden klimatischen Bedingungen und bei den aktuellen Produkt- und Wasserpreisen nicht.

Zumindest im Umland Berlins könnten zudem noch große Wasserreserven mobilisiert werden. Die dort anfallenden Abwassermengen entsprechen einem Mehrfachen der natürlichen Grundwasserneubildung des Stadtgebiets. Würde gereinigtes Abwasser zur Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen oder zur Stützung des Wasserhaushalts von Feuchtgebieten verwendet, könnten dadurch gleichzeitig auch noch die darin enthaltenen restlichen Nährstoffe genutzt und organische Schadstoffe im biologisch aktiven Oberboden abgebaut werden. Ein Teil dieses Wassers würde durch Evapotranspiration in die Atmosphäre abgegeben werden, der Rest aber, so wie es heute ohnehin der Fall ist, würde als Grundwasserzustrom dem Abfluss in den Vorflutern zugutekommen.

Die angestrebte Umwandlung der von Kiefern dominierten Nadelwälder in Laub- oder Laubmischwälder würde nicht nur das Waldbrand-, das Kalamitäts- und das wirtschaftliche Risiko verringern und die Biodiversität erhöhen, sondern auch die Evapotranspirationsraten verringern. Allerdings kann der Waldumbau aus Kostengründen nur sukzessiv durch Ersetzen der jeweils hiebreifen Nadelwaldbestände vorgenommen werden und würde einen Zeitraum von ca. 100 Jahren erfordern. Dem wäre die Geschwindigkeit des Klimawandels entgegenzusetzen (Natkin 2010). Eine deutlichere Reduktion der Evapotranspiration wäre allerdings z. B. durch ackerbauliche Nutzung der heute noch bewaldeten Flächen zu erreichen, ließe sich aber politisch kaum im größeren Maßstab durchsetzen.

In Einzelfällen sind Wasserüberleitungen aus Elbe oder Oder und die Nutzung großer Speicher zum Rückhalt des Wassers in den Wintermonaten zu erwägen. Allerdings ist bei allen Maßnahmen, die auf die Erhaltung oder Neuanlage von Stillgewässern und Feuchtgebieten abzielen, die damit gesteigerte Evapotranspiration zu berücksichtigen. Ein gezieltes Trockenfallenlassen einzelner Gewässer würde langfristig dem Zufluss in andere, unterhalb gelegene Gewässer und damit deren Erhaltung zugutekommen.

Bei verringerter Grundwasserneubildung und lokal eventuell zusätzlich erhöhter Grundwasserförderung sinkt der hydrostatische Druck der oberen Grundwasserstockwerke, sodass örtlich saline Tiefenwässer bis in die oberen Grundwasserstockwerke aufsteigen können (Grube et al. 2000; Hannappel et al. 2007). Somit werden die Rahmenbedingungen für die Trinkwasserversorgung und für die Bewässerung quantitativ und qualitativ in Zukunft nicht nur für die Nutzung von Uferfiltrat aus Oberflächengewässern, sondern auch für die Förderung aus tiefen Grundwasserbrunnen voraussichtlich ungünstiger werden.

Wasserhaushaltliche und wasserwirtschaftliche Bilanzen

Uwe Grünewald

Einleitung

Im Folgenden wird die Relevanz der quantitativen Beschreibung des Wasserkreislaufes, der Wasserhaushaltsbilanz, und wasserwirtschaftlicher Bilanzen für die Fokusregion aufgezeigt. Diese sind die Grundlage dafür, notwendige Anforderungen an wasserwirtschaftliche Planungen zu formulieren.

In ihrer allgemeinen Form stellt sich eine wasserhaushaltliche Bilanz für eine bestimmte Fläche bzw. einen Raumausschnitt und einen bestimmten Zeitausschnitt im Zusammenwirken der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (P von *precipitation*), Verdunstung (ET von *evapotranspiration*), Abfluss (R von *runoff*) und Speicheränderung (ΔS von *storage*) dar zu

$$P - ET - R - \Delta S = 0. \quad (1.1)$$

Die Raum- und Zeitbezogenheit ist unbedingt erforderlich. Für langjährige Mittelwerte (Querstrich) gilt

$$\bar{P} = \bar{ET} + \bar{R}. \quad (1.2)$$

Für Zeitabschnitte von wenigen Jahren oder Einzeljahren kann die Wasserspeicherung S nicht vernachlässigt werden, sodass für Flusseinzugsgebiete die allgemeine Form der Wasserhaushaltsgleichung (1.1) aufzustellen ist. Flusseinzugsgebiete werden nach DIN 4049 verstanden als ein „in Horizontalprojektion gemessenes Gebiet, aus dem das Wasser einem bestimmten Ort zufließt“.

Gemäß dem *Hydrologischen Atlas von Deutschland* (HAD 2003) ergibt sich die wasserhaushaltliche Bilanz für die Gesamtfläche Deutschlands ($A_E = 357.020 \text{ km}^2$) für die Jahresreihe 1961 bis 1990 zu

$$\overline{P_{\text{kor}}}(859) = \bar{R}(327) + \bar{ET}(532)\text{mm/a}, \quad (1.3)$$

wobei $\overline{P_{\text{kor}}}$ die langjährige mittlere korrigierte Niederschlagsjahressumme darstellt.

Für die Fläche der Fokusregion Berlin-Brandenburg ($A_E = 30.370 \text{ km}^2$) wurde gemäß LUA (2002) für die Jahresreihe 1961 bis 1990 folgende wasserhaushaltliche Bilanz ermittelt:

$$\overline{P_{\text{kor}}}(617) = \bar{R}(109) + \bar{ET}(508)\text{mm/a}. \quad (1.4)$$

Bei wasserwirtschaftlichen Bilanzen geht es über die Gegenüberstellungen der vorgenannten hydrologischen Größen hinaus darum, aus der Gegenüberstellung des natürlich vorhandenen Wasserdargebotes zu den bereits getätigten, unmittelbar beabsichtigten oder langfristig geplanten Nutzungen die (noch verbleibende) Verfügbarkeit des (Oberflächen-)Wassers für die verschiedensten Nutzer zu ermitteln.

In der einfachsten Form einer wasserwirtschaftlichen Bilanz, der Summenbilanz, wird an einem Bilanzprofil (z. B. Mündung eines Fließgewässers) das natürliche Wasserdargebot der Summe aller Nutzungsverluste aus Nutzungen am betrachteten Fließgewässer bzw. im betrachteten Fließgewässereinzugsgebiet gegenübergestellt:

Natürliches Wasserdargebot	+	Mio. m ³ /Monat
Summe der Nutzungsverluste	–	Mio. m ³ /Monat
Bilanz am Profil	±	Mio. m ³ /Monat.

Aufgegliedert in die differenzierten Entnahmen und Rückleitungssummen sowie die Summe von Überleitungen zwischen Einzugsgebieten und Speichereinflüssen aus dem regulierten Dargebot erweitert sich das obige Rechenschema der Summenbilanz folgendermaßen:

Natürliches Dargebot des Bilanzgebietes	+	Mio. m ³ /Monat
Summe Ableitungen aus dem Bilanzgebiet	–	Mio. m ³ /Monat
Summe Zuleitungen in das Bilanzgebiet	+	Mio. m ³ /Monat
Summe Speichereinfluss im Bilanzgebiet	±	Mio. m ³ /Monat
Summe Entnahmen im Bilanzgebiet	–	Mio. m ³ /Monat
Summe Rückleitungen im Bilanzgebiet	+	Mio. m ³ /Monat
Bilanzsaldo	±	Mio. m ³ /Monat.

Wird dieses Saldo dem aus ökologischen Gründen erforderlichen Mindestabfluss gegenübergestellt, ergibt sich das noch verfügbare Dargebot an diesem Bilanzprofil bzw. für dieses Flusseinzugsgebiet:

Mindestabfluss	–	Mio. m ³ /Monat
noch verfügbares Dargebot	±	Mio. m ³ /Monat.

Wasserwirtschaftliche und -haushaltliche Bilanzen für die Fokusregion Berlin-Brandenburg

Solche „wasserwirtschaftlichen Bilanzen“ wurden in den letzten Jahren zu leistungsfähigen detaillierten Verfahren der integrierten Wasserressourcenbewirtschaftung für große Flussgebiete wie z. B. das der Elbe (Grünwald 2001; Loucks & van Beek 2005), aber auch für die sächsisch-brandenburgischen wasserwirtschaftlichen Problemregionen der Lausitz in den Flusseinzugsgebieten von Spree und Schwarzer Elster entwickelt.

Dazu ist es erforderlich, die gesamten Wasservolumina zu erfassen, die sich in einem Gebiet (stochastisch) bilden, die ihm aber auch ober- und unterirdisch zufließen oder durch (deterministische) Wasserüberleitungen beispielsweise in Form von Fremdwasserüberleitungen oder Kanälen zu- bzw. abgeführt werden.

Die wasserwirtschaftliche Summenbilanz des Spreeabschnittes zwischen dem Pegel Lieske unterhalb der Talsperre Bautzen und dem Pegel Leibsch unterhalb des Spreewaldes lässt sich gemäß Tabelle 5 erstellen.

Tabelle 5. Wasserwirtschaftliche Summenbilanz für die Spree zwischen den Pegeln Lieske und Leibsch (Quelle: LUA 1993)

Bilanzgröße [m ³ /s]	Bilanzjahr		
	1989	2000	2010
Bilanzabfluss oberes Spreegebiet	2,35	3,10	3,10
Sümpfungswasseraufkommen	31,80	17,00	14,00
Eigendargebot	1,00	1,35	1,75
Speicherzufluss (Talsperre Spremberg)	0,75	2,00	2,00
Nutzungsverluste insgesamt (Industrie, Energie etc.)	14,30	-11,90	-11,70
Infiltrationsverluste Bergbaugbiet	-8,00	-6,00	-4,50
Verdunstungsverluste im Spreewald	-5,00	-5,00	-5,00
Bilanzsaldo Pegel Leibsch	8,60	0,55	-0,35
aus ökologischen Gründen erforderlicher Mindestabfluss	4,00	4,00	4,00

Bei einem angenommenen Rückgang der Braunkohleförderung geht das Sümpfungswasseraufkommen (Wasser aus Entwässerung eines Bergwerks/Grundwasserabsenkung) innerhalb dieses Spreeabschnitts um mehr als die Hälfte zurück. Das Eigendargebot des „Zwischeneinzugsgebietes“ (der Spree) steigt wegen des langsamen Schrumpfens des Grundwasserabsenkungstrichters nur gering. Die Nutzungsverluste nehmen ebenso wie die bergbaubedingten Infiltrationsverluste nur langsam ab. Im Jahre 2000 treten am Pegel Leibsch gegenüber dem Trockenjahr 1989 Werte unter 1 m³/s auf und im Jahre 2010 sogar ein Negativwert als Bilanzsaldo. Bisher wurde zur Sicherung der Wasserversorgung von Berlin von den Wasserbehörden immer ein Mindestabfluss von 8 m³/s am Pegel Leibsch gefordert. Aber sogar der bisher angenommene landschaftsnotwendige Kleinstabfluss bzw. die aus ökologischen Gründen erforderliche Mindestwasserführung von 4 m³/s unterhalb des Spreewaldes ist nicht erfüllt.

Die Notwendigkeit der Schaffung zusätzlicher Ausgleichsmaßnahmen liegt auf der Hand. Der Umfang der Maßnahmen ergibt sich z. B. nach Koch et al. (2005) aus Wasserbewirtschaftungsszenarien auf Basis modellgestützter wasserwirtschaftlicher Bilanzierungen, bei denen nach dem Monte-Carlo-Prinzip – also durch eine Vielzahl von Zufallsexperimenten – stochastisch simulierte Dargebotsgrößen dem instationären Wasserbedarf gegenübergestellt werden. Die Szenarien basieren auf umfangreichen detaillierten wasserwirtschaftlichen Bilanzierungen und beziehen neben dem Bedarf unterschiedlichster Wassernutzer auch veränderte globale und regionale Rahmen- und Randbedingungen ein.

Darauf aufbauend liegen umfangreiche weitere Problem- und Konfliktanalysen zur länderübergreifenden Wasserbewirtschaftung im Spree-Havel-Gebiet im Kon-

text des globalen Wandels (z. B. Grünewald 2005; Koch et al. 2006), zur Verknüpfung von Wasserbewirtschaftungs- und Wassersteuerungsmodellen in der Fokusregion (z. B. Grünewald 2001) und zur Ableitung von Wassermanagementoptionen für den Erhalt des Spreewaldes unter den Bedingungen des globalen Wandels (z. B. Dietrich et al. 2007) vor.

Für wasserwirtschaftliche Betrachtungen muss daher auch in Erweiterung von Gleichung 1.3 für die Fläche Deutschlands mit einem zusätzlichen langjährigen „Zufluss von Oberliegern“ in Höhe von 199 mm/a und für die Fokusregion Berlin-Brandenburg (Gleichung 1.4) mit einem solchen von 344 mm/a gerechnet werden.

Sinnvoll wäre es, solche Wasser(-haushalts- und -wirtschafts-)Bilanzen flusseinzugsgebietsbezogen vorzunehmen, da dies eine genauere Berechnung ermöglichen würde. Tabelle 6 enthält entsprechende Angaben für die Einzugsgebiete von Donau, Rhein und Elbe sowie für die Flächen Deutschlands und Berlin-Brandenburgs.

Tabelle 6. Einzugsgebietsflächen und Abflussbilanzhöhen für ausgewählte Flusseinzugsgebiete Deutschlands für die Zeitreihe 1961–1990 sowie für die politischen Einheiten Deutschland und die Fokusregion Berlin-Brandenburg (Quelle: HAD 2003)

Strom- oder Küstengebiet	Flächengröße Ausland [km ²]	Flächengröße Bundesgebiet [km ²]	Gesamt [km ²]	Zufluss [mm/a]	Abfluss [mm/a]	Gesamt [mm/a]
Donau	20.880	56.270	77.150	1.019	434	593
Rhein	57.154	102.348	159.500	695	348	473
Elbe	51.145	97.455	148.600	194	189	191
Deutschland		357.020		199	296	495
Berlin-Brandenburg		30.368		344	109	453

Wie die Tabelle 6 darstellt erfolgen die größten ausländischen Zuflüsse nach Deutschland über den Rhein. Während die ausländischen Zuflüsse des Rheins 43 % und der Donau 30 % des Gesamtzuflusses betragen, sind es bei der Elbe nur 14 %. Auch die Abflüsse liegen bei Rhein und Donau am höchsten, was jedoch durch die Flächenunterschiede relativiert wird, sodass die Gesamtwerte für die Elbe am geringsten sind.

Daraus wird gefolgert, dass die Fokusregion Berlin-Brandenburg durch ihre naturbedingte Lage im vergleichsweise „wasserarmen“ Einzugsgebiet der Elbe besonderer wasserwirtschaftlicher Aufmerksamkeit und Einflussnahmen bedarf (Grünewald 2010).

In LUA (2002) wird der Versuch unternommen, in die langjährige mittlere Wasserhaushaltsbilanz der Betrachtungsregion die Einflussnahmen durch menschliche Nutzungen einzubinden (Abb. 16).

Als Zufluss von Oberliegern werden für Berlin-Brandenburg 344 mm/a angegeben. Somit entstammen die 453 mm/a, welche die Betrachtungsregion im langjährigen Mittel als Abfluss verlassen, nur etwa zu einem Viertel der Abflussbildung auf den Landesterritorien Brandenburgs und Berlins. Auch daraus wird ersichtlich, dass die Region ein deutlich unter dem Durchschnitt liegendes Wasserdargebot aufweist.

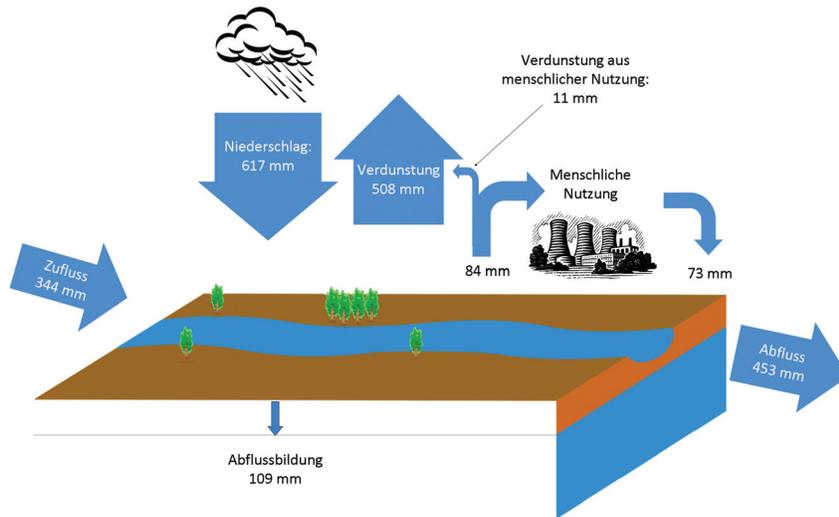


Abb. 16. Wasser(-wirtschaftliche) Bilanz Berlin-Brandenburg, Stand 2000 (Quelle: LUA 2002)

Um die wasserhaushaltliche bzw. wasserwirtschaftliche Situation der beiden Bundesländer besser einordnen zu können, wird ein bundesländerbezogener Vergleich vorgenommen (Tab. 7).

Tabelle 7. Abflussbildung in den deutschen Bundesländern für die Zeitreihe 1961–1990 (Quelle: HAD 2003)

Bundesland	Fläche [km ²]	Einwohner [in 1.000]	Abfluss [m ³ /s]	Abflusshöhe [mm/a]
Baden-Württemberg	35.751	10.524	535	472
Bayern	70.548	12.230	855	382
Berlin	891	3.382	5	182
Brandenburg	29.477	2.602	82	88
Bremen	404	660	4	289
Hamburg	755	1.715	8	315
Hessen	21.114	6.068	205	308
Mecklenburg-Vorpommern	23.171	1.776	97	132
Niedersachsen	47.614	7.926	404	268
Nordrhein-Westfalen	34.080	18.010	438	405
Rheinland-Pfalz	19.847	4.035	202	321
Saarland	2.570	1.069	33	410
Sachsen	18.413	4.426	134	229
Sachsen-Anhalt	20.447	2.615	60	93
Schleswig-Holstein	15.764	2.790	165	330
Thüringen	16.172	2.431	118	230
Deutschland	357.020	82.260	3.345	296
Deutschland mit ausl. Zustrom	357.020	82.260	5.955	526

Danach gilt: Das wasserreichste Bundesland ist Bayern mit einem Abfluss von 855 m³/s. Die große Fläche des Bundeslandes und der hohe Wert für die Abflussbildung in Höhe von 382 mm/a sind entscheidende Faktoren für diesen Wasserreichtum. Aufgrund seiner geringen Fläche weist das Saarland mit 33 m³/s den geringsten Abflusswert der Flächenländer auf. Bezogen auf die Abflussbildung steht das Land mit 410 mm/a jedoch an zweiter Stelle hinter Baden-Württemberg, das mit 472 mm/a den höchsten Wert aller Bundesländer erreicht. Mit Werten für die Abflussbildung in Höhe von 88 mm/a liegt das Land Brandenburg deutlich unter dem für das Bundesgebiet ausgewiesenen Wert von 296 mm/a. Der höhere Wert der Abflusshöhe für Berlin erklärt sich aus dem vergrößerten Anteil urbanisierter bzw. versiegelter Flächen mit großer Abflussbereitschaft.

Dieser Vergleich der Bundesländer zeigt, dass es sich bei der Fokusregion Berlin-Brandenburg naturbedingt um eine besondere wasserhaushaltliche und in einigen Teilregionen zudem wasserwirtschaftliche Problemregion handelt. Die durchschnittlichen Niederschläge liegen hier mit 550 bis 650 mm/a im Vergleich zu den westlichen Bundesländern um rund 200 mm/a niedriger. „Überwiegend sandige Böden mit geringer Wasserhaltekapazität lassen das Wasser zudem rasch in die Tiefe versickern“ (LUA 2002, S. 46). Die besonders geringen mittleren winterlichen Niederschlagssummen von unter 200 mm bzw. in vielen Teilregionen sogar von unter 150 mm in den Monaten November bis April sind ungünstige natürliche Voraussetzungen zur winterlichen Auffüllung des Bodenwasserspeichers und des Grundwassers in dieser Region.

Demgegenüber stehen hohe Werte des Verdunstungsanspruchs, der sich z. B. in der potenziellen Verdunstung (Gras-Referenzverdunstung) von 600 bis 650 mm/a ausdrückt, was insgesamt zu fast durchweg negativen Werten der mittleren jährlichen klimatischen Wasserbilanz in Berlin-Brandenburg führt. Bemerkenswert ist auch die innerjährliche Verteilung der klimatischen Wasserbilanz als Differenz von (korrigierter) Niederschlagshöhe und der Höhe der potenziellen Verdunstung: „Der gesamte Tieflandbereich von Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Sachsen weist negative Sommerhalbjahresbilanzen auf, wobei die Durchschnittswerte –100 mm teilweise erheblich unterschreiten. Die größten Defizite im Sommerhalbjahr nehmen Werte kleiner –300 mm an“ (HAD 2003, Erläuterungen zur Karte 2.14).

Anforderungen an die wasserwirtschaftliche Planung

Selbst unter Berücksichtigung von „grenzüberschreitenden Fremdzulüssen“ bedarf die Fokusregion Berlin-Brandenburg im vergleichsweise wasserarmen Einzugsgebiet der Elbe besonderer wasserwirtschaftlicher Aufmerksamkeit und Einflussnahme. Daraus resultiert die Notwendigkeit zu einer modellgestützten Wasserbewirtschaftung (Grünewald 1978), zur Mehrfachnutzung des verfügbaren Wassers (Dyck et al. 1991), zum Bewässerungslandbau (Simon 2009) sowie zum Bau von Talsperren und Wasserüberleitungen (IKSE 2005) im Elbeeinzugsgebiet.

Ferner leiten sich daraus besondere Anforderungen an die wasserwirtschaftliche Planung und Bewirtschaftung wie auch an die Bilanzierung im Einzugsgebiet der

Elbe und in der Fokusregion Berlin-Brandenburg ab. Diese Maßnahmen sind unter den sich ändernden Bedingungen des globalen und regionalen Wandels differenziert und detailliert anzupassen.

Vor diesem Hintergrund wurden umfangreiche Untersuchungen etwa zur Wasserbewirtschaftung im Gesamteinzugsgebiet der Elbe (Koch et al. 2007) sowie zu Anpassungsstrategien für die Wasserbewirtschaftung bei globalem Wandel im Einzugsgebiet der Spree (Koch et al. 2009) und des Spreewaldes (Dietrich et al. 2007) durchgeführt. Analog zu Lischeid lässt sich schlussfolgern, dass „der Landschaftswasserhaushalt in der Region Berlin-Brandenburg wesentlich empfindlicher auf Änderungen der natürlichen und anthropogenen Rahmenbedingungen reagiert als in anderen Regionen Deutschlands“ (Lischeid 2010: 41).

Umfangreich hat sich daher der Beirat für Nachhaltige Entwicklung und Ressourcenschutz des Landes Brandenburg (NHB 2009) mit der „aktuellen Situation der Wasserwirtschaft in Brandenburg“ befasst und „Maßnahmenvorschläge für ein nachhaltiges Wassermanagement in Brandenburg“ entwickelt. Der Beirat geht davon aus, dass die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) darauf ausgerichtet ist, die Prinzipien der Nachhaltigkeit über das spezifische Ziel der Erhaltung und Verbesserung der aquatischen Umwelt in die Länder der europäischen Gemeinschaft hineinzutragen. Dies erfordert letztlich eine neue Qualität des vernetzten Denkens und Handelns im Flussgebietsmaßstab, insbesondere durch eine stärkere Zusammenführung von Land- und Wasserbewirtschaftung, eine verbesserte Verknüpfung von Flächennutzung und Raumplanung mit der Wasserbewirtschaftung sowie die Einbindung des Wasserbedarfsmanagements.

Die demnach zu realisierenden Maßnahmen fallen unter die folgenden Hauptpunkte:

- Kooperation und Kommunikation zwischen den Akteuren der Gewässerunterhaltung verbessern,
- Planungs- und Richtlinienkompetenz des Landes gezielter ausschöpfen,
- Finanzinstrumente stärker an den Zielen der EU-WRRL ausrichten,
- Forschungskapazitäten besser nutzen,
- Rechtsrahmen anpassen.

Die Liste der empfohlenen Einzelmaßnahmen ist lang. Sie reicht von:

- „Kommunale Aufgabenträger, Unterhaltungsverbände, Grundstücks- und Gewässernutzer sowie Umweltverbände müssen bei der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie enger zusammenarbeiten. Ziele: Akteure informieren, Ausführende anleiten und qualifizieren, Beteiligung verbessern, Subsidiarität praktizieren/ Bottom-up-Ansätze fördern, Interessenlagen transparent machen, Akzeptanz fördern, gemeinsame Ziele definieren, Förderstrategien und -mittel transparent machen. Es ist erforderlich, dass der Gesetzgeber die Rahmenbedingungen für den Rechtsanwender verständlich und im Hinblick auf die Orientierung am Prinzip der Nachhaltigkeit eindeutig formuliert.
- Das Land sollte hierzu einen Praxisleitfaden erarbeiten und bereitstellen, ähnlich, wie dies in anderen Bundesländern geschieht („Hinweise zur schonenden Gewässerunterhaltung“).

über:

- „Die Wasserwirtschaftlichen Konzepte und Planungen sollten länderübergreifend (insbesondere mit Berlin) enger abgestimmt werden. Die Bildung länderübergreifender Bewirtschaftungsverbände ist sinnvoll.
- Einführung eines landesweiten Niedrigwassermanagements für Niedrigwasserphasen mit übergeordneter Entscheidungskompetenz der Landesbehörden über sämtliche wasserwirtschaftliche Anlagen ähnlich wie im Fall der Hochwasservorsorge.
- Hochwasservorsorge und Wasserbewirtschaftung müssen planerisch besser miteinander abgestimmt werden.
- Eine Anpassung der Agrarförderpolitik ist nötig, um die Landnutzung stärker an den Zielen der Wasserrahmenrichtlinie auszurichten. Die Agrarbeihilfen sollten stärker dazu genutzt werden, um die Landwirte als Partner für deren Umsetzung zu gewinnen. Finanzielle Nachteile der Landwirte für naturgerechtes Wirtschaften müssen beseitigt werden. Beispielsweise sollten vernässte Flächen in die Direktzahlungen (1. Säule) einbezogen werden; gleichzeitig sollte die Umstellung von Rinderstallhaltung auf Weidewirtschaft gefördert werden.
- Unterstützung der Entwicklung und Anwendung von praxistauglichen Verfahren zur Nutzung von Brauchwasser für die Wasserrückhaltung, Wiedervernässung sowie Rückgewinnung von Nähr- und Mineralstoffen. Zur Rückführung gereinigter Abwässer in die Landschaft sollten Forschungs- und Modellprojekte realisiert werden, um die Wissensbasis zu verbessern und so die nötigen fachlichen Voraussetzungen zu schaffen.
- Es sollte überprüft werden, welche Risiken angesichts des Klimawandels, der weiteren Braunkohlenutzung sowie der wasser- und stoffhaushaltlichen Sanierung im Lausitzer Revier für die verschiedenen Wassernutzungen im Einzugsgebiet der Spree und der Schwarzen Elster bestehen.“

bis hin zu:

- „Zu den zu überarbeitenden Gesetzen und Verordnungen gehören unter anderen das Landeswassergesetz, das Wasserverbandsgesetz, das Kommunalabgabengesetz, das Zweckverbandsgesetz sowie nachfolgende Richtlinien und Verordnungen, insbesondere auch die Grundwasserverordnung. In den Normen muss eine Umorientierung der Zweckverbände hinsichtlich ihrer Aufgaben dahingehend festgeschrieben werden, auch zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes sowie zur verstärkten Anwendung dezentraler Lösungen der Abwasserbehandlung beizutragen, wo es ökologisch sinnvoll ist. Das Kommunalabgabengesetz ist so anzupassen, dass es für die Zweckverbände Anreize bietet, ökologische Lösungen für zentrale Klärwerke umzusetzen, und dass Grundstückskleinkläranlagen dauerhaft zugelassen werden können.“ (NHB 2009: 42–45)

Insgesamt zeigt sich, dass die Fokusregion Berlin-Brandenburg bedingt durch ihre Lage im vergleichsweise wasserarmen Einzugsgebiet der Elbe seit jeher und auch zukünftig besonderer Aufmerksamkeit bei der verknüpften Planung und Bewirtschaftung von Land- und Wasserressourcen unter sich ändernden globalen und regionalen Rahmen- und Randbedingungen bedarf.

Kernaussagen

Barbara Köstner, Sonja Germer, Jost Heintzenberg

Herausforderungen infolge des Umweltwandels

Das regionale Klima stellt eine wesentliche Rahmenbedingung aller natürlichen Prozesse und des menschlichen Handelns dar und war bisher relativ verlässlich. Verbunden mit dem seit einigen Jahrzehnten beobachtbaren Anstieg der mittleren Temperaturen werden bekannte Schwankungsbereiche überschritten. Daher ist es nicht möglich, unsere bisherigen Erfahrungen ohne weiteres in die Zukunft zu übertragen. Wir sind gefordert, fehlendes Erfahrungswissen durch Systemwissen und *Abschätzungen des zukünftigen Systemverhaltens* zu ergänzen.

Das Systemverhalten von Atmosphäre, Biosphäre, Pedosphäre und Hydrosphäre ist sehr komplex und kann nur durch aufwändige numerische Modelle simuliert werden. Die Güte dieser Abschätzung hängt vom Systemverständnis und seiner Wiedergabe im Modell ab. Die Dynamik von Modellsimulationen wird sowohl durch Klimadaten angetrieben als auch durch Veränderungen der Oberfläche infolge von Land- und Bodennutzung. Bisher wurden vor allem Letztere ungenügend in den regionalen Klimamodellen berücksichtigt. Hinzu kommt, dass der Mensch die Dynamik über die Emission von Treibhausgasen und Aerosolen und die Bewirtschaftung der Landoberfläche beeinflusst. Dies hängt wiederum von politischen, demographischen und sozioökonomischen Entwicklungen ab. Daher muss mit verschiedenen Szenarien des zukünftigen gesellschaftlichen Verhaltens gearbeitet werden. So besteht eine besondere Herausforderung darin, dass nicht nur Veränderungen in der Vergangenheit erklärt, sondern quantitative Aussagen über mögliche Entwicklungen in der Zukunft getroffen werden sollen. Aus diesen Zusammenhängen ergeben sich große *Unsicherheiten*, die es aufzuzeigen gilt und deren Handhabung gelernt werden muss.

In historischer Perspektive führten die Nutzung natürlicher Ressourcen und wirtschaftliches Handeln schon immer zu einem Wandel der Umwelt. Je nach Art und Intensität des anthropogenen Einflusses manifestierten sich die Folgen zu unterschiedlichen Zeiten. Die Absenkung des Wasserspiegels oder das Trockenfallen eines Gewässers kann einerseits sehr rasch zu Veränderungen der abiotischen Bedingungen und der Biodiversität führen. Andererseits können durch diffuse Einträge zeitverzögert Belastungen im Nährstoffhaushalt von Seen auftreten. Landschaftliche Eingriffe in den Wasserhaushalt etwa durch den Bergbau haben eine langzeitige Wirkung und beeinflussen größere Wassereinzugsgebiete und das Grundwas-

ser. Wassereinzugsgebiete wie auch die Atmosphäre machen dabei vor politischen Grenzen nicht halt. Bilanzierungen des Stoffhaushalts sowie Einschätzungen von Eingriffsfolgen müssen sich daher an natürlichen und politischen Räumen orientieren. Das Aufnahmevermögen der Atmosphäre hinsichtlich anthropogener Gase und das Pufferungsvermögen der Ozeane und großen Landflächen sind enorm. Rückwirkungen auf das regionale Klima machten sich daher erst nach vielen Jahrzehnten bemerkbar. Diese langfristigen Entwicklungen können in absehbarer Zeit nicht gestoppt oder gar rückgängig gemacht werden. Schon aus diesem Grund ist es geboten, nicht nur die Emission von Treibhausgasen zu reduzieren, sondern gleichzeitig Anpassungen an den Klimawandel vorzunehmen. Über die Atmosphäre werden Gase und Aerosole global verteilt. Somit trägt sie zur „Globalisierung“ von bisher räumlich begrenztem Umweltwandel bei. Umweltveränderungen und die ihnen zugrunde liegenden Prozesse müssen daher auf unterschiedlichen *räumlichen und zeitlichen Skalen* und über Skalen hinweg verstanden und abgebildet werden. Dafür ist nicht nur in der Wissenschaft, sondern auch bei Entscheidungsprozessen mehr Abstraktionsvermögen erforderlich.

Die *Fokusregion* ist hinsichtlich ihrer naturräumlichen Rahmenbedingungen und historischen Entwicklung im innerdeutschen Vergleich eine wasserwirtschaftliche Problemregion. Der Klimawandel verschärft diese Entwicklung, da mit einer Zunahme der Verdunstung und Abnahme der Sommerniederschläge zu rechnen ist. Entsprechend reagiert der Landschaftswasserhaushalt derzeit mit überwiegend negativen Trends auf einen Ursachenkomplex von steigender Temperatur, Landnutzungsänderungen, zeitlich variierender Stau- und Abflussregulierung in der Landwirtschaft, Eingriffen in das Abflussverhalten von Fließgewässern sowie in den Grundwasserhaushalt durch den Bergbau bzw. dessen Folgen. Die zahlreichen Gewässer der Region befinden sich heute in einem teils sehr naturfernen und schlechten ökologischen Zustand. Infolge des Anstiegs der Wassertemperaturen ändert sich das physikalisch-chemische Gefüge von Seen, und subtropische, toxische Algenarten konnten sich bereits verbreiten. Allerdings besitzen die Gewässer wichtige Potenziale des Wasserrückhalts sowie der Selbstreinigung, Kohlenstoffsenkenfunktion und Artenvielfalt.

Ansatzpunkte für Forschung und Handeln

Verbesserung des Systemwissens durch Prozessintegration und Datengrundlage

Die Defizite regionaler Klimamodelle bestehen vor allem darin, Rückkopplungen der Atmosphäre mit Prozessen der Landoberfläche bisher nicht hinreichend zu berücksichtigen. Für eine verbesserte Prozessintegration sind räumlich repräsentative Kenngrößen vonnöten. Hier ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit der Forschung weiter zu intensivieren und mit speziellen Anforderungen der Klimamodellierung abzustimmen. Ein weiterer Schritt besteht in der verbesserten Kopplung von Klimamodellen mit Wirkungsmodellen, die z. B. Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt, die Bodenbeschaffenheit und die Pflan-

zenproduktion beschreiben. Damit lassen sich räumlich-explicit zukünftige Entwicklungen abschätzen und Entscheidungen unterstützen. Die Güte der Pflanzen- und Bodenmodelle hängt von Ergebnissen aus langjährigen Feldversuchen ab. Je langzeitiger, desto wertvoller ist in der Regel die Messreihe. Langzeitversuche sollten daher nicht abgebrochen werden.

Gerade in der seenreichen Fokusregion besteht konkreter Bedarf, aquatische Systeme vor allem hinsichtlich ihrer Kohlenstoffbilanzen einzubeziehen. Zur räumlichen Integration und Erfassung der zeitlichen Dynamik von Kenngrößen sollten moderne Methoden der Satelliten-Fernerkundung besser genutzt werden. Für ihre Routineanwendung müssen robuste und einfach anzuwendende Technologien entwickelt werden. Weiter ist davon auszugehen, dass die Fortschritte in der Informationstechnologie die Entwicklung der modellgestützten Analysewerkzeuge auch zukünftig weiter vorantreiben.

Die Simulation von Umweltveränderungen erfordert einheitliche Umweltdaten in hinreichender Dichte zur Extrapolation und Validierung. Zugleich dokumentieren die Umweltbeobachtungen den Zustand der Ökosysteme einschließlich relevanter Entwicklungen. Zur Erreichung des „guten ökologischen Zustands“ gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie ist ein Monitoring von Wassermenge und -beschaffenheit notwendig. Um Veränderungen der Gewässer zu erkennen, die eher auf regionalen Veränderungen wie einer Temperaturerhöhung beruhen, ist es wichtig, ein entsprechendes Monitoring sowohl an Orten mit hohem anthropogenem Einfluss als auch an naturnahen Ökosystemen durchzuführen. Der hohe finanzielle und organisatorische Aufwand für Langzeituntersuchungen legt eine bessere Abstimmung zwischen Behörden, Sanierungsträgern und Forschungseinrichtungen nahe, sodass die Bemühungen sich ergänzen können. Hierbei wären die zahlreichen Initiativen und Forschungs- und Entwicklungsvorhaben auf Regional-, Landes-, Bundes- und EU-Ebene besser zu vernetzen und mit Blick auf Auswertung und Bereithaltung bestehender Daten enger zu verbinden. Bestehende Messnetze sollten daher nicht abgebaut, sondern hinsichtlich möglicher Synergien geprüft werden. Nicht zuletzt gilt es, auch die Nutzung bereits vorhandener Daten in Form von lokalen Klima- aufzeichnungen oder Satellitenarchiven zu unterstützen. Hierfür ist es wichtig, historische Messungen durch Proxydaten, wie zum Beispiel Baumringanalysen, zu validieren. Die Daten sollten einheitlich sowie in digitaler Form vorliegen und zugänglich sein.

Unsicherheiten aufzeigen und mit unscharfem Wissen umgehen

In der Umweltforschung ergeben sich Unsicherheiten aus ungenügendem Systemverständnis und aus der Notwendigkeit, Prozesse über Skalen hinweg, das heißt von global bis lokal bzw. von der Vergangenheit bis in die Zukunft zu extrapolieren. Für die Extrapolation sind Modelle erforderlich, die zwangsläufig die Wirklichkeit nur in reduzierter Form abbilden. Eine sehr gute Datenlage, also geeignete Aufzeichnungen, die weit zurückgehen und in hoher räumlicher Dichte vorliegen, kann die Unsicherheit reduzieren, aber niemals vollständig beheben. Extrapolationen in die

Zukunft bleiben immer unsicher, da die zukünftigen Randbedingungen nicht bekannt sind. Sie müssen in verschiedenen Szenarien angenommen werden. Auch gibt es nicht das eine „wahre Modell“, sondern die Modelle repräsentieren verschiedene mögliche Herangehensweisen. Es empfiehlt sich daher, sich nicht auf ein einziges Modellergebnis zu stützen, sondern mehrere Modelle und Datensätze zu kombinieren. Aus der Spannbreite der Ergebnisse solcher Multi-Modell-Ansätze resultiert ein Maß an Unsicherheit. Je näher der betrachtete zukünftige Zeitraum an der Gegenwart liegt, desto geringer ist im Allgemeinen die Unsicherheit. Um Trends abschätzen zu können, sind daher Beobachtungsdaten essenziell. Der Umgang mit Szenarien und „unscharfen“ Ergebnissen muss erlernt werden. Dazu tragen modellbasierte, interaktive Entscheidungshilfessysteme bei, mit denen verschiedene Szenarien und Datenkombinationen getestet und auch Risikokarten erstellt werden können. Dabei sind Handlungsansätze zu bevorzugen, die sich relativ robust gegenüber unsicheren Entwicklungen verhalten, reversibel, umsteuerbar oder grundsätzlich zu befürworten („No-Regret“) sind.

Entwicklung von Skalenbewusstsein und Skalenintegration

Die „Skalenfrage“ ist Betrachtungen des globalen Klimawandels und seiner regionalen Ursachen bzw. Ausprägungen (z. B. Emissionszentren von Treibhausgasen, großflächige Einflüsse auf den Wasserhaushalt) und globalen Veränderungen immanent. Dies schließt auch die zeitliche Skala, das heißt die sehr langfristigen Entwicklungen von geologischen Zeiträumen bis in die Zukunft hinein ein. Auch in der Ökosystemforschung werden Konzepte an Skalen und Integrationsebenen orientiert. Allgemein werden in der Naturwissenschaft Skalen über zeitlich und räumlich unterschiedlich integrierende Messverfahren (etwa von der Klimastation zum Satelliten oder vom Niederschlagsmesser zum Pegel des Wassereinzugsgebietes) bzw. theoretisch in Modellen integriert. Wichtig sind hierbei eine gute Abstimmung bei der Datenerhebung und die Kompatibilität der Daten. Informationen über die Landoberfläche wie Boden- und Landnutzungsdaten liegen oft nur in sehr uneinheitlicher Form oder nur in grober Auflösung vor, sodass sie für die Entwicklung regionaler oder lokaler Anpassungsmaßnahmen unbrauchbar sind. Die Unsicherheit von Aussagen ist auch von der Skala abhängig. So werden einerseits kurzzeitige Extremereignisse nicht hinreichend in Klimasimulationen repräsentiert. Andererseits sind lokale Extremereignisse wegen ihres Schadenpotenzials von höherer politischer Relevanz als der mittlere Temperaturanstieg. Generell sollte das Bewusstsein für skalenabhängige Prozesse und ihre Verknüpfung über große Skalen hinweg gestärkt werden. Fragen des Umweltwandels müssen für Anwendungen in der Praxis sowohl natürlich als auch politisch definierten Räumen Rechnung tragen. Demnach erfordert die wasserwirtschaftliche Planung eine neue Qualität des vernetzten Denkens und Handelns im Flussgebietsmaßstab, insbesondere durch eine stärkere Zusammenführung von Akteuren der Land- und Wasserbewirtschaftung, der Raumplanung und des Wasserbedarfsmanagements.

Besondere Ansatzpunkte in der Fokusregion

Die Fokusregion wird als „gewässerreich“ und „wasserarm“ zugleich charakterisiert. Dies bedeutet, dass zwar ein hohes Speicher- und Umsetzungspotenzial in den Gewässern besteht, aber durch geringe Niederschläge, hohe Verdunstung und geringe Speicherkapazität der Böden wenig „verfügbares“ Wasser genutzt werden kann. Dadurch reagiert der Wasserhaushalt sehr empfindlich auf Veränderungen der Rahmenbedingungen.

Da zu erwarten ist, dass sich mit dem Klimawandel die Wasserverfügbarkeit in der Vegetationsperiode weiter verringert, sind Maßnahmen zum natürlichen Wasserrückhalt sowie die Einrichtung von Wasserspeichern zu fördern, um eine gleichmäßige Versorgung zu gewährleisten. Weiter könnte gereinigtes Abwasser zur Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen oder zur Stützung des Wasserhaushalts von Feuchtgebieten genutzt werden. Bei Letzterem ist zu beachten, dass begleitende Untersuchungen notwendig sind, da beim Grundwasser Einleitungsgrenzwerte und die deutsche Gesetzgebung zu beachten sind. Das Grundwasser bildet den größten natürlichen und damit kostenlosen Speicher. Zur effizienten Grundwasseranreicherung müssten Flächen identifiziert werden, die besonders geeignet sind, Wasser zurückzuhalten. Das Wieder-in-Funktion-Setzen von natürlichen Retentionsräumen sowie die Revitalisierung und der Schutz von Mooren und anderen Feuchtgebieten hätten neben dem Wasserrückhalt auch einen positiven Effekt auf den Nährstoffrückhalt in der Landschaft. Solche „Win-Win-Effekte“ können sich auch durch ausgedehnte Kulturen von Röhricht- und Weichholzbeständen (Paludikulturen) ergeben, die gleichzeitig als nachwachsender Rohstoff energetisch genutzt werden.

Die Gewässer Berlin-Brandenburgs sollten als wirklicher Reichtum verstanden werden, deren Wert in Zeiten des Klimawandels steigt. Ein bisher weitgehend ungenutztes Potenzial besteht in den systemeigenen Ökotechnologien der Gewässer. Die Gewässer leisten der Gesellschaft wertvolle Dienste: Dies betrifft den Wasserrückhalt, die Selbstreinigung und Stoffregulation, Nahrungsproduktion, Lebensraumfunktion und Förderung der Biodiversität, die positiven Effekte auf Mikro- und Regionalklima, die Wasserstraßen sowie Freizeit- und Erholungsfunktionen. Zukünftig wird es mehr Sommertage und weniger Frosttage geben. Die Wärmeinsel Berlin wird dies besonders zu spüren bekommen, da die Zunahme der heißen Tage ein erhöhtes Gesundheitsrisiko bedeutet. Für das Stadtklima sollten daher positive klimatische Einflüsse des Gewässernetzes um Berlin weiter genutzt werden. Allgemein gilt es, unter den Rahmenbedingungen des Umweltwandels die gegenwärtigen Schutz- und Nutzungskonzepte der Gewässer und Feuchtgebiete kritisch zu überprüfen und räumlich optimierte, multifunktionelle Leistungen anzustreben.

Literatur

- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S. & Palutikof, J. P. (Hrsg.) (2008): Climate Change and Water. IPCC Technical Paper VI, WG II. Geneva.
- Behrendt, A., Schalitz, G., Müller, L., Mindel, G. & Hölzel, D. (Hrsg.) (2001): Untersuchungen zur Niedermoorrenaturierung in Grundwasserlysimetern. 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, 24. und 25. April 2001. Irdning: Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein.

- Bernhardt, J. (2009): Ice covers Brandenburg lakes – Past and Future. Diploma thesis. Freiberg: Technical University Bergakademie Freiberg.
- Beyrich, F. (Hrsg.) (2004): Verdunstung über einer heterogenen Landoberfläche – Das LIT-FASS-2003 Experiment. Arbeitsergebnisse Nr. 79. Offenbach: Deutscher Wetterdienst.
- Blackbourn, D. (2007): *The Conquest of Nature: Water, Landscape, and the Making of Modern Germany*. New York: W.W. Norton & Co.
- Böhm, U., Kücken, M., Ahrens, W., Block, A., Hauffe, D., Keuler, K., Rockel, B. & Will, A. (2006): CLM – the climate version of LM: Brief description and long-term applications. COSMO Newsletter 6, 225–235.
- Bolte, A., Wolff, B. & Anders, S. (2001): Tiefensickerung in Abhängigkeit von realer und natürlicher Waldbedeckung – eine bundesweite Modellstudie. Funktionen des Waldes und Aufgaben der Forstwirtschaft in Verbindung mit dem Landschaftswasserhaushalt. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 15, 77–86.
- Briffa, K., Osborn, T. & Schweingruber, F. H. (2004): Large scale temperature inferences from tree rings – a review. *Global and Planetary Change* 40, 11–26.
- Dannowski, R. & Balla, D. (2004): Wasserhaushalt und geohydrologische Situation einer vernässen Niedermoorfläche mit Schilfanbau in Nordost-Brandenburg. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung* 43 (2), 27–40.
- Dannowski, R. & Steidl, J. (2000): Modellierung des Gebietswasserhaushaltes mit dem Modell ABIMO. In: LUA (Hrsg.), *Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg. Studien und Tagungsberichte, Bd. 27*. Potsdam: Landesumweltamt Brandenburg (LUA).
- Déqué, M. (2009): Temperature and precipitation probability density functions in ENSEMBLES regional scenarios. ENSEMBLES Technical Report Nr. 5. Exeter: ENSEMBLES project.
- Dietrich, O., Kaltofen, M., Koch, H. & Schweigert, S. (2007): Wassermanagementoptionen für den Erhalt von Feuchtgebieten unter den Bedingungen des globalen Wandels – Beispiel Spreewald. In: K. Miegel, E. R. Trübger & H. B. Kleeberg (Hrsg.), *Einfluss von Bewirtschaftung und Klima auf Wasser- und Stoffhaushalt von Gewässern*. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Vol. 20. 7, 197–209.
- Driescher, E. (1974): *Veränderungen an Gewässern in historischer Zeit – Eine Untersuchung in Teilgebieten der Bezirke Potsdam, Frankfurt und Neubrandenburg*. Dissertation. Berlin: Humboldt-Universität zu Berlin.
- Driescher, E. (2003): *Veränderungen an Gewässern Brandenburgs in historischer Zeit. Studien und Tagungsberichte 47*. Potsdam: Landesumweltamt Brandenburg (LUA).
- Dyck, S., Grünewald, U. & Peschke, G. (1991): Hydrologische Aspekte bei der Sicherung der Mehrfachnutzung von Gewässereinzugsgebieten. *Wasserwirtschaft* 81 (6), 276–281.
- Falge, E., Reth, S., Brüggemann, N., Butterbach-Bahl, K., Goldberg, V., Oltchev, A., Schaaf, S., Spindler, G., Stiller, B., Queck, R., Köstner, B. & Bernhofer, C. (2005): Comparison of surface energy exchange models with eddy flux data in forest and grassland ecosystems of Germany. *Ecological Modelling* 188 (2–4), 174–216.
- Fohrer, N., Haverkamp, S., Eckhardt, K. & Frede, H. G. (2001): Hydrologic response to land use changes on the catchment scale. *Physics and Chemistry of the Earth Part B* 26 (7–8), 577–582.
- Freude, M. (2007): Klimaveränderungen und demografischer Wandel in ihren Auswirkungen auf die Wasserhaushaltssituation in Brandenburg und Berlin. In: M. Barsig, F. Becker, W. Ender, G. Prystav & J. Rubelt (Hrsg.), *Probleme einer nachhaltigen Wasserwirtschaft in Berlin und Brandenburg. Verschwendung, Versteppung und Verschmutzung?* Berlin: Verlag für Wissenschaft und Forschung (VWF), 10–29.
- Freund, M. (2010): *Klima-Wachstumsanalyse mittels Jahrringbreiten von Kiefern aus dem Tegeler Forst*. BSc-Arbeit. Berlin: Meteorologisches Institut der Freien Universität Berlin.
- Germer, S., Kaiser, K., Bens, O. & Hüttl, R. F. (2011): Water balance changes and responses of ecosystems and society in the Berlin-Brandenburg region/Germany – a review. *Die Erde* 142 (1/2), im Druck.

- Gerstengarbe, F.-W., Badeck, F., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Lahmer, W., Lasch, P., Stock, M., Suckow, F., Wechsung, F. & Werner, P. C. (2003a): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK-Report 83. Potsdam: Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK).
- Gerstengarbe, F.-W., Badeck, F., Hattermann, V., Krysanova, W., Lahmer, P., Lasch, M., Stock, F., Wechsung, F. & Werner, P. C. (2003b): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. Potsdam, Germany, PIK Report 83.
- Gifford, R. M. (Hrsg.) (2005): Pan Evaporation: An Example of the Detection and Attribution of Trends in Climate Variables. Canberra: Australian Academy of Science. National committee for earth system science.
- Graupner, B., Koch, C., Werner, F. & Benthous, F.-C. (2007): Großräumige Sulfatfreisetzung durch sekundäre Pyritoxidation im Lausitzer Bergbaurevier. In: B. J. Merkel, H. Schaeben, A. Hasche-Berger & C. Wolkersdorfer (Hrsg.), Berg- und Hüttenmännischer Tag 2007, Kolloquium: Behandlungstechnologien für bergbaubeeinflusste Wässer. GIS – Geowissenschaftliche Anwendungen und Entwicklungen. Wissenschaftlichen Mitteilungen des Institutes für Geologie der TU Bergakademie Freiberg 35. Freiberg: TU Bergakademie Freiberg, 143–150.
- Gröschke, A., Uhlmann, W., Rolland, W. & Grünewald, U. (2002): Hydrochemische Entwicklung Lausitzer Tagebauseen während der Flutung – Beispiel Gräbendorfer See. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 46 (6), 256–267.
- Grube, A., Hermsdorf, A., Reclin, B., Schneider, W. & Wichmann, K. (2000): Prognose des Salzwasseraufstiegs im pleistozänen Grundwasserleiterkomplex eines geplanten Wasserwerks im Land Brandenburg – Grundwassermodelle und hydrogeochemische Untersuchungen. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 7, 41–52.
- Grünewald, U. (1978): Ein Beitrag zur mathematischen Modellierung von Wasserbewirtschaftungssystemen unter Berücksichtigung des Zufallscharakters der Dargebotsgrößen. Dissertation (B). Dresden: Technische Universität Dresden.
- Grünewald, U. (2001): Water resources management in river catchments influenced by lignite mining. Ecological Engineering 17 (2+3), 143–152.
- Grünewald, U. (2005): Probleme der integrierten Wasserbewirtschaftung im Spree-Havel-Gebiet im Kontext des globalen Wandels. In: F. Wechsung, A. Becker & P. Gräfe (Hrsg.), Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Bd. 6. Berlin: Weißensee-Verlag, 209–218.
- Grünewald, U. (2010): Wasserbilanzen der Region Berlin-Brandenburg. Materialien der interdisziplinären Arbeitsgruppe Globaler Wandel – Regionale Entwicklung. Diskussionspapier 7. Berlin: Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften.
- Grünewald, U. & Uhlmann, W. (2004): Zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit in den Lausitzer Tagebauseen: Ausgangspunkt, Stand und Perspektiven. Surface Mining 56 2, 115–125.
- HAD (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland (HAD). CD-ROM. Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
- Hannappel, S., Hermsdorf, A., Koseck, R., Pohl, S. & Rietz, C. (2007): Aufbau von Sondermessnetzen zur Überwachung der geogenen Grundwasserversalzung in Brandenburg. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 14 (1), 5–14
- Herbst, M. & Kappen, L. (1993): Die Rolle des Schilfs im standörtlichen Wasserhaushalt eines norddeutschen Sees. Phytocoenologia 23, 51–64.
- Hewitt, C. D. & Griggs, D. J. (2004): Ensembles-Based Predictions of Climate Changes and Their Impacts (ENSEMBLES), ENSEMBLES Technical Report Nr. 1.
- 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, A., Woldt, M. & Wunram, C. (2008): Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios, m & D Technical Report Nr. 3.

- Hupfer, P. & Chmielewski, F.-M. (2007): Der thermische Übergang von der „kleinen Eiszeit“ zur gegenwärtigen Warmzeit. *Terra Praehistorica*, Archäologische Gesellschaft in Thüringen e.V., Germany, Beiträge zur Ur- und Frühgeschichte Mitteleuropas 48, 23–29.
- IKSE (2005): Die Elbe und ihr Einzugsgebiet. Ein geographisch-hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Überblick. Magdeburg: Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE).
- Jacob, D. (2001): A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorology and Atmospheric Physics* 77, 61–73.
- Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P. & Sieck, K. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland, Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 204 41 138. *Climate Change* 11/08. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Jochheim, H., Einert, P., Ende, H.-P., Kallweit, R., Konopatzki, A., Riek, W. & Strohbach, B. (2001): Die Wasserbilanz der Level-II-Standorte Brandenburgs – Berechnungen mit dem Simulationsmodell FOREST-BGC. *Beiträge für Forstwirtschaft und Landschaftsökologie* 35 (1), 9–13.
- Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S., Sheffield, J., Goulden, M., Bonan, G., Cescatti, A., Chen, J., de Jeu, R., Dolman, A. J., Eugster, W., Gerten, D., Gianelle, D., Gobron, N., Heinke, J., Kimball, J., Law, B. E., Montagnani, L., Mu, Q., Mueller, B., Oleson, K., Papale, D., Richardson, A. D., Rouspard, O., Running, S., Tomelleri, E., Viovy, N., Weber, U., Williams, C., Woo, E., Zaehle, S. & Zhang, K. (2010): Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature* 467, 951–954.
- Kaiser, K., Günther, N., Merz, B., Bens, O. & Hüttl, R. F. (2011): Historische Veränderungen des Wasserhaushaltes und der Wassernutzung in Nordostdeutschland. In: K. Kaiser, B. Merz, O. Bens & R. F. Hüttl (Hrsg.), *Historische Perspektiven auf Wasserhaushalt und Wassernutzung in Mitteleuropa*. Cottbuser Studien zur Geschichte von Technik, Arbeit und Umwelt. Münster: Waxmann-Verlag (im Druck).
- Kirillin, G. (2010): Modeling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes. *Boreal Environment Research* 15, 279–293.
- Klimareihe (2010): http://saekular.pik-potsdam.de/klima/de/klimastart_de.html.
- Koch, H., Grünewald, U., Kaltofen, M. & Kaden, S. (2009): Anpassungsstrategien für die Wasserbewirtschaftung an den globalen Wandel im Einzugsgebiet der Spree. *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 2 (11), 600–605.
- Koch, H., Kaden, S., Kaltofen, M. & Grünewald, U. (2007): Wasserbewirtschaftung in grenzüberschreitenden Gewässern unter Bedingungen des globalen Wandels – Beispiel Elbe. In: K. Miegel, E. R. Trübger & H. B. Kleeberg (Hrsg.), *Einfluss von Bewirtschaftung und Klima auf Wasser- und Stoffhaushalt von Gewässern*. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Vol. 20.07, 211–216.
- Koch, H., Kaltofen, M., Grünewald, U., Messner, F., Karkuschke, M., Zwirner, O. & Schramm, M. (2005): Scenarios of water resources management in the Lower Lusatian mining district, Germany. *Ecological Engineering. The Journal of Ecotechnology* 24, 49–57.
- Koch, H., Kaltofen, M., Schramm, M. & Grünewald, U. (2006): Adaptation strategies to global change for water resources management in the Spree river catchment, Germany. *International Journal of River Basin Management* 4 (4), 273–281.
- Köstner, B., Bernhofer, C., Anter, J., Berg, M., Franke, J., Gömann, H., Kersebaum, K. C., Kreins, P., Kuhnert, M., Lindau, R., Manderscheid, R., Mengelkamp, H.-T., Mirschel, W., Nendel, C., Nozinski, E., Richwien, M., Pätzold, A., Simmer, C., Stonner, R., Weigel, H.-J., Wenkel, K.-O. & Wieland, R. (2009): Anpassung ländlicher Räume an regionale Klimaänderungen – die Wissensplattform LandCaRe-DSS. In: M. Mohammadzadeh, H. Biebler & H. Bardt (Hrsg.), *Klimaschutz und Anpassung an die Klimafolgen – Strategien, Maßnahmen und Anwendungsbeispiele*. Köln: Institut der Deutschen Wirtschaft, 295–301.
- Köstner, B., Bernhofer, C., Münch, T., Franke, J. & Kuhnert, M. (2010): Vorsorge und Gestaltungspotenziale in ländlichen Räumen unter regionalen Wetter- und Klimaänderungen (LandCaRe 2020) Teilprojekte 1.1–2.1, Schlussbericht, BMBF klimazwei, FKZ PT-DLR 01 LS 05104.

- Lahmer, W. & Pfützner, B. (2003): Orts- und zeitdiskrete Ermittlung der Sickerwassermenge im Land Brandenburg auf der Basis flächendeckender Wasserhaushaltsberechnungen. PIK-Report 85. Potsdam: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK).
- Landgraf, L. (2010): Wo steht der Moorschutz in Brandenburg? Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg 19, 126–131.
- Landgraf, L. & Krone, A. (2002): Wege zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes in Brandenburg. GWF Wasser Abwasser 143, 435–444.
- Langer, I., Schartner, T., Billing, H. & Cubasch, U. (2010): Vegetationsänderung in Berlin-Brandenburg. Ein Vergleich von Satellitendaten und einem regionalen Klimamodell. Materialien der interdisziplinären Arbeitsgruppe Globaler Wandel – Regionale Entwicklung. Diskussionspapier 9. Berlin: Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften.
- Leuzinger, S. & Körner, C. (2007): Water savings in mature deciduous forest trees under elevated CO₂. *Global Change Biology* 13, 2498–2508.
- Lindau, R. & Simmer, C. (2010): Vorsorge und Gestaltungspotenziale in ländlichen Räumen unter regionalen Wetter- und Klimaänderungen (LandCaRe 2020) Dynamische Regionalisierung. Teilprojekt 2.3. Schlussbericht, BMBF klimazwei, FKZ PT-DLR 01 LS 05107.
- Lischeid, G. (2010): Landschaftswasserhaushalt in der Region Berlin-Brandenburg. Materialien der interdisziplinären Arbeitsgruppe Globaler Wandel – Regionale Entwicklung. Diskussionspapier 2. Berlin: Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften.
- LMBV (2009): Angaben zu Grundwasserdefizit und Sumpfungmaßnahmen (Onlinepublikation). www.lmbv.de (01.11.2009). Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV)
- Lorenz, M., Schwärzel, K. & Wessolek, G. (2005): Auswirkungen von Klima- und Grundwasserstandsänderungen auf Bodenwasserhaushalt, Biomasseproduktion und Degradierung von Niedermooren im Spreewald. In: F. Wechsung, A. Becker & P. Gräfe (Hrsg.), Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Bd. 6. Berlin: Weißensee-Verlag, 284–293.
- Loucks, D. P. & van Beek, E. (2005): *Water Resources Planning and Management. An Introduction to Methods, Models and Applications*. Paris: UNESCO.
- LUA (1993): Wassermengenbilanzen für die Flußgebiete der Spree und Schwarzen Elster. Juli-Ausgabe. Cottbus: Landesumweltamt Brandenburg (LUA), Abteilung Gewässerschutz und Wasserwirtschaft.
- LUA (2002): Umweltdaten aus Brandenburg – Bericht 2002. Potsdam: Landesumweltamt Brandenburg (LUA).
- LUA (2007): Umweltdaten aus Brandenburg – Bericht 2007. Potsdam: Landesumweltamt Brandenburg (LUA).
- LUA (2009): Umweltdaten Brandenburg – Bericht 2008/2009. Potsdam: Landesumweltamt Brandenburg (LUA).
- Lüttger, A. (2001): Ergebnisse des Pilotvorhabens Beregnung und Vergleich alternativer Erschließungsmöglichkeiten eines neuen Standortes für die Beregnung. In: Landesamt für Verbraucherschutz und Landwirtschaft (Hrsg.), 3. Brandenburger Beregnungstag Güterfelde. 21.11.2002. Kurzfassung der Vorträge. Teltow: Landesamt für Verbraucherschutz und Landwirtschaft, 37–43.
- Mey, S. & Pfützner, B. (2008): Analyse zur Minderung von Wassermangelsituationen mit einem gekoppelten Oberflächen-Grundwassermodell. Poster. Tag der Hydrologie 2008 (Onlinepublikation). <http://www.iww.uni-hannover.de/tdh2008/Poster/Mey.pdf> (08.02.2011). Hannover: Leibniz Universität Hannover, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau.
- Müller, L., Behrendt, A., Schalitz, G. & Schindler, U. (2005): Above ground biomass and water use efficiency of crops at shallow water tables in a temperate climate. *Agricultural Water Management* 75 (2), 117–136.
- Myrcik, G. (2009): Meteorological records of the Royal Prussian Gardening School Berlin Dahlem 1908–1951 Freie Universität Berlin, Archiv des Insituts für Meteorologie. Persönliche Mitteilung.

- Nakićenović, N., Davidson, O., Davis, G., Grübler, A., Kram, T., La Rovere, E. L., Metz, B., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Sankovski, A., Shukla, P., Swart, R., R., W. & Zhou, D. (2000): Emissions Scenarios, Summary for Policymakers. Special Report der WG III des IPCC. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Natkhin, M. (2010): Modellgestützte Analyse der Einflüsse von Veränderungen der Waldwirtschaft und des Klimas auf den Wasserhaushalt grundwasserabhängiger Landschaftselemente. Dissertation. Potsdam: Universität Potsdam.
- NHB (2009): Brandenburg auf dem Weg zur Modellregion für Nachhaltige Entwicklung. Endbericht 2009. Potsdam: Beirat für Nachhaltige Entwicklung und Ressourcenschutz des Landes Brandenburg (NHB).
- Nixdorf, B., Rucker, J., Deneke, R. & Grüneberg, B. (2009): Gewässer im Klimastress? Eutrophierungsgefahr in Seen am Beispiel der Scharmützelseeregion. *Forum der Forschung* 22, 99–106.
- NKGCF (2005): Positionspapier für eine kohärente deutsche Forschungsstrategie (Onlinepublikation). http://www.nkgcf.org/files/service/GC-Forschungsstrategie_Positionspapier_2005.pdf (04.02.2011). München: Nationales Komitee für Global Change Forschung (NKGCF).
- Orlowsky, B., Gerstengarbe, F. W. & Werner, P. C. (2008): A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theoretical and Applied Climatology* 92, 209–223.
- Pelz, J. (1997): Die Berliner Jahresmitteltemperaturen von 1701 bis 1936. Beilage zur Berliner Wetterkarte e.V. 20.
- Pelz, J. (2000): Prüfung der Jahresmitteltemperaturen in Berlin für die Jahre 1780 bis 1835. Beiträge des Instituts für Meteorologie der Freien Universität Berlin zur Berliner Wetterkarte e.V. SO 9.
- Pelz, J. (2007): Einhundert Jahre Wetteraufzeichnungen in (Berlin-) Dahlem. Beiträge des Instituts für Meteorologie der Freien Universität Berlin zur Berliner Wetterkarte e.V. SO 13.
- Petrow, T. & Merz, B. (2009): Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951–2002. *Journal of Hydrology* 371, 129–141.
- Pollack, P. (1991): Entwicklung und Stand des Meliorationswesens in den fünf neuen Bundesländern – Ausblick in die Zukunft des Meliorationswesens. Bonn: Landwirtschaftsverlag.
- Pusch, M. & Hoffmann, A. (2000): Conservation concept for a river ecosystem (River Spree, Germany) impacted by flow abstraction in a large post-mining area. *Landscape and Urban Planning* 51, 165–176.
- Rockel, B., Will, A. & Hense, A. (2008): Regional climate modelling with COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift* 17 (4), 347–348.
- Röckner, E., Brasseur, G. P., Giorgetta, M., Jacob, D., Jungclaus, J., Reick, C. & Sillmann, J. (2006): Climate Predictions for the 21st Century. Hamburg: Max-Planck-Institut für Meteorologie.
- Roderick, M. L., Hobbins, M. T. & Farquhar, G. D. (2009): Pan evaporation trends and the terrestrial water balance. II. Energy balance and interpretation. *Geography Compass* 3 (2), 761–780.
- Schäfer, A. (2005): Umweltverträgliche Erlenwirtschaft auf wieder vernässten Niedermoorstandorten. *Beiträge zu Forstwirtschaft und Landschaftsökologie* 39 (4), 165–171.
- Schindler, U., Müller, L., Eulenstein, F. & Dannowski, R. (2008): A long-term hydrological soil study on the effects of soil land use on deep seepage dynamics in northeast Germany. *Archives of Agronomy and Soil Science* 54 (5), 451–463.
- Schleyer, C. (2002): Economic and ecological transformation processes in East German water management regimes: The role of property rights and governance structures. CEESA Discussion Paper 9, 22.
- Schlünzen, K. H., Hoffmann, P., Rosenhagen, G. & Riecke, W. (2009): Long-term changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg. *International Journal of Climatology* 30 (8), 1121–1136.
- Schönfelder, I. (1997): Eine Phosphor-Diatomeen-Relation für alkalische Seen und Flüsse Brandenburgs und ihre Anwendung für die paläolimnologische Analyse von Auensedimenten der unteren Havel. *Dissertationes botanicæ* 283. Berlin: J. Cramer.
- Schönwiese, C.-D. (2006): *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Berlin, Stuttgart: Borntraeger.

- Schwärzel, K., Häntzschel, J., Grünwald, T., Köstner, B., Bernhofer, C. & Feger, K. H. (2007): Fundamentals of the spatially distributed simulation of the water balance of forest sites in a low-range mountain area. *Advances in Geosciences* 11, 43–47.
- Shatwell, T., Köhler, J. & Nicklisch, A. (2008): Warming promotes cold-adapted phytoplankton in temperate lakes and opens a loophole for Oscillatoriales in spring. *Global Change Biology* 14 (9), 2194–2200.
- Simon, M. (2009): Die landwirtschaftliche Bewässerung in Ostdeutschland seit 1949. Eine historische Analyse vor dem Hintergrund des Klimawandels. PIK-Report 114. Potsdam: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK).
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. (Hrsg.) (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*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Sonntag, H. (2007): Problem Sulfat in der Spree – Stand der Diskussion und aktuelle Trends. In: B. J. Merkel, H. Schaeben, A. Hasche-Berger & C. Wolkersdorfer (Hrsg.), *Berg- und Hüttenmännischer Tag 2007, Kolloquium: Behandlungstechnologien für bergbaubeeinflusste Wässer / GIS – Geowissenschaftliche Anwendungen und Entwicklungen*. Wissenschaftlichen Mitteilungen des Institutes für Geologie der TU Bergakademie Freiberg 35. Freiberg: Institut für Geologie der TU Bergakademie Freiberg, 151–156.
- Spekat, A., Enke, W. & Kreienkamp, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios 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. Endbericht zum FuE-Vorhaben FZ: 20441138 des Umweltbundesamtes. Dessau: Umweltbundesamt (UBA).
- Statistisches Bundesamt (2009): *Statistisches Jahrbuch 2009 für die Bundesrepublik Deutschland*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Suckow, F., Lasch, P. & Badeck, F.-W. (2002): Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Grundwasserneubildung. *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe* 15, 36–44.
- Sukopp, H., Sukopp, S., Brande, A., Krauß, M. & Mollenhauer, D. (2010): Der Tegeler See. Botanisch-historische Exkursion am 13. September 2009. *Verhandlungen des Botanischen Vereins von Berlin und Brandenburg* (143), 303–325.
- Tanneberger, F., Tegetmeyer, C., Dylawski, M., Flade, M. & Joosten, H. (2008): Commercially cut reed as a new and sustainable habitat for the globally threatened Aquatic Warbler. *Biodiversity and Conservation* 18 (6), 1475–1489.
- Wantzen, K. M., Junk, W. J. & Rothhaupt, K.-O. (2008): An extension of the floodpulse concept (FPC) for lakes. *Hydrobiologia* 613 (1), 151–170.
- Wattenbach, M., Zebisch, M., Hattermann, F., Gottschalk, P., Goemann, H., Kreins, P., Badeck, F., Lasch, P., Suckow, F. & Wechsung, F. (2007): Hydrological impact assessment of afforestation and change in tree-species composition – A regional case study for the Federal State of Brandenburg (Germany). *Journal of Hydrology* 346 (1–2), 1–17.
- Wechsung, F. (2005): Herausforderungen des globalen Wandels für die Elbe-Region. In: F. Wechsung, A. Becker & P. Gräfe (Hrsg.), *Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft*, Bd. 6. Berlin: Weißensee Verlag, 3–57.
- Wechsung, F., Lüttger, A. & Hattermann, F. F. (2008): Projektionen zur klimabedingten Änderung der Erträge von einjährigen Sommer- und Winterkulturen des Ackerlandes am Beispiel von Silomais und Winterweizen. In: F. Wechsung, F.-W. Gerstengarbe, P. Lasch & A. Lüttger (Hrsg.), *Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel*. PIK-Report 112. Potsdam: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), 18–32.
- Wichtmann, W. & Schäfer, A. (2007): Alternative management options for degraded fens – Utilisation of biomass from rewetted peatlands. In: T. Okruszko, E. Maltby & J. Szatylowicz (Hrsg.), *Wetlands: Monitoring, Modeling and Management. Proceedings of the International Conference W3M*. London: Taylor & Francis Group, 273–280.

- Wiedner, C., Rücker, J. & Weigert, B. (Hrsg.) (2008): *Cylindrospermopsis raciborskii* und *Cylindrospermopsis* in Gewässern der Berliner Region. Berlin: Schriftenreihe Kompetenzzentrum Wasser Berlin.
- Wilhelm, S. & Adrian, R. (2008): Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrient and phytoplankton. *Freshwater Biology* 53, 226–237.
- Winker, M. (2010): Pharmazeutische Wirkstoffe in der aquatischen Umwelt. Kap. V-4.1.2. In: M. Hupfer, W. Calmano, H. Klapper & R. D. Wilken (Hrsg.), *Handbuch Angewandte Limnologie*. Weinheim: Wiley-VCH.

Ulrich Cubasch (✉)
Freie Universität Berlin
cubasch@zedat.fu-berlin.de

Sonja Germer (✉)
Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
germer@bbaw.de

Uwe Grünewald (✉)
Brandenburgische Technische Universität Cottbus
gruenew@tu-cottbus.de

Michael Hupfer (✉)
Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)
hupfer@igb-berlin.de

Barbara Köstner (✉)
Technische Universität Dresden
koestner@forst.tu-dresden.de

Gunnar Lischeid (✉)
Institut für Landschaftswasserhaushalt am Leibniz-Zentrum für Agrarlandforschung (ZALF) e.V.,
Müncheberg
lischeid@zalf.de

Eberhard Schaller (✉)
Brandenburgische Technische Universität Cottbus
schaller@tu-cottbus.de

Jost Heintzenberg
Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V., Leipzig

Christopher Kadow
Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)

Matthias Kuhnert
University of Aberdeen, Scotland

Brigitte Nixdorf
Brandenburgische Technische Universität Cottbus

Herbert Sukopp
Technische Universität Berlin

Klement Tockner
Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)