

Gunnar Lischeid

Landschaftswasserhaushalt in der Region
Berlin-Brandenburg

DISKUSSIONSPAPIER 2
01/2010

Landschaftswasserhaushalt in der Region Berlin- Brandenburg

Gunnar Lischeid

Gunnar Lischeid

Landschaftswasserhaushalt in der Region Berlin-Brandenburg

Diskussionspapier 2

01/2010

Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften

Interdisziplinäre Arbeitsgruppe *Globaler Wandel – Regionale Entwicklung*

Jägerstr. 22/23 | 10117 Berlin

Tel.: +49 (0)30 20370-281

Fax: +49 (0)30 20370-214

<http://globalerwandel.bbaw.de>

© 2010 Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in fremde Sprachen, sind vorbehalten.

Satzvorlage: work:at:BOOK / Martin Eberhardt, Berlin

Printed in Germany

Inhalt

| | |
|--|-----------|
| Inhalt | 3 |
| Abbildungsverzeichnis | 5 |
| Tabellenverzeichnis | 7 |
| 1 Einleitung | 9 |
| 2 Naturräumliche Gegebenheiten in Brandenburg und Berlin | 11 |
| 2.1 Landschaft und Landnutzung..... | 11 |
| 2.2 Klima und Hydrologie | 13 |
| 3 Historische Entwicklung | 17 |
| 3.1 Natürliche postglaziale Entwicklung | 17 |
| 3.2 Anthropogene Faktoren | 21 |
| 4 Aktuelle anthropogene Einflüsse..... | 25 |
| 4.1 Wasserbau | 25 |
| 4.2 Landnutzung | 25 |
| 4.2.1 Landwirtschaft: Das Konzept des virtuellen Wassers..... | 30 |
| 4.2.2 Anwendbarkeit des Konzeptes auf die Region Brandenburg-Berlin..... | 34 |
| 4.2.3 Landwirtschaftliche Bewässerung in Brandenburg..... | 35 |
| 4.3 Öffentliche Wasserversorgung..... | 37 |
| 4.4 Bergbau | 39 |
| 5 Prognosen..... | 43 |
| 5.1 Modellierung und Skalentransfer..... | 43 |
| 5.2 Szenarien | 44 |
| 6 Anpassungsmaßnahmen..... | 49 |
| 7 Zusammenfassung und Ausblick..... | 51 |
| Literatur | 53 |
| Autorenhinweis..... | 61 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Landnutzung im Land Brandenburg im Jahr 2004. Angaben entnommen aus Deggau (2006) | 13 |
| Abbildung 2: Verteilung der Grundwasserflurabstände in der Region Brandenburg und Berlin. Daten: Lahmer und Pfützner (2003)..... | 15 |
| Abbildung 3: Mit unterschiedlichen Methoden rekonstruierter Verlauf der Lufttemperatur in der nördlichen Hemisphäre seit 700 n. Chr. (aus: Solomon et al. 2007) | 18 |
| Abbildung 4: Rekonstruierter Wasserstand der Müritz. Gestrichelte Linie: Seespiegelhöhe zum Zeitpunkt der Untersuchungen. Daten: Kaiser (1996, 1998) | 19 |
| Abbildung 5: Globale Mittelwerte der Höhe des Meeresspiegels seit 1870 in Relation zum Mittelwert 1961–1990. Rot: rekonstruierte Werte; blau: Gezeitenmessungen ab 1950; schwarz: Satelliten-gestützte Messungen. Fehlerbalken geben das 90 %-Konfidenzintervall an (aus: Solomon et al. 2007)..... | 21 |
| Abbildung 6: Rekonstruktion des von Wald bedeckten Flächenanteils in Deutschland. Daten: Bork et al. (1998) | 22 |
| Abbildung 7: Niederschlag und Sickerwasserspende unterschiedlich genutzter Standorte für unterschiedlich feuchte Jahre. Daten: Eulenstein und Drechsler (1992)..... | 27 |
| Abbildung 8: Simulierte mittlere Grundwasserneubildungsraten für verschiedene Landnutzungstypen und Bodenarten im Bereich der Schorfheide für die Jahre 1952–2007. Daten: Natkhin (2010) | 28 |
| Abbildung 9: Evapotranspiration und Tiefenversickerung verschiedener Waldbestände am gleichen Standort mit einem Jahresniederschlag von 620 mm/a. Angegeben ist das jeweilige Alter der Kiefern (Ki) und Buchen (Bu). Daten: Müller (2002) | 29 |
| Abbildung 10: Angabe des Transpirationswasserverbrauches verschiedener Kulturarten in Deutschland nach Angabe von Chapagain und Hoekstra (2004) bzw. Hoekstra und Hung (2002) | 32 |
| Abbildung 11: Wasserverbrauch nicht bewässerter Kulturen pro kg Getreide (Mittelwerte und Spannweiten; nach Rockström 2003). Angaben für Reis und Mais für tropische Gebiete, ansonsten für die mittleren Breiten. Datenquellen: (1) Rockström et al. 1999; (2): Doorenboos und Kassam (1986) | 33 |
| Abbildung 12: Prognostizierte Entwicklung der globalen Mitteltemperatur in Relation zum Mittelwert 1980–1990 für verschiedene Emissionsszenarien. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Werte verschiedener Modelle, die Zahlen geben die Anzahl der Modelle für die verschiedenen Szenarien und Perioden an. Quelle: Solomon (2007) | 45 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Langjährige Mittelwerte hydrologischer Kenngrößen [mm/a] der Region Brandenburg-Berlin..... | 14 |
| Tabelle 2: Simulierte Abflusshöhen für verschiedene Landnutzungstypen in Brandenburg und Berlin unter aktuellen klimatischen Verhältnissen. Daten: Dannowski und Steidl (2000) | 27 |
| Tabelle 3: Großräumige Bewässerungsgebiete der DDR im Gebiet des heutigen Brandenburgs (nach Simon 2009) | 36 |
| Tabelle 4: Daten zur Öffentlichen Wasserversorgung in Brandenburg und Berlin im Jahr 2007. Quellen: Statistisches Bundesamt (2009), (1): MGUV (2009), sowie eigene Berechnungen..... | 37 |

1 Einleitung

Wasser ist essentiell für jedes Leben auf dem Planeten Erde. Somit stellt es das wichtigste Lebensmittel für den Menschen dar. Gleichzeitig ist es Produktionsmittel für die land- und forstwirtschaftliche Produktion, die den weitaus größten Teil der Fläche Brandenburgs einnimmt. Wasser wird aber auch als Produktionsmittel in der Industrie, als Kühl- und Reinigungsmittel benötigt. Der Gütertransport auf den Wasserstraßen Berlins und Brandenburgs spielt nach wie vor eine wichtige Rolle. In der breiten Öffentlichkeit stellen zudem die Oberflächengewässer in der Region Berlin-Brandenburg wichtige Areale für Erholung und Tourismus dar. Oberflächengewässer und Feuchtgebiete werden außerdem zunehmend als wertvolle Habitats und Orte hoher Biodiversität angesehen. Schließlich werden im Süden Brandenburgs riesige Wassermengen benötigt, um den durch den Abbau der Braunkohle entstandenen Massenverlust in den Tagebauen zu kompensieren.

Wasser wird in der Region zunehmend als knappes Gut erfahren. Sinkende Seewasserspiegel bis hin zu gänzlich trocken fallenden Seen und Feuchtgebiete, wie sie in den letzten Jahrzehnten vielerorts in der Region zu beobachten waren, verdeutlichen einen grundlegenden Wandel. In der Presse und in der breiten Öffentlichkeit wird dafür der anthropogen bedingte Klimawandel genauso wie eine Reihe weiterer anthropogener Faktoren verantwortlich gemacht, wie überhöhte Grundwasserentnahmen, die Entwässerung von Feuchtgebieten oder lokale Besonderheiten wie die Verletzung der Gewässersohle durch Sprengung von Fliegerbomben aus dem Zweiten Weltkrieg. Auch in Politik und Verwaltung wird zunehmend die Notwendigkeit gesehen, Managementoptionen für den aktuell beobachteten und den zukünftig zu erwartenden Wandel zu entwickeln. Zur Einschätzung der gegenwärtigen Lage, der historischen Entwicklung und den zukünftig zu erwartenden Änderungen liegen inzwischen viele wissenschaftliche Untersuchungen vor.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen gebündelten Überblick über viele dieser Studien zu geben. Anspruch auf Vollständigkeit kann dabei nicht erhoben werden. Allerdings basiert dieser Überblick nicht nur auf der Meinung eines Einzelnen, sondern profitiert von dem Erfahrungsaustausch mit vielen Experten unterschiedlicher Disziplinen aus der Region. An dieser Stelle sei insbesondere den Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Landschaftswasserhaushalt des Leibniz-Instituts für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) in Müncheberg sowie vom Institut für Geoökologie der Universität Potsdam gedankt.

Ziel dieser Expertise ist es, zunächst einen Überblick über die Situation und Einflussfaktoren des Landschaftswasserhaushalts in Berlin und Brandenburg zu geben. Dabei wird auch auf die historische Entwicklung eingegangen, ohne die ein Verständnis der heutigen Situation nur eingeschränkt möglich wäre. Das Wechselspiel zwischen klimatischen Änderungen und anthropogener Einflussnahme prägt den Landschaftswasserhaushalt der Region seit Jahrhunderten. Schließlich werden die erwarteten Änderungen für die nächsten Jahrzehnte dargestellt und Anpassungsoptionen diskutiert. Dabei wird auch der Unsicherheit der Szenarienrechnungen Rechnung getragen.

2 Naturräumliche Gegebenheiten in Brandenburg und Berlin

Die Region Brandenburg und Berlin ist im Vergleich der deutschen Bundesländer in besonderer Weise von einer kritischen und vermutlich zunehmend stärker angespannten Situation des Wasserhaushaltes betroffen. Dies ist bedingt durch das Zusammenspiel aus naturräumlicher Ausstattung, Klima und anthropogener Nutzung. Die gerne zitierte Charakterisierung der Region als „gewässerreich, aber wasserarm“ trifft bereits einen wichtigen Punkt. Trotzdem lohnt es sich, die einzelnen Aspekte im Detail zu beleuchten.

Hinsichtlich der naturräumlichen Ausstattung unterscheidet Berlin sich nicht von dem umgebenden Brandenburg. Natürlich ergeben sich gravierende Unterschiede durch die hohe Bevölkerungsdichte und die hohe Urbanisierung in Berlin. Die sich daraus ergebenden Konsequenzen für den Landschaftswasserhaushalt werden jedoch erst in den späteren Kapiteln thematisiert.

2.1 Landschaft und Landnutzung

Aus geologischer Sicht gehören Berlin und Brandenburg mit Ausnahme des äußeren Südens Brandenburgs zum Norddeutsch-Polnischen Becken. Dieser Teil Europas ist seit Ende des Paläozoikums von starken, fast kontinuierlichen Senkungen geprägt, in die wiederholt und über lange Zeiträume das Meer eindrang und inzwischen mehrere Kilometer mächtige marine Sedimente abgelagert hat. Dazu gehören vor allem Ton-, Sand- und Kalksteine. Die Senkungen waren und sind im nördlichen Landesteil am stärksten ausgeprägt. Entsprechend sind die Ablagerungen hier am mächtigsten (Lippstreu et al. 1997, Stackebrandt und Manhenke 2002). Mit Ausnahme einzelner lokal oberflächennah anstehender älterer Sedimente werden die obersten, in der Regel mehrere 100 m mächtigen Schichten von Ablagerungen des Tertiär und Quartär gebildet (LBGR 1997). Als Ausnahmen sind für Mittelbrandenburg die durch aufsteigende Salzdome oberflächennah anstehenden triassischen Sedimente in Rüdersdorf und die Giphshutgesteine des Zechsteins in Sperenberg zu nennen (LBGR 1997).

Für die Grundwasserwirtschaft Brandenburgs spielen die marinen Ablagerungen während des Oligozäns (34–23 Mio. Jahre vor heute) eine wichtige Rolle. Der in der Regel mehrere 10 m mächtige Rupel- oder Septarienton des Unteren Oligozäns trennt die oberen Grundwasserleiter von den unterlagernden salinaren Wässern. Dort, wo in Störungszonen die Wegsamkeit des Rupeltons erhöht ist oder der Rupelton z. B. in tief einschneidenden pleistozänen Rinnen ausgeräumt wurde, kommt es zum Aufstieg dieser sehr stark versalzten Wässer (LBGR 1997, Hannemann und Schirrmeister 1998, Kaboth et al. 2008). Erreichen die Wässer die Geländeoberfläche, bildet sich eine typische halophile Vegetation aus. Als Beispiel seien hier nur die Salzwiesen in der Nähe von Storkow genannt. Ähnliche, meist auf relativ kleine Flächen beschränkte Salzwasseraustritte sind in Brandenburg weit verbreitet. Modellrechnungen zeigten, dass die Salzwasseraufstiege räumlich oft eng begrenzt sind und keinem stabilen Muster folgen (Magri et al. 2005). Für die Trinkwasserversorgung stellt dies z. B. im Raum Potsdam ein Problem dar, dem durch ein angepasstes Pumpregime, teilweise auch durch Stilllegung betroffener Brunnen begegnet werden muss. Vereinzelt wurde auch die Exfiltration salinärer Tiefenwässer in Seen nachgewiesen (Kaboth et al. 2008).

Während des auf das Oligozän folgenden Miozäns (23–5 Mio. Jahre vor heute) sank der Meeresspiegel. In den küstennahen Gewässern wurden verstärkt sandige Sedimente abgelagert. Außerdem bildeten sich in den verbreiteten Küstenmooren ausgedehnte Braunkohlen-Lagerstätten. Sie sind in

ganz Brandenburg anzutreffen, sind allerdings im Norden relativ geringmächtig und stehen dort auch nur in größerer Tiefe an (Lippstreu et al. 1997, Stackebrandt und Manhenke 2002).

Die heutige Landschaftsstruktur wurde entscheidend im Pleistozän des Quartärs geprägt. Die wiederholten Eisvorstöße aus dem Nordosten haben jeweils charakteristische Spuren in der Landschaft hinterlassen. Gleichzeitig führten die Ab- und Umlagerungen von Sedimenten der glazialen Serie zu einer sehr heterogenen Struktur der Sedimente mit kurzen Korrelationslängen, die eine Modellierung hydrologischer und hydrochemischer Prozesse des Untergrunds stark erschweren.

Das Gebiet des heutigen Brandenburgs wurde zuletzt während der Saalekaltzeit (300.000–128.000 Jahre vor heute) vollständig vom Eis bedeckt. Davon zeugt heute noch das Lausitzer oder Breslau-Magdeburger Urstromtal entlang der südlichen Landesgrenze, in dem heute das Flussbett der Schwarzen Elster zwischen Hoyerswerda, Elsterwerda und Wittenberg an der Elbe verläuft. Die nördlich davon verlaufenden, höher gelegenen Gebiete des von Nordwesten nach Südwesten ausgerichteten Südlichen Landrückens (Fläming und Niederlausitz) werden von Sedimenten der ehemaligen Endmoränen, heute auch Altmoränen genannt, aufgebaut.

Daran schließt sich in nordöstlicher Richtung das Glogau-Baruther Urstromtal an, das während und nach dem Brandenburger Stadium der Weichselkaltzeit (117.000–11.560 Jahre vor heute) die Schmelzwasserströme in Richtung der heutigen Nordsee ableitete. Es verläuft entlang der Linie Cottbus, Baruth, Luckenwalde bis Tangermünde im Nordwesten. Es wird im Nordosten von den Geschiebemergeln der Endmoräne der Brandenburger Staffel flankiert, die heute als „Platten“ das Urstromtal überragen. Zum Brandenburger Stadium wird auch die Frankfurter Staffel nordöstlich von Berlin gezählt.

Der folgende Eisvorstoß des Pommerschen Stadiums gelangte nicht mehr so weit nach Süden. Die Pommersche Eisrandlage mit der Barnimer und Lebuser Platte verläuft nordöstlich des Warschau-Berliner Urstromtals, das sich von Eisenhüttenstadt über Fürstenwalde, Berlin, Friesack und Havelberg bis zum heutigen Flusstal der Elbe erstreckt. Bei Friesack vereinigt es sich mit dem Thorn-Eberswalder Urstromtal, das von dort in östlicher Richtung über Eberswalde zum Oderbruch verläuft und dort nach Südosten nach Küstrin abbiegt. Es entwässerte die nördlich davon gelegene Pommersche Eisrandlage, von der heute die Endmoränen der Platten des Nördlichen Landrückens zeugen.

Die Urstromtäler bilden heute die ausgedehnten Niederungen in Berlin und Brandenburg mit mächtigen, gut wasserdurchlässigen sandigen Ablagerungen. Aus den darin enthaltenden großen Toteiskörpern entstanden später große Moore und Seen, wie z. B. der Müggelsee und der Tegeler See. Von den Urstromtälern sind die Glazialen Rinnen zu unterscheiden, die überwiegend von Nordosten nach Südwesten verlaufen und als Tunneltäler unter dem Eis angelegt wurden. Sie sind heute als langgestreckte, relativ schmale Seenketten in der Landschaft zu erkennen. In den Urstromtälern und Niederungen überwiegen geringe Grundwasserflurabstände, in denen sich z. T. ausgedehnte Niedermoore der sogenannten „Luche“ bildeten. Dazu trugen auch neotektonische Senkungen bei.

Vor ca. 14.700 Jahren hatte sich das Eis vollständig aus Nordostdeutschland zurückgezogen, und die Bodenbildung aus den abgelagerten Sedimenten der Glazialen Serie nahm ihren Lauf. Aus den Geschiebemergeln der Grund- und Endmoränen entwickelten sich überwiegend lehmige Mittelsande. Aus den Ablagerungen der Urstromtäler, den Schmelzwassersanden, den Endmoränen vorgelagerten Sandern und den Binnendünen entwickelten sich leichte Böden mit geringer Wasserhaltekapazität (Riek und Stähr 2004). Generell überwiegen in Brandenburg eher die leichten Böden.

Die Ab- und Umlagerungen der Sedimente während des Pleistozäns führten zur Ausbildung einer kleinskalig kuppigen, unruhigen Topographie. Andererseits war die Reliefenergie auf größerer Skala gering: Die höchsten Erhebungen Brandenburgs an der südlichen Landesgrenze liegen knapp über 200 m über dem Meeresspiegel. Große Teile des Landes liegen unterhalb von 100 m (LBGR 1997). Demgegenüber beträgt der Wasserstand der Oder im Unterwasser der Schleuse Hohensaaten am Ausgang

des Oderbruchs ca. 1 m über dem Meeresspiegel. Der mittlere Gradient von hier bis zur Ostsee liegt bei 0,001%. Entsprechend konnten sich auf kleiner Skala noch keine sehr effizienten Entwässerungssysteme ausbilden, so dass abflusslose Senken und Binneneinzugsgebiete ohne oberirdische Abflüsse verbreitet sind. Als typische Erscheinung der pleistozänen Landschaften sind die Sölle zu nennen: Dabei handelt es sich um kleine (< 1 ha), meist annähernd kreisrunde Kleingewässer ohne (perennierenden) oberirdischen Zu- oder Abfluss. Ihre Gesamtzahl wird für Brandenburg mit ca. 80.000 angegeben (Dreger 2001), wobei teilweise bis über 40 Sölle pro ha gezählt werden. Insgesamt machen Sölle zwar nur 2,85 % der Landesfläche in Brandenburg und im benachbarten Mecklenburg-Vorpommern aus (Kalettka 1996). Dennoch spielen sie eine wichtige Rolle für die Biodiversität wie auch als Nährstoff- und Schadstoffsenke in einer landwirtschaftlich intensiv genutzten Landschaft. Nach neueren Untersuchungen ist zudem die Kohlenstoff-Sequestrierung von Kleingewässern mit hoher Biomasse-Produktion an den Uferstreifen bisher massiv unterschätzt worden (Downing et al. 2008, Cole et al. 2007).

Etwa die Hälfte der Landesfläche Brandenburgs wird heute landwirtschaftlich genutzt, weitere 35 % sind von Wald bestanden, und 3,4 % entfallen auf offene Wasserflächen (Abb. 1). Die restlichen 13 % der Landesfläche sind bebaut. Im Vergleich dazu entfallen in Berlin fast 70 % alleine auf Siedlungs- und Verkehrsflächen (Deggau 2006).

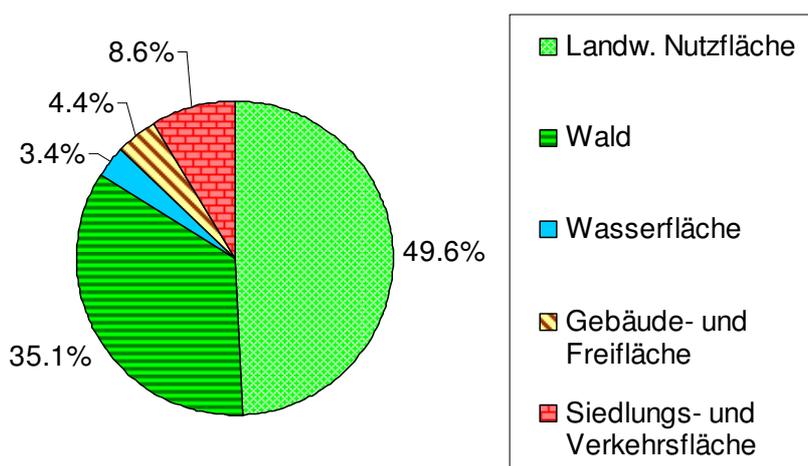


Abbildung 1: Landnutzung im Land Brandenburg im Jahr 2004. Angaben entnommen aus Deggau (2006)

2.2 Klima und Hydrologie

Im Vergleich der deutschen Bundesländer weist die Region Brandenburg und Berlin mit ca. 600 mm/a sehr niedrige Niederschläge (Tab. 1) auf. Höhere Niederschläge bis über 650 mm/a werden in den höher gelegenen Gebieten in Südbrandenburg und im Bereich des Nördlichen Landrückens gemessen. Niedrigere Jahressummen weisen die Niederungen auf. Außerdem nehmen die Niederschläge tendenziell von West nach Ost ab. Die niedrigsten Niederschlagssummen weist folglich das Oderbruch mit weniger als 500 mm/a auf (Gerstengarbe et al. 2003). Eine geschlossene Schneedecke bildet sich nur selten aus, so dass die Grundwasserneubildung überwiegend im Winterhalbjahr erfolgt.

Gleichzeitig weist die Region relativ hohe Lufttemperaturen auf. Die Mittelwerte lagen für die Jahre 1951–2000, je nach Region, zwischen 7,8 °C und 9,5 °C (Gerstengarbe et al. 2003). Die höheren Werte werden in Berlin sowie westlich, südlich und südöstlich davon in den Niederungen gemessen. Die

niedrigsten Temperaturen weisen die nördlichen Landesteile in den Landkreisen Ostprignitz-Ruppin, Oberhavel und Uckermark auf (Gerstengarbe et al. 2003).

Insbesondere die Sommertemperaturen sind relativ hoch. Dies hat sehr hohe Raten der potentiellen Evapotranspiration zu Folge, die in etwa die Werte des Jahresniederschlags erreichen (DWD 2009). Die tatsächliche Evapotranspiration liegt deutlich darunter (Tab. 1), da gerade in trockenen Sommerperioden die Wasserhaltekapazität der leichten Böden schnell ausgeschöpft ist. Diese Zahlen lassen sich allerdings nur in aufwändigen Prozessstudien auf kleiner Skala bestimmen. Für größere Raumskalen muss deshalb auf Wasserhaushaltsmodelle zurückgegriffen werden. Die Ergebnisse unterscheiden sich allerdings trotz unterschiedlicher Autoren und unterschiedlicher Modelle nur unwesentlich (Tab. 1).

Tabelle 1: Langjährige Mittelwerte hydrologischer Kenngrößen [mm/a] der Region Brandenburg-Berlin

| | Beirat für Nachhaltige Entwicklung und Ressourcenschutz des Landes Brandenburg (2009) | Dannowski und Steidl (2000) | Lahmer und Pfützner (2003) | Gerstengarbe et al. (2003) |
|--------------------------------|---|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Niederschlag | 617 | 615 | 610 | 604 |
| Potentielle Evapotranspiration | | | 628 | 628 |
| Aktuelle Evapotranspiration | 508 | 508 | 512 | 511 |
| Sickerwasserbildung | | | 86 | 81 |
| Abflussbildung | 109 | 108 | 106 | 101 |
| Oberflächenabfluss | | | 12 | 12 |
| Zufluss | 344 | | | |
| Abfluss | 453 | | | |

In weiten Bereichen Brandenburgs ist die sommerliche Wasserbilanz negativ (Dannowski und Steidl 2000, Lahmer und Pfützner 2003), vor allem im Nordosten Brandenburgs. Eine ganzjährig negative Sickerwasserbildung weisen die Auen und Niederungen mit hoch anstehendem Grundwasser auf, die deshalb als Zehrgebiete bezeichnet werden (Lahmer und Pfützner 2003). Dem stehen hohe positive Sickerwasserraten von z. T. mehr als 200 mm/a auf den grundwasserfernen Standorten im Nordwesten (Prignitz) und im Süden (Südlicher Landrücken) gegenüber. Für das Havelland und das Oderbruch wurden Sickerwasserraten nahe Null berechnet (Lahmer und Pfützner 2003). Die Differenz zwischen berechneter Abflussbildung und Sickerwasserbildung von ca. 20 mm ist durch den Oberflächenabfluss bedingt.

Der Beirat für Nachhaltige Entwicklung und Ressourcenschutz des Landes Brandenburg (2009) quantifiziert, gestützt auf Daten des Landesumweltamtes Brandenburg, außerdem noch den Zu- und Abfluss über die Fließgewässer nach Brandenburg hinein bzw. hinaus. Von den 453 mm/a, die die Außengrenzen Brandenburgs verlassen, entstammt nur ungefähr ein Viertel der Abflussbildung innerhalb des Landes. Der Zu- und Abstrom von Grundwasser über die Landesgrenzen ist dem gegenüber zu vernachlässigen.

Für die sommerliche Evapotranspiration und somit auch die Grundwasserneubildung bzw. die Abflussbildung sind die Grundwasserflurabstände entscheidend. Bei Flurabständen von weniger als 1 m haben auch krautige Pflanzen und Gräser Zugriff auf das Grundwasser, bei Flurabständen zwischen 1

und 2 m zumindest tief wurzelnde Pflanzen. Letzteres ist nach Berechnungen von Lahmer und Pfützner (2003) auf 39 % der Fläche Brandenburgs und Berlins der Fall (Abb. 2). Dies sind im Wesentlichen die Niederungen einschließlich der Urstromtäler. Dem stehen die grundwasserfernen Standorte auf den Platten und höher gelegenen Landesteilen gegenüber, die ca. 60 % der Landesfläche ausmachen.

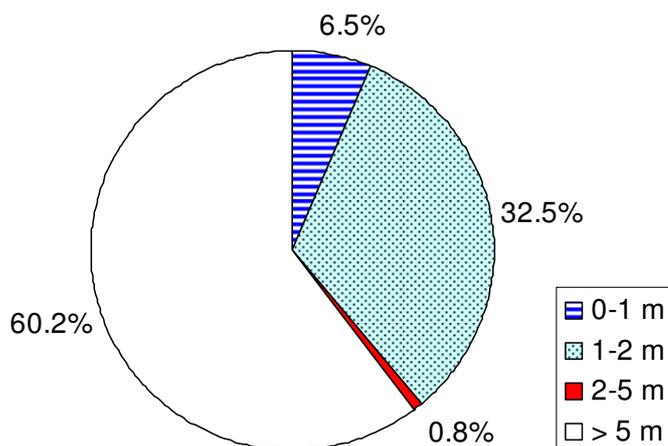


Abbildung 2: Verteilung der Grundwasserflurabstände in der Region Brandenburg und Berlin. Daten: Lahmer und Pfützner (2003)

Die Gesamtlänge der Fließgewässer in Brandenburg wird mit 32.000 km angegeben. Bedingt durch die geringen topographischen Gradienten sind die Fließgeschwindigkeit und damit auch die Selbstreinigung in den Fließgewässern in der Regel gering. Dieses Problem wird noch durch die Stauhaltung vieler Gewässer verschärft. Dazu kommt eine hohe Zahl von Flusseen, wie z. B. in Berlin und seinem Umland. Die Gesamtzahl der Seen in der Region Brandenburg und Berlin beträgt etwa 10.000, davon haben ca. 3.000 eine Größe von mehr als 1 ha. Aufgrund der vorwiegend sandigen Sedimente ist zumindest bei den größeren Seen von einem hydraulischen Kontakt mit dem unterlagernden Grundwasserleiter auszugehen. Diese Seen werden somit lateral vom Grundwasser durchströmt, wodurch Schad- und Nährstoffe ausgetauscht werden. Außerdem wird somit auch die Seespiegeldynamik von der des Grundwassers bestimmt (Natkhin 2010). In Einzelfällen kann allerdings, insbesondere für kleinere Stillgewässer, der hydraulische Kontakt zwischen Oberflächen- und Grundwasser durch Kolmation der Gewässersohle unterbunden sein (z. B. Lewandowski et al. 2009). Zwar weisen manche Seen, vor allem in den Glazialen Rinnen, große Tiefen auf, wobei die Gewässersohle z. T. deutlich unter dem Meeresspiegel liegt. Viele, vor allem kleinere Seen sind jedoch sehr flachgründig und neigen deshalb ohnehin zur Eutrophierung. Dies wird durch den Eintrag organischen Materials an den Uferandbereichen noch verstärkt. Dazu kommt noch der Nährstoffeintrag aus den umliegenden, oft landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten. Aufgrund der niedrigen Grundwasserneubildungsraten führen auch geringe Verluste z. B. von Nitrat aus der Wurzelzone bereits zu hohen Konzentrationen im Grund- und Oberflächenwasser.

3 Historische Entwicklung

Viele Aspekte des Wasserhaushalts in der Region Brandenburg-Berlin sind nur vor dem Hintergrund der historischen Entwicklung zu verstehen. Aufgrund der hohen Sensitivität hinsichtlich der klimatischen Bedingungen einerseits und den tiefgreifenden Änderungen der im Pleistozän angelegten Landschaftsstrukturen im Holozän andererseits unterlag der Landschaftswasserhaushalt seit dem Zurückweichen des Eises der Weichselkaltzeit tiefgreifenden natürlichen Veränderungen. Dazu kommt ein zunehmend stärkerer Einfluss des Menschen, teils durch bewusste Eingriffe in den Wasserhaushalt, teils als indirekte Auswirkungen der anthropogen bedingten Änderungen der Umwelt. Natürliche und anthropogene Komponenten sind hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Wasserhaushalt nicht immer klar zu trennen und hinsichtlich des Ausmaßes der Wirkungen schwierig zu gewichten. Teilweise bedingen sie einander, z. B. wenn der Mensch versucht, klimatisch bedingte Änderungen durch wasserbauliche Maßnahmen zu kompensieren. Trotzdem wird hier der Versuch gemacht, die verschiedenen Einflussfaktoren voneinander getrennt darzustellen.

3.1 Natürliche postglaziale Entwicklung

Das Ende der Weichselkaltzeit begann vor ca. 15.000 Jahren mit einem Anstieg der Globaltemperatur um ca. 4 °C über die Dauer von etwa 4.000 Jahren. Vor etwa 12.900 bis 11.500 Jahren kam es jedoch in der nördlichen Hemisphäre zu einer erneuten und sehr schnellen Abkühlung um mehr als 2 °C, dem Stadal der Jüngeren Dryas (Burroughs 2001). In Grönland betrug die Temperaturabnahme dagegen ca. 15 °C. Es wird vermutet, dass der Agassiz-See, ein riesiger Schmelzwassersee, der sich westlich der heutigen Großen Seen in Nordamerika gebildet hatte, nach Durchbrechen der Eisbarriere in der Hudson Bay in den Atlantik entleerte. Dieser Süßwasserstrom führte zu einer Unterbrechung der thermohalinen Zirkulation im Nordatlantik, durch die wie auch heute große Wärmemengen nach Nordeuropa geführt wurden. Erst ein knappes Jahrtausend später wurden wieder die Temperaturen erreicht, wie sie bereits um 13.000 vor heute herrschten und seitdem auch nicht wieder unterschritten wurden (Houghton et al. 1990, Johnsen 2002).

Die abschmelzenden Eismassen in Nordostdeutschland entwässerten über die Urstromtäler nach Nordwesten in die heutige Nordsee. Die heute in diesen Tälern verlaufenden Fließgewässer fördern nur noch einen winzigen Bruchteil der damaligen Wassermassen und wirken deshalb deutlich disproportioniert. Nachdem das Eis sich vom Land zurückgezogen hatte, wurde die Ostsee als nähergelegene Vorflut durch rückschreitende Erosion von verschiedenen Flüssen, z. B. der Oder, erreicht. Ähnliche Fließmuster hatten sich auch schon während der vorhergehenden Eisrückzügen der Weichselkaltzeit entwickelt, so dass heute die sich überwiegend von Südost nach Nordwest absenkenden Urstromtäler nur noch abschnittsweise von Fließgewässern genutzt werden. Auf der Zeitskala von wenigen Jahrtausenden ist damit zu rechnen, dass viele der heutigen Nebenflüsse der Elbe den kürzeren Weg über die Oder in die Ostsee suchen werden (Dalchow und Kiesel 2005). Tatsächlich entwässerte die Havel nach Zerstörungen und Vernachlässigung im Dreißigjährigen Krieg bereits kurzzeitig über den damaligen ersten Finow-Kanal in die Oder, bis es gelang, den Kanal wieder zu verschließen.

Nordostdeutschland war ab 14.700 vor heute eisfrei (LBGR 1997). Seitdem wechselten sich warme, feuchte Phasen wie das holozäne Maximum (vor 6.000–5.000 Jahren) und eher kältere, trockenere Phasen ab (Houghton et al. 1990, Burroughs 2001, Glaser 2001), die vermutlich auch mit entsprechenden Änderungen des Landschaftswasserhaushalts einhergingen. Durch die Erwärmung im ersten Abschnitt des Holozäns kam es zu einer Etablierung großer Wälder, die eine Minderung der Abfluss-

bildung zur Folge hatte (Bork et al. 1998). Verschiedene Rekonstruktionen des Temperaturverlaufes unterscheiden sich zwar in den Details, weisen aber die gleichen großen Muster auf (Abb. 3), wie das frühmittelalterliche Klimaoptimum und eine nachfolgende, oft als „kleine Eiszeit“ bezeichnete Phase niedrigerer Temperaturen. Seit Beginn des 19. Jahrhunderts ist ein bis heute andauernder Temperaturanstieg zu verzeichnen. Inzwischen wurden die Maximalwerte des frühmittelalterlichen Klimaoptimums deutlich überschritten.

Die Region Brandenburg-Berlin ist durch eine Vielzahl von Seen und grundwasserabhängigen Ökosystemen geprägt. Rekonstruktionen der Seewasserspiegel von Interesse liefern wichtige Informationen über die historische klimatische Entwicklung. Zumindest für die größeren Seen kann in der Regel davon ausgegangen werden, dass sie in engem hydraulischen Kontakt mit dem Grundwasser stehen und somit Informationen über historische Seewasserstände auch Rückschlüsse auf den allgemeinen Landschaftswasserhaushalt erlauben. Rekonstruktionen klimabedingter Wasserstandsänderungen verschiedener europäischer Seen im frühen Holozän wurden beispielsweise von Harrison und Digerfeldt (1993), Harrison et al. (1993) und Gaillard (1985) vorgenommen.

Für Nordostdeutschland liefern die Untersuchungen von Kaiser (1996, 1998) an der Müritz aufschlussreiche Hinweise. Aufgrund der Größe des Sees ist davon auszugehen, dass die Effekte wasserbaulicher Maßnahmen relativ gering sind. Für die ersten 9.000 Jahre des untersuchten Zeitraums liegen nur wenige Daten vor, so dass die zeitliche Entwicklung nur sehr eingeschränkt zu beurteilen ist. In diesem Zeitraum scheint der Seewasserspiegel aber durchweg unter dem heutigen Niveau gelegen zu haben. Der niedrige Wasserspiegel im frühen Mittelalter korrespondiert mit entsprechend niedrigen Wasserständen im deutschen Alpenvorland (Küster 1999), was für ein großräumiges klimatisches Phänomen spricht (Glaser 2001, Burroughs 2001).

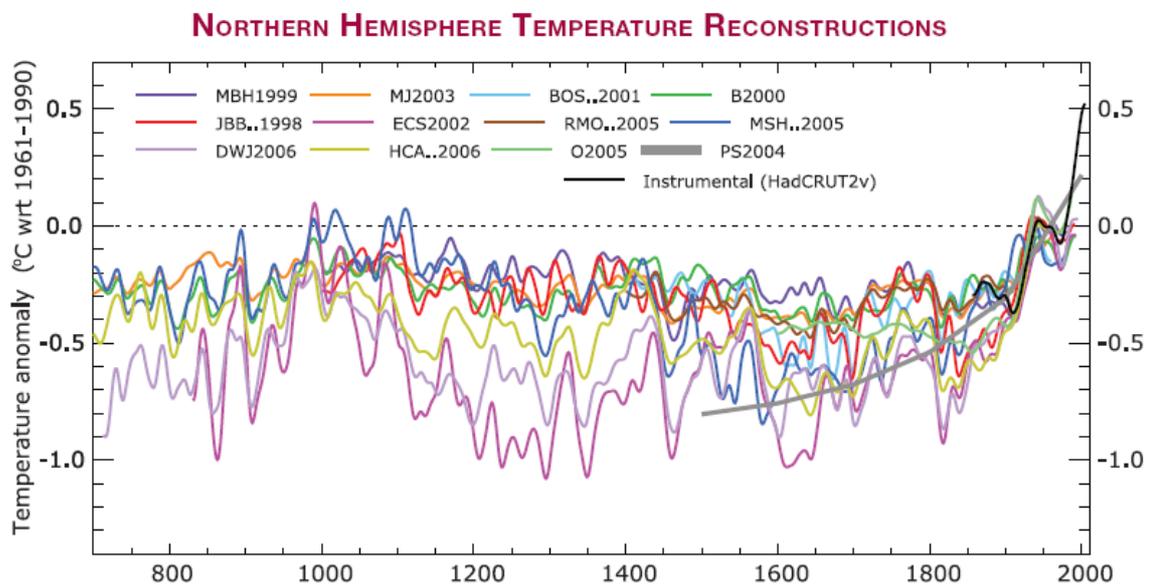


Abbildung 3: Mit unterschiedlichen Methoden rekonstruierter Verlauf der Lufttemperatur in der nördlichen Hemisphäre seit 700 n. Chr. (aus: Solomon et al. 2007)

Nach der Rekonstruktion von Kaiser (1999) erreichte die Müritz um 1300 n. Chr. mit 3 m über dem heutigen Seewasserspiegel ihren Höchststand und sank danach auf das heutige Niveau ab (Abb. 4). Demgegenüber lag das Maximum der Seewasserspiegel in der Mark Brandenburg für die letzten 900

Jahre nach Angaben von Driescher (2003) im 17. und 18. Jahrhundert. In dieser Zeit entstanden neue Seen und bestehende, benachbarte Seen wurden durch natürliche Wasserläufe verbunden. Gleichzeitig wurden künstliche Auslässe geschaffen oder bestehende Auslässe vertieft, um Seewasserspiegel abzusinken und landwirtschaftliche Flächen zu entwässern (Driescher 2003).

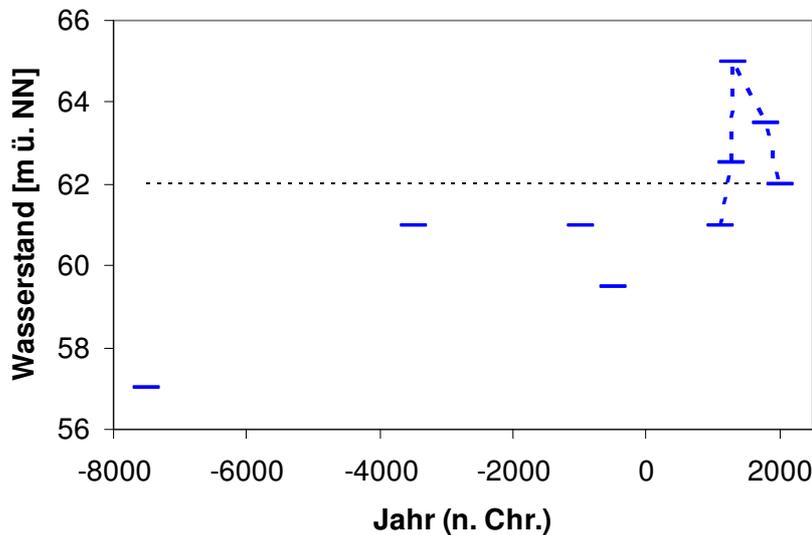


Abbildung 4: Rekonstruierter Wasserstand der Müritz. Gestrichelte Linie: Seespiegelhöhe zum Zeitpunkt der Untersuchungen. Daten: Kaiser (1996, 1998)

Vielfältige historische Überlieferungen bestätigen, dass die Seewasserspiegel in Brandenburg in den letzten Jahrhunderten deutlichen Schwankungen unterlagen, was nur teilweise durch wasserbauliche Maßnahmen erklärt werden kann (Driescher 2003). Diese Schwankungen setzen sich bis in die Gegenwart hinein fort. Beispielsweise wird der Wasserstand des durch wasserbauliche Maßnahmen wenig beeinflussten und abflusslosen Redernswalder Sees in der Schorfheide auf dem Königlich Preußischen Urmesstischblatt von 1888 mit 53,5 m angegeben, was ca. 3,5 m unter dem Stand von 1982 lag. Seitdem ist der Wasserspiegel aber wieder um 4 m gesunken (Natkhin 2010). Parallel dazu sanken die Wasserstände im benachbarten Briesensee um ca. 3,5 m (Natkhin 2010), also mit einer Rate von mehr als 12 cm/a. Der Behlensee, Anfang der 1990er Jahre noch ein Flachsee mit 1 bis 1,5 m Wassertiefe, war 2003 völlig ausgetrocknet (Natkhin 2010). Ähnliche Trends wurden in vielen anderen Seen und Feuchtgebieten der Region beobachtet (Landgraf et al. 2004, Natkhin 2010).

Das Trockenfallen von Seen und Feuchtgebieten stellt nicht nur eine Vernichtung des Lebensraumes vieler geschützter Tier- und Pflanzenarten dar (Vietinghoff 1993). Durch den Wegfall der Seewasserverdunstung in trockenen Sommerperioden steigt auch die Lufttemperatur. Schließlich werden dadurch auch Probleme der Wasserqualität verschärft (Landgraf et al. 2004) und große Mengen Kohlenstoff durch die Mineralisierung der Torfkörper freigesetzt (Lorenz et al. 2005).

Teilweise sind anthropogene Maßnahmen zumindest für einen Teil der beobachteten Trends verantwortlich oder werden als Ursachen diskutiert. Beispielsweise macht Vietinghoff (1993) unregelmäßige Wasserentnahmen aus dem Grundwasser für die Absenkung des Wasserstandes im Seddiner See um 83 cm in 15 Jahren verantwortlich. Borgwardt et al. (2006) sehen die Ursachen für die Absenkung des Wasserstandes in dem Verlandungsmoor der Melanke um 2 m innerhalb von 13 Jahren in der Einleitung der Einleitung von Wasser, den Ausbau der Döllniederung, aber auch in einem erhöhten Anteil von Kieferreinbeständen im Einzugsgebiet und in der Abnahme der Niederschläge.

Aufgrund der vorwiegend sandigen und gut durchlässigen pleistozänen Sedimente stehen die meisten Seen in Brandenburg und Berlin in einem guten hydraulischen Kontakt mit dem unterlagernden Grundwasserleiter. Generell wurden in den letzten 30 Jahren in Brandenburg verbreitet sinkende Grundwasserspiegel beobachtet (Hannappel und Jakobs 2002, Gerstengarbe et al. 2003), was nur in wenigen Einzelfällen mit erhöhten Förderraten erklärt werden kann. Diese Absenkungen sind vor allem im Bereich der Platten, in größerer Entfernung von den Niederungen, verbreitet und erreichen teilweise mittlere Raten von 3 cm/a und mehr. Dies wird auch durch eigene Messungen bestätigt. Im Fläming wurden beispielsweise seit 1972 mittlere Absenkungsraten von über 7 cm/a bestimmt (Dannowski, mündl. Mitteilung). Einzelne feuchtere Jahre führten dabei nur zu vorübergehenden Anstiegen. Dreger und Michels (2002) fanden die gleichen Absenkungsraten für den Zeitraum 1980–2000 in 17 Grundwasserpegeln in der Schorfheide.

Es ist deshalb davon auszugehen, dass die in Brandenburg verbreitet zu beobachtenden Absenkungen von See- und Grundwasserspiegeln der letzten drei Jahrzehnte überwiegend klimatische Ursachen haben. Gerstengarbe et al. (2003) finden für den Zeitraum 1961–1998 für alle untersuchten meteorologischen Parameter für die Region Brandenburg-Berlin lediglich für die Lufttemperatur einen signifikanten Anstieg um knapp 1 °C. Demgegenüber weist Natkhin (2010) darauf hin, dass für etliche Niederschlagsstationen in der Region die kumulativen Jahressummen des Niederschlags für den Zeitraum Ende des 19. und Beginn des 20. Jahrhunderts deutlich unter dem Durchschnitt der Jahre 1850–2009 lagen, um 1970 deutlich darüber, und seitdem wieder abnehmen. Dies würde gut zu den beobachteten Trends der Grund- und Seewasserspiegel passen. Beispielsweise lag der mittlere Jahresniederschlag an der Station Angermünde 1979–2008 um 42 mm/a unter dem der Jahre 1951–1980.

Aufgrund des Anstiegs der Lufttemperatur, insbesondere während der Sommermonate, ist außerdem mit einer erhöhten Evapotranspiration zu rechnen. Tatsächlich errechnen sich für die letzten Jahre leicht erhöhte Werte der Klimatischen Wasserbilanz bzw. der Grasreferenzverdunstung im Bereich Berlin-Müncheberg (O. Dietrich, mündl. Mitteilung). Allerdings reicht die Größenordnung nicht aus, um die beobachteten Trends der Wasserstände zu erklären. Andere Autoren berichten sogar von leicht sinkenden Verdunstungsraten der letzten Jahrzehnte, mutmaßlich bedingt durch eine Zunahme der Bewölkung, Abnahme des Sättigungsdefizits der bodennahen Luftschichten und eine Verringerung der Windgeschwindigkeit (Linacre 2004, Fu et al. 2009). Lahmer und Pfützner (2003) finden in den von ihnen für die Jahre 1961–1998 simulierten Sickerwasserraten für die gesamte Region Brandenburg und Berlin keine signifikante Abnahme, ebenso wenig für die Evapotranspiration.

Für den Landschaftswasserhaushalt in Nordostdeutschland spielt außerdem der Meeresspiegelanstieg in der Ostsee als Vorflut eine wichtige Rolle. Sowohl der mittlere Wasserspiegel der Unteren Oder als auch die Geländeoberfläche ihrer Aue liegt in Nordostbrandenburg nur wenige dm über dem Meeresspiegel. Mit dem Temperaturanstieg ist global auch ein Anstieg des Meeresspiegels verbunden (Abb. 5). Dieser Anstieg wird im Bereich der südlichen Ostseeküste durch die tektonische Senkung der baltischen Syneklise, südlich der Tornquist-Linie, noch verstärkt. Der sich daraus ergebende relative Meeresspiegelanstieg verlief in den letzten 6.000 Jahren annähernd linear mit einer Rate von ca. 1 mm/a (Lampe 2008).

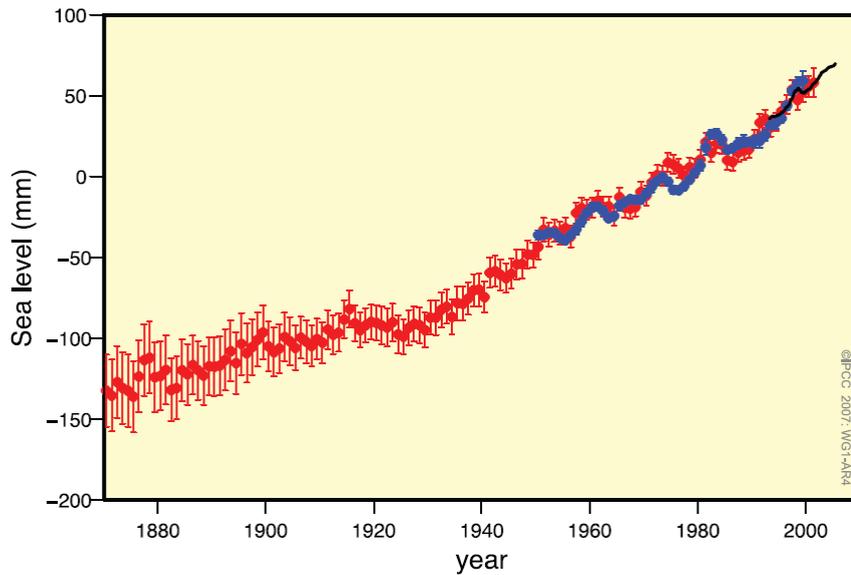


Abbildung 5: Globale Mittelwerte der Höhe des Meeresspiegels seit 1870 in Relation zum Mittelwert 1961–1990. Rot: rekonstruierte Werte; blau: Gezeitenmessungen ab 1950; schwarz: Satellitengestützte Messungen. Fehlerbalken geben das 90 %-Konfidenzintervall an (aus: Solomon et al. 2007)

3.2 Anthropogene Faktoren

Der menschliche Einfluss auf den Landschaftswasserhaushalt begann bereits vor Jahrtausenden. Um 4500 v. Chr. erreichte der Ackerbau im Zuge der sogenannten Neolithischen Revolution Nordostdeutschland (Küster 1999, Riek und Stähr 2004, Bork et al. 1998). Zwar war die Bevölkerungsdichte anfangs sehr gering und entsprechend nahmen die ackerbaulich genutzten Flächen zunächst nur einen winzigen Teil des Landes ein. Dennoch nahm damit eine Entwicklung ihren Lauf, die nahtlos zur heutigen intensiv genutzten Agrarlandschaft führte. Da ackerbauliche Kulturen deutlich weniger transpirieren als Waldbestände nahm dadurch die Grundwasserneubildung zu (Bork et al. 1998). Gleichzeitig wurde durch die verringerte Bodenbedeckung und die häufige Bodenbearbeitung die Erosion von den Ackerflächen begünstigt. Die abgespülte Ackerkrume sedimentierte in abflusslosen Hohlformen und Seen und förderte dadurch deren Verlandung. Ablagerungen in den Flusstälern führten zur Ausbildung mächtiger Auenlehme (Bork et al. 1998), die später ebenfalls ackerbaulich genutzt wurden, sofern die Grundwasserverhältnisse es zuließen. Mit der Einführung des eisernen Pfluges in der Eisenzeit konnten später auch steinhaltige oder tonige Böden ackerbaulich genutzt werden. Gleichzeitig stieg damit der Verbrauch von Holz für die Verhüttung von Eisenerzen. Da letztere in Norddeutschland auch aus Raseneisenerz in den vermoorten Niederungen gewonnen wurden, waren damit auch Auswirkungen auf diese grundwassernahen Standorte verbunden.

Die Ausweitung der landwirtschaftlich genutzten Fläche ging zulasten des Waldanteils. In der Rekonstruktion von Bork et al. (1998) nimmt der Waldanteil in Deutschland vom frühen Mittelalter bis Anfang des 14. Jahrhunderts von 90 % auf 15 % ab (Abb. 6). Dies hätte, ihren Berechnungen zufolge, bei ansonsten gleichbleibenden Bedingungen einen Rückgang der Evapotranspiration, und somit eine Zunahme des Abflusses, gemittelt über das Gebiet des heutigen Deutschlands, von ca. 120 mm/a zur Folge gehabt. Angesichts der aktuellen jährlichen Abflusshöhe in Brandenburg von ca. 100 mm/a muss dies einen massiven Einfluss auf den Landschaftswasserhaushalt gehabt haben. In der ersten Hälfte des 14. Jahrhunderts kam es bei insgesamt sehr ungünstigen klimatischen Bedingungen, massiven Ernteausfällen, verheerenden Überschwemmungen und Pestepidemien zu einem deutlichen Bevöl-

kerungsrückgang (Glaser 2001). Erst ca. ein Jahrhundert später wurde die landwirtschaftliche Fläche wieder ausgedehnt, und der Anteil des Waldes ging wieder zurück. Ab dem 17. Jahrhundert stabilisierte sich der Anteil des Waldes auf ca. 30 % der Landesfläche. Allerdings ist zu beachten, dass große Teile des Waldes als Waldweide oder Hutungen genutzt wurden und die Struktur des Waldes sich deutlich von den heute vorherrschenden dichten Altersklassenbeständen unterschied.

Zur Verarbeitung des Getreides wie auch für andere Gewerbe waren spätestens ab dem frühen Mittelalter Wassermühlen weit verbreitet. Davon zeugen heute noch Märchen, Volkslieder, Redensarten und nicht zuletzt die weite Verbreitung des Nachnamens „Müller“ in Deutschland. Für den Betrieb der Mühlen war die Einhaltung bestimmter Mindest- und Maximalabflüsse erforderlich, was nur durch den Bau und die Unterhaltung von Mühlenteichen und Mühlengraben möglich war. Oft wurde die Wasserführung der Fließgewässer durch Umleitung und Zuleitung anderer Wässer erhöht. Beispielsweise wurde für den Betrieb der Mühlen des 1258 gegründeten Zisterzienserklosters Chorin das Wasser des Choriner Sees um 1,75 m abgesenkt und der Nettelgraben angelegt, der Wasser vom Weißen zum Choriner See führte. Viele Inselstädte wurden an Stellen angelegt, wo ein Mühlenstau den Betrieb von Wassermühlen ermöglichte, z. B. Berlin, Köpenick, Spandau, Brandenburg, Havelberg, Potsdam und Rathenow (Küster 1999). Am Mühlendamm, der die Städte Berlin und Cölln verband, waren um 1750 14 Mühlenbetriebe mit 29 Wasserrädern und 53 Gängen ansässig. Die durch den Damm aufgestaute Wasserfläche betrug damals etwa 30 bis 40 km² (Küster 1999). Diese Mühlenbetriebe stellten de facto die Keimzellen der späteren Industrialisierung dar.

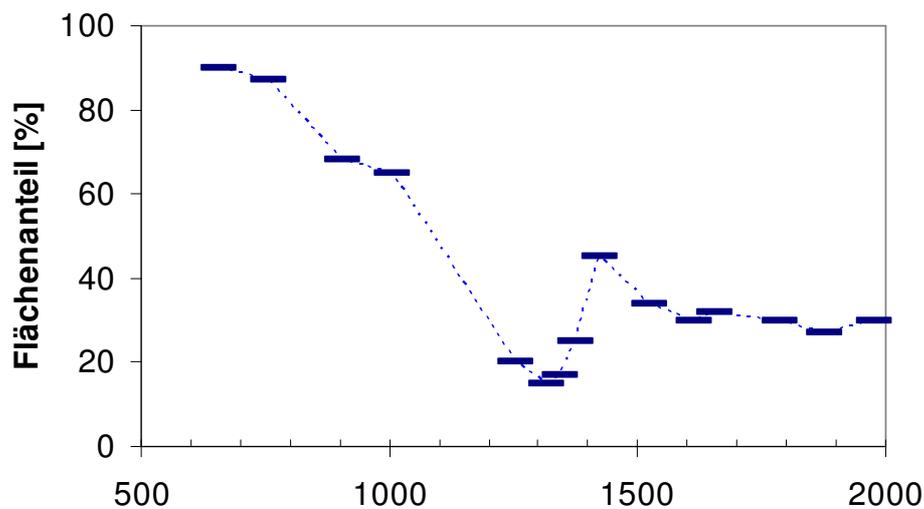


Abbildung 6: Rekonstruktion des von Wald bedeckten Flächenanteils in Deutschland. Daten: Bork et al. (1998)

Mit dem Wachstum von Bevölkerung und Gewerbe wuchs auch der Bedarf an Brenn- und Bauholz. Einerseits wurde verstärkt Torf in den Niedermooren abgebaut und verfeuert, was zu einer Absenkung der Geländeoberfläche führte. Andererseits ging man in Brandenburg im 18. Jahrhundert zu einer planmäßigen Forstwirtschaft über. Aufgrund ihrer tiefreichenden Wurzel und ihres schnellen Wachstums erwies sich hierfür die Kiefer als besonders gut geeignet und wurde bald großflächig angebaut (Milnik 2007). Bis heute sind ca. 80 % der Waldfläche in Brandenburg mit Kiefern bestockt (Hofmann und Pommer 2005). Da Nadelwaldbestände in der Regel eine deutlich höhere Evapotranspiration aufweisen als Grün- oder Ackerland oder auch Laubwälder, hatte dies eine verstärkte Zehrung der Boden- und Grundwasservorräte zur Folge.

Trotz der planmäßigen Anpflanzung neuer Forste nahm der Flächenanteil des Waldes aufgrund der noch schneller gestiegenen Nachfrage nach Holz bis in die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts ab. Erst mit dem Ersatz des Holzes als Brennstoff durch Kohle nahm der Nutzungsdruck auf den Wald wieder ab, und der Flächeanteil des Waldes stieg bis auf das heutige Niveau, nur unterbrochen durch stärkere Einschläge während und nach den beiden Weltkriegen. Entsprechend stiegen auch die Wasserverluste durch Evapotranspiration an.

Mit dem Wachsen der Städte wuchs auch die Notwendigkeit, entsprechende Transportkapazitäten zu deren Versorgung bereit zu stellen. Dafür wurden, wenn irgend möglich, größere Wasserläufe für die Schifffahrt genutzt. Ab dem Beginn des 17. Jahrhunderts begann auch der Bau künstlich angelegter Kanäle. Von 1605 bis 1620 wurde der erste Finow-Kanal gebaut, der über ein System von Schleusen die Havel mit der Oder verband. Dieser Kanal wurde allerdings nach bewussten Zerstörungen und Vernachlässigungen im Zuge des Dreißigjährigen Krieges aufgegeben. Erst ein Jahrhundert später wurde der Kanal neu errichtet. Gleichzeitig wurden die vorhandenen Fließgewässer ausgebaut und begradigt. Dies führte lokal zur Absenkung des Grundwasserspiegels in den Flussauen und zu einem beschleunigten Abfluss in den Fließgewässern. Teilweise musste der Wasserspiegel künstlich angehoben und reguliert werden, um den nötigen Tiefgang der Schiffe zu gewährleisten, was z. B. im Bereich der Unteren Havel über Nadelwehre erfolgte.

Im 18. Jahrhundert begann die Zeit großräumiger Trockenlegungen von Feuchtgebieten. Ab 1715 wurden so im Havelland 15.000 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche gewonnen. Von 1747 bis 1753 wurden 56.000 ha im Oderbruch eingedeicht, trocken gelegt und von angeworbenen Kolonisten besiedelt und bestellt. Auch im Rhinluch und in der Dosseniederung wurden große Flächen drainiert und anschließend landwirtschaftlich genutzt. Mit der Einführung der Rohrdrainage konnten auch grundwassernahe Flächen ackerbaulich genutzt werden. Ab ca. 1960 wurden im Zuge der Komplexmelioration auf dem Gebiet der DDR diese Bestrebungen weiter intensiviert. Durch Kombination von Rohrdrainagen, Entwässerungsgräben, Deichen und Schöpfwerken konnte der Grundwasserflurabstand gesenkt bzw. gezielt gesteuert werden. Damit konnten große Flächen intensiv landwirtschaftlich genutzt werden.

Die Komplexmelioration hatte tiefgreifende Auswirkungen auf Verbreitung und Beschaffenheit der Moore in Brandenburg. Dabei handelte es sich überwiegend um Niedermoore. Von ursprünglich 300.000 ha, das heißt, 10 % der Landesfläche, waren 1960 noch 280.000 ha vorhanden. Heute sind es nur noch 210.000 ha (MLUV 2009). Die verbliebenen Moore sind meist tief entwässert. Dies führte zur Torfmineralisierung und damit zur Moorsackung, sowie zur Vererdung oder Vermulmung. Die Flächen werden heute überwiegend als Grünland genutzt.

Heute ist davon auszugehen, dass der größte Teil des Fließgewässernetzes in Brandenburg entweder massiv anthropogen verändert oder überhaupt erst künstlich angelegt worden ist (Driescher 2003). Dazu gehört auch der Anschluss von Binneneinzugsgebieten an das vorhandene Fließgewässernetz. Alle diese Maßnahmen führen heute zu einer beschleunigten Abführung des Wassers und damit zu einer großräumigen verstärkten Entwässerung der Landschaft. Dies gilt insbesondere für die Niederungen und grundwassernahen Standorte, die fast 40 % der Region Brandenburg-Berlin ausmachen.

Im Gegensatz dazu wurden im Berliner Umland ab 1880 große Flächen als Rieselfelder mit Abwasser beaufschlagt. Dadurch kam es lokal zu deutlichen Anhebungen des Grundwasserspiegels und zur Steigerung der Abflüsse in den Vorflutern. Mit der Einstellung der Nutzung der Rieselfelder in den 1980er Jahren sank der Grundwasserspiegel vielerorts wieder deutlich ab und gingen die Abflüsse in den Fließgewässern zurück.

4 Aktuelle anthropogene Einflüsse

Wie im vorhergehenden Kapitel dargestellt, unterliegt der Wasserhaushalt der Region Brandenburg-Berlin seit Jahrhunderten einer massiven anthropogenen Überprägung. Dieses Kapitel fokussiert auf die aktuellen anthropogenen Maßnahmen mit Schwerpunkt auf den letzten 20–30 Jahren.

4.1 Wasserbau

Die Bedeutung der Flussschifffahrt für den Güterverkehr nahm nach dem Zweiten Weltkrieg zugunsten des schienen- und straßengebundenen Güterverkehrs deutlich ab. Trotzdem stellt der wassergebundene Güterverkehr nach wie vor eine wichtige Säule des Güterverkehrs dar. Entsprechend wird in die Unterhaltung und den Ausbau der Schifffahrtswege weiter investiert. Hier sei nur an den aktuellen Neubau des Schiffshebewerks in Niederfinow erinnert. Demgegenüber steigt die Bedeutung der Wasserstraßen für den Tourismus, der in dem weitgehend strukturschwachen Brandenburg, aber auch in Berlin und seiner Umgebung einen wichtigen Erwerbszweig darstellt. Im Gegensatz zur Berufsschifffahrt sind aber für den Wassertourismus die kleinen Wasserstraßen und Seen ausschlaggebend, die von der aktuellen Entwicklung sinkender Wasserstände stärker betroffen sind.

Die Rahmenbedingungen für den landwirtschaftlichen Wasserbau haben sich dagegen nach der Wende deutlich verändert. Noch in den 1980er Jahren wurde von Seiten des Staates massiv in den Ausbau und die Unterhaltung von Entwässerungsanlagen und in die Staubewässerung investiert. Nach der Wende hatten die landwirtschaftlichen Betriebe über ihre Beiträge zu den Wasser- und Bodenverbänden diese Kosten zu übernehmen. Da gleichzeitig die Personalausstattung der Betriebe nach der Wende deutlich sank und der Kostendruck auf die Betriebe durch die Öffnung der Märkte stieg, sank die Bereitschaft, große Summen für die aufwendige Bewirtschaftung dieser Standorte und der Unterhalt der wasserbaulichen Maßnahmen aufzuwenden. Entsprechend werden viele wasserbauliche Anlagen heute nicht mehr weiter betrieben und unterhalten.

Die gesetzlich definierte Aufgabe der Wasser- und Bodenverbände, für eine „ordnungsgemäße Abführung des Wassers aus der Landschaft“ und somit eine möglichst effektive Entwässerung zugunsten der landwirtschaftlichen Nutzung zu sorgen, steht zudem im Widerspruch zu den heutigen Bestrebungen, das Wasser möglichst lange in der Landschaft zurückzuhalten und ehemalige Feuchtgebiete wiederzuvernässen. Dafür werden wiederum im großen Umfang Fördergelder des Landes Brandenburg an die Wasser- und Bodenverbände ausgereicht. Dies führt in der Praxis oft zu internen Widersprüchen.

4.2 Landnutzung

Weltweit wird der weitaus größte Teil der Wasserressourcen für die landwirtschaftliche Produktion verwendet (Rockström 2003). Dies gilt auch für das Land Brandenburg. Daneben spielt die Evapotranspiration der Wälder und der Seen und Feuchtgebiete eine maßgebliche Rolle für den Landschaftswasserhaushalt. Dabei unterscheiden sich die verschiedenen Landnutzungstypen zum Teil erheblich. Dies lässt sich nutzen, um gezielt den Landschaftswasserhaushalt zu beeinflussen. Allerdings sind die hier genannten Zahlenwerte immer nur eingeschränkt zu verallgemeinern. Landnutzung ist zwar ein wesentlicher, aber eben auch nur ein Faktor unter vielen anderen, die die Grundwasserneubildung und Abflussgenerierung beeinflussen. Andere wichtige Einflussfaktoren sind neben der Geomorphologie und Skaleneffekten (Cuevas et al. 2006, Strayer et al. 2003, Herlihy et al. 1998) auch dynamische Größen wie z. B. die Niederschlagsverteilung über das Jahr, die Wasserhaltekapazität der

Böden, der Oberflächenabfluss als Funktion von Bodeneigenschaften und die Niederschlagsintensität. Nicht zu vernachlässigen sind auch z. T. nichtlineare Wechselwirkungen zwischen diesen Größen. So spielt die Wasserhaltekapazität des Bodens und die Durchwurzelungstiefe keine Rolle, sofern die Niederschläge gleichmäßig über die Vegetationsperiode verteilt sind. Bei einer sehr ungleichmäßigen Niederschlagsverteilung sind dies aber gerade die ausschlaggebenden Faktoren. Ein anderes Beispiel betrifft die Hydrophobizität: In Abhängigkeit von der Beschaffenheit des humusreichen Oberbodens, die wiederum von der Vegetation abhängt, können Oberböden nach längeren Trockenphasen eine starke Hydrophobizität entwickeln, die die Wiederbefeuchtung des Bodens in nachfolgenden Regenperioden hemmt und zu erhöhtem Oberflächenabfluss führt. Das Zusammenspiel dieser verschiedenen Faktoren kann im jeweiligen Einzelfall nur mit Prozess-basierten Modellen abgeschätzt werden. Selbst dann ist noch mit erheblichen Unsicherheiten zu rechnen.

Freie Wasserflächen und grundwassernahe Standorte nehmen in Brandenburg und Berlin zwar nur einen kleinen, dennoch nicht zu vernachlässigenden Flächenanteil ein. Richter (1997) erstellte eine empirische Formel zur Bestimmung der Verdunstung, basierend auf Messungen mit Verdunstungsflößen auf dem Stechlinsee. Allerdings wird die Gesamtverdunstung vor allem bei kleineren Seen überproportional von der Evapotranspiration der Vegetation im Uferbereich bestimmt. In der Studie von Herbst und Kappen (1993) an einem norddeutschen See betrug die Evapotranspiration der Schilfbestände das 1,87-fache der Verdunstung von der freien Wasserfläche. Behrendt et al. (2001) fanden in der Lysimeterstation Paulinenaue einen exponentiellen Anstieg der Jahreswerte der Evapotranspiration mit abnehmendem Grundwasserflurabstand. Die höchsten Raten bis über 2000 mm/a wurden in einem Schilfbestand (*Phragmites australis*) bestimmt, von denen fast 1600 mm auf die Sommerperiode (April–Oktober) entfielen. Dannowski und Balla (2004) ermittelten Jahresraten der Gesamtverdunstung in einem Niedermoorstandort in der Welseniederung mit künstlich angehobenem Grundwasserstand, die ca. das Doppelte des Jahresniederschlags betragen. Ähnlich hohe Werte über 1000 mm/a wurden auch von Müller et al. (2005) bestimmt. Entsprechend fanden Dannowski und Steidl (2000), die die Abflussspenden flächendeckend für ganz Brandenburg mit dem Modell ABIMO bestimmten, dass für die räumlichen Unterschiede neben der Vegetation vor allem die Wasserverfügbarkeit als Funktion des Grundwasser-Flurabstands ausschlaggebend war. Oberflächengewässer wiesen eine negative Bilanz in Höhe von ca. 100 mm/a auf, die v. a. durch den Grundwassernachstrom ausgeglichen wurde. Darunter fielen auch Feuchtgebiete, insbesondere Niedermoore mit geringem Grundwasserflurabstand.

Generell ist davon auszugehen, dass die Sickerwasserspende bzw. Grundwasserneubildung von Nadelwald über Laubwald bis zu ackerbaulich oder als Grünland genutzten Flächen abnimmt. Dies ist bedingt durch die unterschiedliche Durchwurzelungstiefe, die Rauigkeit des Bestandes sowie durch die unterschiedlichen Vegetationszeiten (Brown et al. 2005).

Für die Periode 1995–2005 bestimmten Schindler et al. (2008) als Durchschnittswerte der Sickerwasserspende an dem Standort Müncheberg für einen Kieferbestand 15 mm/a, für den Ackerstandort jedoch 175 mm/a und für Grünlandnutzung den fast identischen Wert von 174 mm/a. Für einen nordwestdeutschen Standort am Niederrhein mit deutlich höheren Jahresniederschlagsraten fanden Eulenstein und Drechsler (1992) geringere Unterschiede zwischen Wald und landwirtschaftlich genutzten Flächen (Abb. 7). Allerdings zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen feuchten und trockenen Jahren. Im Trockenjahr 1989–1990 konnte unter Weide und Wald überhaupt keine Sickerwasserspende beobachtet werden. Dagegen unterschied sich die Sickerwasserspende unter Wald für das feuchte Jahr 1987–1988 trotz der um ca. 200 mm höheren Jahresniederschlagsmenge kaum vom vieljährigen Mittel.

Für die Region Brandenburg-Berlin mit deutlich geringeren Jahresniederschlägen und überwiegend leichten Böden spielt die Wasserversorgung während der Vegetationsperiode eine entscheidende Rolle. Schindler et al. (2001) zeigen, dass der Ertrag einer aus Winterweizen, Zuckerrübe, Sommergerste und Erbse bestehenden Fruchtfolge in den Jahren 1992–1999 in der Uckermark im Wesentlichen von

der Höhe der Sommerniederschläge (April–September) bestimmt wird. Dagegen war für das Düngungsniveau kein Zusammenhang mit dem Ertrag feststellbar.

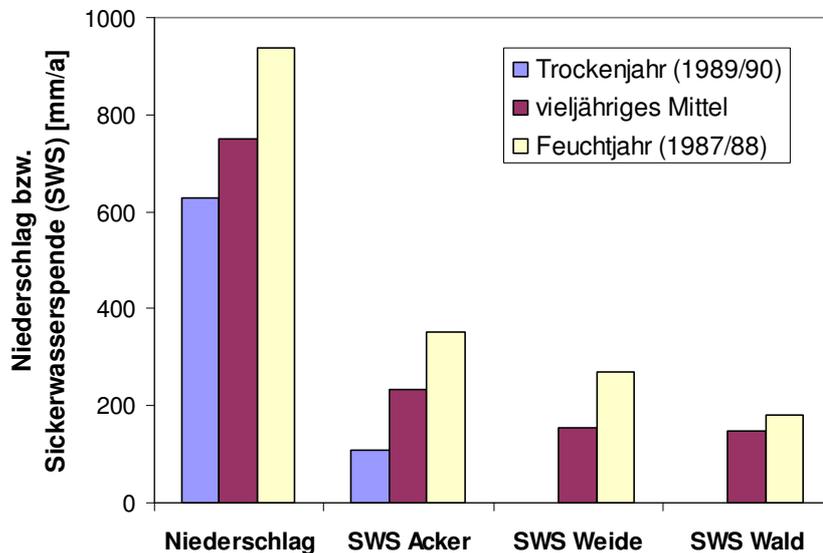


Abbildung 7: Niederschlag und Sickerwasserspende unterschiedlich genutzter Standorte für unterschiedlich feuchte Jahre. Daten: Eulenstein und Drechsler (1992)

Landnutzungseffekte spiegeln sich auch in den Simulationsergebnissen verschiedener Autoren. In den Szenarien von Fohrer et al. (2001) stieg der Abfluss nach Umwandlung von Wald in Acker um 9 %. Umgekehrt sank der Abfluss nach Aufforstung von Weideflächen um 3 %. Dannowski und Steidl (2000) bestimmten mit dem Modell ABIMO flächendeckend die Abflusshöhe für aktuelle Klimaverhältnisse. Die Werte nahmen von Brachland über urbane Flächen, landwirtschaftlich genutzte Flächen, Wald und Oberflächengewässer um 400 mm ab (Tab. 2). Nach ihren Ergebnissen wird die negative Wasserbilanz des Sommerhalbjahres im räumlichen und zeitlichen Mittel durch die Niederschläge im Winterhalbjahr kompensiert. Der rechnerische Überschuss von 56 mm/a wird allerdings in den niederschlagsärmeren Landesteilen, und insbesondere unter Kiefernbeständen, nur in einzelnen Jahren erreicht.

Tabelle 2: Simulierte Abflusshöhen für verschiedene Landnutzungstypen in Brandenburg und Berlin unter aktuellen klimatischen Verhältnissen. Daten: Dannowski und 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 |

Natkhin (2010) simulierte die Grundwasserneubildung verschiedener Landnutzungstypen auf verschiedenen Bodenarten im Bereich der Schorfheide für die Jahre 1952–2007. Dabei ergaben sich,

gemittelt über die verschiedenen Bodenarten, mittlere Grundwasserneubildungsraten von 45 mm/a für die Kiefer, 114 mm/a für Buchenbestände und 215 mm/a für Grünland-Standorte. Demgegenüber war die Varianz innerhalb der verschiedenen untersuchten Bodenarten deutlich geringer (Abb. 8).

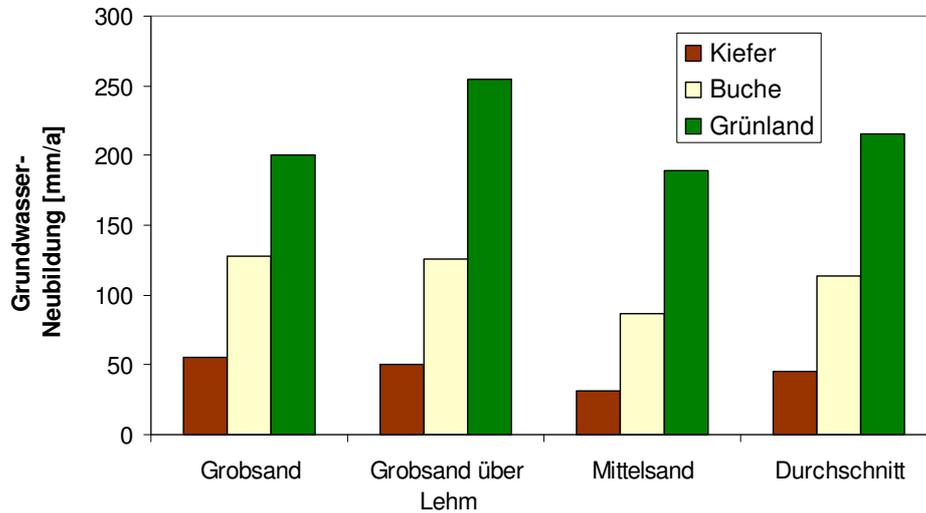


Abbildung 8: Simulierte mittlere Grundwasserneubildungsraten für verschiedene Landnutzungstypen und Bodenarten im Bereich der Schorfheide für die Jahre 1952–2007. Daten: Natkhin (2010)

Bolte et al. (2002) ermittelten mittels eines Modells den Unterschied bezüglich der Tiefensickerung unter der aktuellen im Vergleich zur natürlichen Waldbedeckung mit deutlich höherem Laubwaldanteil. Für ganz Deutschland belaufen sich die Unterschiede auf durchschnittlich 16 mm/a. Im niederschlagsarmen Tiefland Nordostdeutschland waren die Unterschiede allerdings deutlich größer. Für das Land Brandenburg würde ein kompletter Umbau der Kiefernflächen in Laubwälder nach Wattenbach et al. (2007) die Grundwasserneubildung um 4,5 % erhöhen. In der Modellstudie von Mey und Pfütznner (2008) stieg der Grundwasserspiegel im Bereich des Luchsees und der umgebenden Moore, 30 km südöstlich von Berlin, nach Ersetzen der Kiefer durch Buche um bis zu 0,4 m.

Für die Grundwasserneubildung spielt allerdings neben der vorherrschenden Baumart auch das Baumalter, der Unterwuchs und für Mischwälder der Anteil der verschiedenen Baumarten eine wichtige Rolle. Die Daten von Müller (2002) zeigen einen Rückgang der Tiefenversickerung mit zunehmendem Alter bis zu einem Maximum, das bei der Kiefer bereits mit ca. 30 Jahren, bei der Buche aber erst im Altbestand erreicht wurde (Abb. 9). Die Tiefensickerungsdaten für Kiefer-Buchen-Mischwälder ließen sich allerdings nicht durch einfache Addition der Beiträge der einzelnen Mischungspartner bestimmen (Abb. 9).

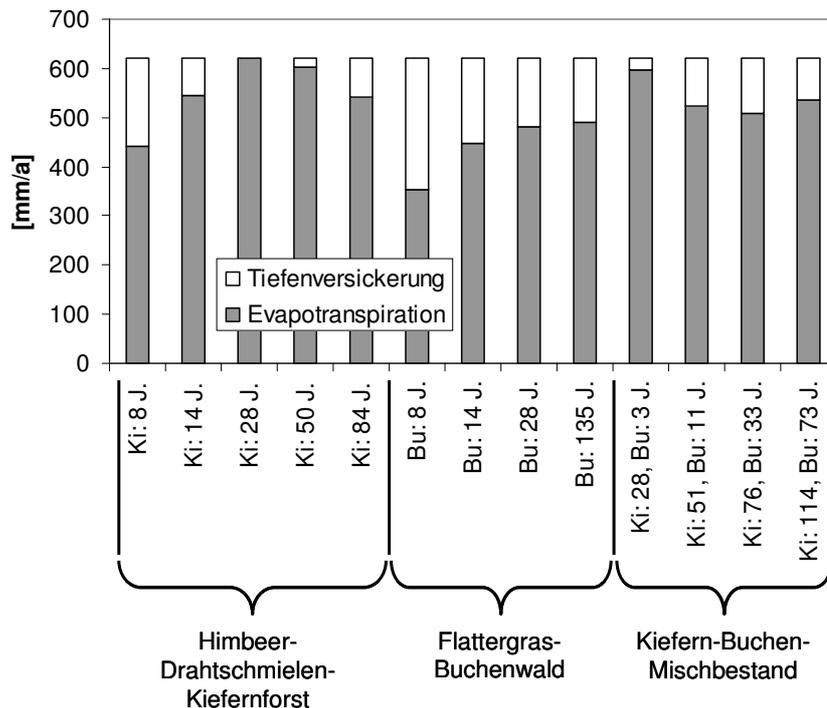


Abbildung 9: Evapotranspiration und Tiefenversickerung verschiedener Waldbestände am gleichen Standort mit einem Jahresniederschlag von 620 mm/a. Angegeben ist das jeweilige Alter der Kiefern (Ki) und Buchen (Bu). Daten: Müller (2002)

Die Altersstruktur der brandenburgischen Kieferwälder ist nicht ausgeglichen, sondern weist heute noch die Spuren der intensiven Nutzung während und nach des Zweiten Weltkrieges und der verstärkten Wiederaufforstung in den darauf folgenden Jahren auf (Müller 2007). Andererseits ist die Altersgruppe bis 19 Jahren unterproportional vertreten, was mit dem forcierten Waldumbau und der Erhöhung des Laubholzanteils zu erklären ist (Müller 2007). Schon alleine aufgrund dieser Alterseffekte würde sich die Grundwasserneubildung der brandenburgischen Wälder bei ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen erhöhen.

Aufgrund der erhöhten atmosphärischen Stickstoffeinträge änderte sich ab Ende der 1970er Jahre die Beschaffenheit des Unterwuchses (Hofmann 1995). Die Ausbildung dichter Grasdecken (Vergrasung) oder Strauchschichten nitrophiler Arten hat mutmaßlich an vielen Standorten sowohl eine Erhöhung der Evapotranspiration als auch der Interzeptionsverdunstung zur Folge gehabt.

Für landwirtschaftlich genutzte Flächen tritt die Bedeutung der atmosphärischen Nährstoffeinträge gegenüber der Düngung zurück. Hier stehen vor allem Stickstoff und Phosphor im Fokus. Aufgrund der überwiegend stark reduzierenden Verhältnisse in den tieferen Grundwasserleitern (Landesumweltamt Brandenburg 2007) und der damit verbundenen Denitrifizierung spielt der tiefe Grundwasserpfad für die Stickstoffbelastung der Vorfluter nur eine geringe Rolle. Dazu kommen die z. T. sehr hohen Verweilzeiten des Grundwassers von deutlich über 50 Jahren (Merz et al. 2009), die zu einer entsprechenden Verzögerung der Nitratreinträge in die Vorfluter führen.

Entsprechend stammt mehr als die Hälfte der Stickstoffeinträge aus dem deutschen Raum in die Ostsee aus dem Auslauf der Dränagen (Behrendt und Bachor 1998), wogegen der Grundwasserbürtige Anteil 39 % beträgt. Beim Phosphor stammt der größte Teil der diffusen Stoffeinträge mit

38 % aus der Erosion des Oberbodens, während der Anteil des Grundwassers 28 % und der des Drä-nagewässers nur 9 % ausmacht.

4.2.1 Landwirtschaft: Das Konzept des virtuellen Wassers

Wasser ist nicht nur Rohstoff, z. B. für die Produktion von Getränken, sondern auch Produktionsmit-tel. Der Verbrauch von Wasser während des Produktionsverfahrens, z. B. als Kühlwasser, als Reini-gungs- oder Lösungsmittel oder als Reaktionsträger für chemische Verfahren übersteigt dabei in der Regel den Wassergehalt des fertigen Produktes um mehrere Zehnerpotenzen. Das gilt insbesondere für landwirtschaftliche Produkte. Die Erzeugung pflanzlicher Produkte erfordert große Wassermengen, die während des Wachstums von der Pflanze transpiriert werden. In der Regel werden pro kg erzeug-tem pflanzlichen Produkt mehrere 1000 l Wasser benötigt. Für tierische Produkte ist nicht nur der Tränkebedarf der Tiere anzurechnen, sondern auch der Wasserbedarf der jeweiligen Futterpflanzen. In der Regel liegt deshalb der Wasserverbrauch pro kg Fleisch um ca. eine Zehnerpotenz über der vieler pflanzlicher Produkte (Hoekstra et al. 2003, Rockström 2003). Darüber hinaus wird bei der Weiter-verarbeitung landwirtschaftlicher Erzeugnisse wiederum Wasser benötigt. Der gesamte Wasser-verbrauch während der Erstellung eines Produktes, einschließlich des Wassergehaltes des fertigen Produktes, wird als „virtuelles Wasser“ bezeichnet.

Dieses Konzept wurde von Allan (1993, 1994) entwickelt, um den enormen Beregnungsbedarf der landwirtschaftlichen Produktion im Mittleren Osten berücksichtigen zu können. Hier stellt Wasser in der Regel ein äußerst knappes Gut dar. Wird Wasser zur Erzeugung landwirtschaftlicher Produkte verwendet, steht es nicht mehr für andere Zwecke, z. B. die Trinkwasserversorgung der Bevölkerung, zur Verfügung. Dies spielt z. B. für die Produktion von Baumwolle im Mittleren Osten eine große Rolle (Liu et al. 2009), die größtenteils für den Export bestimmt ist. Mit der Baumwolle wird dann eine entsprechend große Menge „virtuellen Wassers“ exportiert, was in volkswirtschaftlichen oder ökosystemaren Bilanzen berücksichtigt werden sollte. Entsprechend ist das virtuelle Wasser in den Bilanzen der importierenden Länder zu berücksichtigen. Die Gesamtmenge des virtuellen Wassers in den importierten oder im Land erzeugten Produkten abzüglich des virtuellen Wassers der exportierten Produkte ergibt dann den „Wasserabdruck“ des jeweiligen Landes.

Im Folgenden soll nur der Wasserverbrauch für die Produktion pflanzlicher Erzeugnisse ohne nachgeschaltete Weiterverarbeitung berücksichtigt werden. Hierbei wird zwischen „Grünem“, „Blau-em“ und „Grauem“ Wasser unterschieden (Liu et al. 2009). Mit Grünem Wasser wird Niederschlags-wasser bezeichnet, das ohne weitere technische Aufwendungen für das Wachstum der Pflanzen zur Verfügung steht. Im Gegensatz dazu steht das Blaue Wasser, das nach Förderung aus Oberflächen- oder Grundwasser zur Bewässerung verwendet wird. Kommt es durch eine angepasste Bewässerung der Pflanzen in kritischen Perioden zu einer überproportionalen Steigerung des Ertrags, sinkt dadurch sogar im Vergleich zur nicht bewässerten Variante der virtuelle Wassergehalt pro kg der erzeugten Produkte (Liu et al. 2007, Rockström 2003). Schließlich kann auch Abwasser als Graues Wasser zur Bewässerung verwendet werden. Dies birgt einerseits hygienische Risiken, andererseits lassen sich damit die im Abwasser enthaltenden Nährstoffe für die pflanzliche Produktion nutzen. Außerdem lässt sich damit auch das Reinigungs- und Stoffabbaupotential des Bodens nutzen.

Die Unterscheidung zwischen „Grünem“, „Blauem“ und „Grauem“ Wasser ist wichtig, da diese Wässer sehr unterschiedliche Opportunitätskosten aufweisen (Liu et al. 2009). Als Opportunitätskos-ten, auch als Alternativkosten, Verzichtskosten oder Schattenpreis bezeichnet, wird der entgangene Nutzen durch etwaige alternative Nutzungen der Ressource bezeichnet. Die Opportunitätskosten sind für Graues Wasser am geringsten: Kann durch die Verregnung von Abwasser eine ansonsten erforder-liche aufwendige technische Reinigung vermieden werden, sind die Opportunitätskosten sogar als negative Werte in der Bilanz anzusetzen. Andererseits sind die Opportunitätskosten für Blaues Wasser als sehr hoch anzusetzen, da dieses Wasser, je nach Qualität, auch zur Trinkwasserversorgung oder für

technische Zwecke verwendet werden kann. Die Opportunitätskosten sind dann anhand des Wasserpreises zu bestimmen, sofern letzterer tatsächlich kostendeckend bestimmt wurde, wie z. B. in der EU-Wasserrahmenrichtlinie gefordert.

Die Opportunitätskosten für Grünes Wasser liegen in der Regel deutlich unter denen des Blauen Wassers. Sie lassen sich z. B. durch Vergleich der Marktpreise und des Wasserverbrauchs verschiedener landwirtschaftlicher Produkte bestimmen. Wird die landwirtschaftliche pflanzliche Produktion mit der Alternative einer forstlichen Nutzung verglichen, dann sind auch die Opportunitätskosten des Grünen Wassers aufgrund des höheren Transpirationsbedarfs von Wäldern mit negativen Zahlenwerten anzusetzen.

Daraus wird bereits deutlich, dass die praktische Umsetzung dieses zunächst sehr elegant wirkenden Konzeptes nicht trivial ist. Der Wasserbedarf landwirtschaftlicher Kulturen wird sehr stark von den jeweiligen klimatischen Bedingungen bestimmt und variiert deshalb örtlich stark. Er ist in ariden und semiariden Gebieten per se deutlich höher als in den humiden mittleren Breiten. Diese Abhängigkeiten sind für zeitliche Extrapolationen im Rahmen des Klimawandels zu berücksichtigen.

Des Weiteren spielt die Wasserspeicherung des Bodens eine große Rolle. Ein Sandboden ist wesentlich weniger als ein Lehmboden in der Lage, die zwischen zwei Niederschlagsereignissen von der Pflanze benötigte Wassermenge zur Verfügung zu stellen. Böden, die stark zu präferentiellem Fließen neigen, wie z. B. sehr tonige Böden mit ausgeprägten Trockenrissen, können ebenfalls das Wasser v. a. bei Starkniederschlägen nur schlecht zurückhalten. Somit spielt auch die zeitliche Verteilung der Niederschläge unter Umständen eine große Rolle. Für die Berechnung des virtuellen Wassers wird der Wasserverbrauch in Relation zum Ertrag gesetzt. Letzterer hängt wiederum von der verwendeten Pflanzensorte, dem Düngungsniveau sowie von dem Krankheits- und Schädlingsbefall ab. Schließlich sind hierfür auch Ernte- und Lagerverluste zu berücksichtigen (Liu et al. 2007, Hoekstra und Hung 2002). Jede quantitative Abschätzung auf größerer Skala kann deshalb nur als grobe Approximation verstanden werden. In der Regel werden hierfür Ertragsmodelle verwendet, die aufgrund der limitierten Datenbasis von groben Vereinfachungen ausgehen müssen.

Folglich unterscheiden sich die Angaben verschiedener Autoren, oder sogar der gleichen Autoren in verschiedenen Studien, zum Teil deutlich. Beispielsweise differieren die Angaben des Transpirationswasserverbrauchs für Weizen und Gerste in Deutschland z. T. um mehr als 150 mm pro Jahr (Abb. 10). Dies ist umso bemerkenswerter, als die beiden Studien im Abstand von lediglich zwei Jahren veröffentlicht wurden und einer der jeweils zwei Autoren identisch ist. Die Unterschiede zwischen den beiden Studien für jeweils die gleichen Feldfrüchte liegen in der gleichen Größenordnung wie die Unterschiede zwischen verschiedenen Kulturarten innerhalb der gleichen Studie. In der Zusammenstellung von Hoekstra (2003) variieren die Angaben, z. B. für Mais, um mehr als das Vierfache. Allerdings sind die dort aufgeführten Zahlenwerte für unterschiedliche Regionen berechnet worden und nur sehr eingeschränkt miteinander vergleichbar.

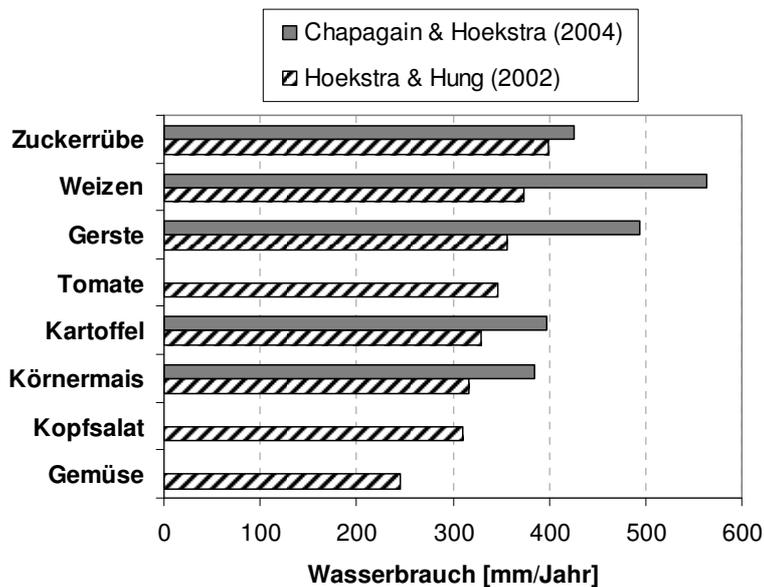


Abbildung 10: Angabe des Transpirationswasserverbrauches verschiedener Kulturarten in Deutschland nach Angabe von Chapagain und Hoekstra (2004) bzw. Hoekstra und Hung (2002)

Die Unterschiede zwischen verschiedenen Kulturarten sind zu einem großen Teil durch die unterschiedliche Dauer der Wachstumszeit bedingt. Damit erklärt sich der geringe Wasserbedarf von Gemüse und Kopfsalat einerseits und der hohe Wasserverbrauch durch Zuckerrüben andererseits (Abb. 10). Andererseits spielen hier auch physiologische Unterschiede eine Rolle. Beispielsweise ist der Wasserverbrauch des Maises als C₄-Pflanze relativ gering, da diese nachts über die Stomata aufgenommenes CO₂ tagsüber weiter assimilieren kann. Im Gegensatz dazu sind die in Mittel- und Nordeuropa vorherrschenden C₃-Pflanzen darauf angewiesen, ihre Stomata tagsüber während des maximalen Transpirationswasserbedarfes zur Aufnahme und Assimilation von CO₂ zu öffnen.

Die Angaben für den Wasserverbrauch verschiedener Getreidearten, zusammengestellt von Rockström (2003), variieren teilweise bis um das Fünffache (Abb. 11). Nach Angaben des Autors gibt es dabei aber keine systematischen Unterschiede zwischen den verschiedenen Klimazonen. Der höhere Verdunstungsanspruch der Atmosphäre in den trockeneren Regionen wird dem Autor zufolge durch höhere Wachstumsraten kompensiert. Ein hoher spezifischer Wasserverbrauch geht mit niedrigen Erträgen einher und ist bedingt durch hohe unproduktive Verdunstung z. B. in lückigen Beständen oder durch Ernteaufälle, die durch Trockenstress in der Endphase des Wachstums verursacht werden. Für hohe Erträge konvergiert der spezifische Wasserverbrauch dagegen auf relativ niedrige Werte von ca. 1300 l/kg. Dieser Wert ist für die verschiedenen Klimazonen quasi identisch. Der Autor kommt zu der Schlussfolgerung, dass bei optimiertem Management global ca. 1500 l Regenwasser zur Produktion eines Kilogramms Getreide benötigt wird, entsprechend 150 mm t⁻¹ ha⁻¹. Damit ergibt sich global ein Pro-Kopf-Verbrauch zur Erzeugung der benötigten Lebensmittel von 1300 m³/Jahr.

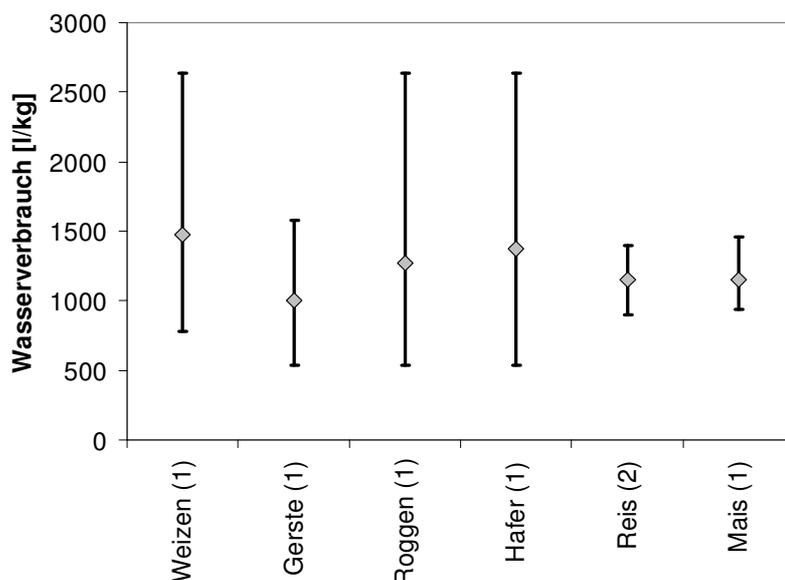


Abbildung 11: Wasserverbrauch nicht bewässerter Kulturen pro kg Getreide (Mittelwerte und Spannweiten; nach Rockström 2003). Angaben für Reis und Mais für tropische Gebiete, ansonsten für die mittleren Breiten. Datenquellen: (1) Rockström et al. 1999; (2): Doorenboos und Kassam (1986)

Liu et al. (2009) erstellten auf der Basis eines Ertragsmodells globale Bilanzen des virtuellen Wassers in pflanzlichen Produkten. Demnach sind lediglich 10 Länder für 94 % des globalen virtuellen Wasser-Exportes verantwortlich. An erster und zweiter Stelle stehen dabei die USA und Kanada. Von den europäischen Ländern stehen Frankreich an 4., die Ukraine an 6. und Ungarn an 10. Stelle. Beim Import, bezogen auf die Bevölkerungszahl, stehen weltweit die Niederlande und Belgien an erster Stelle, bedingt durch den hohen Futtermittelimport für die eigene Fleischproduktion.

Nach ihren Berechnungen wird global 81 % des Wasserbedarfs für die pflanzliche Produktion durch Regenwasser abgedeckt. Dies entspricht annähernd dem Wert von 85 %, der von Rost et al. (2008) ermittelt wurde. Für die global gehandelten Marktfrüchte beträgt dieser Anteil nach ihren Angaben sogar 94 %. Tatsächlich ist Bewässerung auf 20 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche beschränkt (Rockström 2003). Der Anteil des Blauen Wassers ist nach Angabe von Liu et al. (2009) vor allem in den Weststaaten der USA, im Mittleren Osten, Nordafrika und Ost-China besonders hoch. Für die meisten europäischen Länder, sowie z. B. für Kanada, Brasilien oder Australien lag der Anteil des Grünen Wassers dagegen bei über 90 %. Von den 17 von ihnen untersuchten Marktfrüchten wies Baumwolle mit 56 % den geringsten Anteil Grünen Wassers auf, gefolgt von Reis mit 67 %. Allerdings weisen die Autoren darauf hin, dass ihr Ansatz den Anteil Blauen Wassers in Regionen mit hohem Anteil privat organisierter Bewässerungssysteme aufgrund der fehlenden Daten eher unterschätzt. Andererseits sehen die Autoren noch ein großes, bisher nur unzureichend genutztes Potential in Methoden der Bewirtschaftung von Regenwasser für die landwirtschaftliche Produktion, z. B. durch „Rainwater Harvesting“.

Nach Einschätzung verschiedener Autoren gehört Deutschland zu den Netto-Importeuren virtuellen Wassers in pflanzlichen Produkten. Allerdings variieren die angegebenen Zahlenwerte je nach Autoren stark. Hoekstra und Hung (2002) und Chapagain und Hoekstra (2003) geben Werte von 12,2 bzw. 13,1 Mio. m³/Jahr an. Dagegen kommen Zimmer und Renault (2003) lediglich auf einen Wert von 1 Mio. m³/Jahr, trotz annähernd doppelt so hoher Bruttomengen importierten und exportierten virtuellen Wassers im Vergleich zu Chapagain und Hoekstra (2003).

Der Gesamtverbrauch virtuellen Wassers einschließlich tierischer Produkte wird von Sonnenberg et al. (2009) mit 117,6 Mio. m³/Jahr angegeben. Dies macht nach ihren Berechnungen 73,3 % des gesamten Wasser-Abdrucks Deutschlands aus, während die restlichen 26,3 % auf industrielle Produkte und den Wasserverbrauch der Haushalte entfallen. Von den landwirtschaftlichen Produkten wird ca. die Hälfte des virtuellen Wassers importiert. Die größten Mengen entfallen dabei auf Kaffee, Kakao, Ölsaaten, Baumwolle, Schweinefleisch, Sojabohnen und Rinderfleisch. Von den Lieferanten virtuellen Wassers in landwirtschaftlichen Produkten nimmt Brasilien den ersten Platz ein, gefolgt in absteigender Reihenfolge von der Elfenbeinküste, Frankreich, den Niederlanden und den USA.

4.2.2 Anwendbarkeit des Konzeptes auf die Region Brandenburg-Berlin

Wasser ist auch in Brandenburg ein knappes und voraussichtlich im Zuge des Klimawandels sich weiter verknappendes Gut. Es liegt deshalb nahe, das Konzept des Virtuellen Wassers zur Bewertung der aktuellen Landnutzung und für die Entwicklung und Überprüfung alternativer Konzepte der Landnutzung heranzuziehen.

In der praktischen Anwendung ist allerdings die große Spannbreite der in der Literatur angegebenen Zahlenwerte zu berücksichtigen. Diese ist einerseits bedingt durch die unsichere Datenbasis, insbesondere für globale Abschätzungen, andererseits aber auch durch die unterschiedlichen zugrunde gelegten Annahmen. Der Gehalt virtuellen Wassers wird entscheidend durch die Wirtschaftsweise bestimmt. Optimale Düngung, Pflanzenschutz sowie Maßnahmen zur Minimierung der unproduktiven Verdunstung, z. B. durch Mulchsaat oder durch Anlage von Windschutzhecken, können den Gehalt virtuellen Wassers zum Teil drastisch erniedrigen. Dabei ist für Brandenburg auch zu berücksichtigen, dass ein nicht unwesentlicher Teil der Evapotranspiration auf die anbaubedingten Brachezeiten entfällt. Werden diese Perioden stattdessen z. B. für den Anbau von marktfähigen Zwischenfrüchten genutzt, lässt sich damit der virtuelle Wassergehalt der erzeugten Produkte verringern.

Unberücksichtigt bleibt bei den Berechnungen in der Regel auch die starke Abhängigkeit der Zahlenwerte von Extremereignissen wie Hagelschlag, Starkregen oder Schädlings- und Krankheitsbefall, deren Häufigkeit wiederum im Zuge des prognostizierten Klimawandels vermutlich zunehmen wird. In der wissenschaftlichen Praxis wird deshalb die Notwendigkeit der Verwendung dynamischer Ertragsmodelle für konkrete Einzelfälle und bestimmte Klima- und Landnutzungsszenarien gesehen (Natkhin 2010).

Das Konzept des virtuellen Wassers wurde ursprünglich für Kulturen im Bewässerungslandbau entwickelt, für die der natürliche Niederschlag nur eine untergeordnete Rolle spielt. Für diese Fälle lässt sich der Wasserverbrauch recht exakt bestimmen bzw. steuern. Außerdem sind die Opportunitätskosten des Blauen Wassers sehr hoch. In Brandenburg rentiert sich eine Berechnung aus betriebswirtschaftlicher Sicht momentan aber nur für ausgesuchte Kulturen mit hohem Qualitätsanspruch, z. B. für Kartoffeln für die Chips-Produktion. Daran wird sich vermutlich auch in den nächsten 20 Jahren nichts Wesentliches ändern (Wechsung et al. 2008).

Wasser, das zur Beregnung genutzt wurde und evapotranspiriert wird, geht lokal dem Grundwasser und/oder Oberflächengewässer verloren. De facto wird dadurch aber die Niederschlagsbildung andernorts erhöht (Rockström 2003), anders als die Verwendung des Begriffs „Verbrauchs“ suggeriert. Dies gilt aber nur auf relativ großer Raumskala, wie folgende Überschlagsrechnung zeigt: Die mittlere Verweilzeit des Wasserdampfes in der Atmosphäre beträgt ca. 10 Tage (Häckel 1999). Der Median der bodennahen Windgeschwindigkeit in Müncheberg von Oktober 1999 bis September 2009 betrug 2,3 m/s. Dies würde rein rechnerisch zu einem Transport des durch Evapotranspiration in Brandenburg freigesetzten Wasserdampfes um ca. 2000 km, also z. B. ca. 400 km östlich von Moskau, führen. Aus Brandenburger Sicht ist also tatsächlich evapotranspiriertes Wasser als Verlust anzusehen. Brandenburg würde demnach auch nicht merklich von erhöhten Bewässerungsraten in Westeuropa profitieren.

Weniger eindeutig verhält es sich mit dem Grünen Wasser. Hier sind die Opportunitätskosten sehr gering. Wird die landwirtschaftliche mit der forstlichen Produktion verglichen, sind die Opportunitätskosten für erstere aufgrund der höheren Evapotranspiration der Waldbestände sogar negativ. Ähnlich verhält es sich mit der Verwendung Grauen Wassers. Aus hygienischen Gründen wird eine Nutzung ungereinigten Abwassers zur Erzeugung von Lebensmitteln in Deutschland, anders als in vielen anderen Ländern der Welt, zwar abgelehnt. Es spricht aber viel dafür, das gereinigte Abwasser nicht wie bisher in größere Vorfluter einzuleiten und somit schnellstmöglich aus der Landschaft abzuführen. Sowohl das Wasser als auch die darin noch enthaltenden Nährstoffe lassen sich bei Ausbringung auf landwirtschaftliche Flächen nutzen. Auch in diesem Falle wären die Opportunitätskosten als negative Werte anzusetzen, da damit die Eutrophierung der Vorfluter verringert werden könnte.

Für den einzelnen Landwirt spielt virtuelles Wasser keine Rolle. Für ihn ist stattdessen der Deckungsbeitrag ausschlaggebend, der wiederum von den stark schwankenden Marktpreisen für die landwirtschaftliche Produkte und die aufgewendeten Betriebsmittel bestimmt wird. Die Verwendung von Beregnungswasser wird entsprechend von dem zu erwartenden Mehrertrag in Relation zum Preis der Beregnung bestimmt. Wird der Wasserpreis, wie von der EU-Wasserrahmenrichtlinie gefordert und in Deutschland üblich, kostendeckend bestimmt, lässt sich hierüber die Verwendung Blauen Wassers steuern.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Konzept des virtuellen Wassers für die Bewertung des Bewässerungslandbaus im globalen Kontext eine wichtige Rolle spielt. Für die Bewertung und Steuerung der Landnutzung in der Region Brandenburg-Berlin wird es aber aufgrund der notwendigerweise sehr pauschalen Herangehensweise des Konzeptes und der geringen Bedeutung der Bewässerung in dieser Region als wenig hilfreich angesehen.

4.2.3 Landwirtschaftliche Bewässerung in Brandenburg

Bedingt durch die niedrigen Niederschlagsraten, die hohe sommerliche Temperatur und damit auch die hohen Evapotranspirationsraten spielte die landwirtschaftliche Bewässerung vor allem in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts in Ostdeutschland eine wesentlich größere Rolle als in Westdeutschland. Dazu kommen die z. B. in Brandenburg überwiegenden sandigen Böden mit geringer Speicherkapazität.

Die Bewässerung erfolgte entweder über Beregnung oder in Form der Staubebewässerung in ausgedehnten Niederungen. Diese Form der Bewässerung war vor allem in den ausgedehnten Niederungen im Gebiet des heutigen Brandenburgs sehr verbreitet. Die Stauhaltung hatte zum Ziel, einerseits im Frühjahr die hohen Grundwasserstände frühzeitig abzusenken, um eine rechtzeitige Befahrung und Bewirtschaftung der Flächen zu ermöglichen. Im Sommer wurden dagegen die Grundwasserstände durch Staue in den Vorflutern künstlich hoch gehalten oder durch Einleitung von Flusswasser erhöht, um über den Kapillaraufstieg im Boden die Pflanzen optimal mit Wasser zu versorgen. Dieses Verfahren weist gegenüber der Beregnung deutlich geringere Betriebs- und Opportunitätskosten auf, da einerseits der energetische Aufwand für die Förderung des Wassers wesentlich geringer ist und andererseits für die Beregnung oft Grundwasser recht hoher Qualität verwendet wurde, das auch z. B. als Trinkwasser hätte genutzt werden können.

Auch hinsichtlich der ökologischen und hydrologischen Auswirkungen sind die Verfahren unterschiedlich zu bewerten. Bei der Staubebewässerung führte zumindest die sommerliche Anhebung des Grundwasserstandes dazu, dass die Mineralisierung der in den Niederungen verbreiteten Niedermoore zumindest gehemmt wurde. Dennoch waren die Flurabstände trotz des sommerlichen Einstaus gegenüber den natürlichen Verhältnissen in den Niedermooren deutlich erhöht, da sonst keine Bewirtschaftung möglich gewesen wäre. Trotz der optimierten Wasserversorgung der landwirtschaftlichen Kulturen war die Evapotranspiration von diesen Flächen aufgrund der von den Ackerkulturen kürzeren genutzten Vegetationszeit und der eher geringeren Vegetationshöhen z. B. im Vergleich zu einem

Schilfbestand geringer als von einem Niedermoor auf dem gleichen Standort zu erwarten gewesen wäre. Dies wird bei der gegenwärtigen Diskussion um die Wiedervernässung der Niederungen oft nicht genügend beachtet.

Simon (2009) gibt einen recht umfassenden Überblick über die landwirtschaftliche Bewässerung in der damaligen DDR. Die nachfolgend zitierten Zahlen stützen sich im Wesentlichen auf diese Arbeit. Im Zuge der Bestrebungen der DDR, hinsichtlich der landwirtschaftlichen Produktion möglichst autark zu werden, wurden ab den 1960er Jahren die landwirtschaftlichen Bewässerungsflächen massiv ausgeweitet. Dazu wurden in den Jahren 1965, 1976 und 1983 jeweils umfangreiche Bewässerungsprogramme aufgelegt. Von 1960 bis 1980 nahm der Anteil der Bewässerungsflächen fast linear zu. In den 1980er Jahren schwächte sich das Wachstum dann deutlich ab. Insbesondere bei der Staubewässerung war ab 1985 kaum noch ein Zuwachs zu verzeichnen. Die gut geeigneten Flächen waren bis dahin bereits erschlossen, und eine weitere Ausweitung hätte große Aufwendungen und einen hohen Arbeitsaufwand erfordert. Dazu kamen Engpässe im Baubereich, der Mangel technischer Ausrüstungen, fehlende Arbeitskräfte und fehlende ökonomische Anreize für die landwirtschaftlichen Produktionsgenossenschaften (LPG).

Insgesamt wurden 1989 18,6 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche, bzw. 10,6 % der Landesfläche der DDR bewässert. Davon wurden 5359 km² beregnet (8,7 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche) und auf 6149 km² (9,9 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche) eine Staubewässerung durchgeführt. Nach der Wende nahm der Anteil der Bewässerungsflächen sehr schnell wieder ab. Im Jahre 2002 wurden beispielsweise nur noch 18 % der vormaligen Beregnungsflächen weiterhin bewässert. Aufgrund der ökonomischen Umstellung lohnte sich eine Fortführung der Bewässerung nur noch in wenigen Fällen. Dafür waren gestiegene Personalkosten, der Preisdruck bei landwirtschaftlichen Produkten aufgrund der Öffnung der Märkte, aber auch die ansonsten erforderlichen hohen Instandhaltungs- und Wartungskosten verantwortlich. Heute wird in Brandenburg nur vereinzelt eine Beregnung durchgeführt.

Der Bedarf an Bewässerungswasser wird für das Jahr 1989 mit 1,76 Mia m³/a angegeben (Simon 2009). Für die Genehmigung der Klarwasserberegnung wurden in Normaljahren 75–100 mm/a angesetzt, in Trockenjahren 120 mm/a. Für die Staubewässerung wurde der zusätzliche Wasserbedarf mit 180 bis 200 mm/a berechnet. Ein großer Teil des Wasserbedarfs wurde durch Entnahme aus den großen Vorflutern gedeckt. So wurden 1987 aus der Oder 91,4 Mio. m³ für die Bewässerung entnommen. Allerdings wurde auch kommunales Abwasser oder mit Klarwasser verdünnte Gülle verregnet. In Brandenburg war dies 1986 auf 14 % bzw. 12 % der Beregnungsfläche der Fall (Simon 2009).

Der Anteil der Bewässerungsflächen an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche war mit 38,5 % und 33,6 % in den Bezirken Potsdam und Cottbus der größte. Davon entfiel allerdings jeweils der weitaus größte Anteil auf die Staubewässerung (31,2 % bzw. 21,7 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche) in den ausgedehnten Niederungsgebieten (Tab. 3).

Tabelle 3: Großräumige Bewässerungsgebiete der DDR im Gebiet des heutigen Brandenburgs (nach Simon 2009)

| Gebiet | Wasserentnahme aus | Fläche | Art der Bewässerung |
|--|---------------------------|---------------------|----------------------------|
| Rhinluch und Havelländisches Luch | Oberer Rhin | 350 km ² | Staubewässerung, Beregnung |
| Peene-Süd-Kanal mit Friedländer Großer Wiese | Peene, Zarow | 300 km ² | Staubewässerung, Beregnung |
| Oderbruch | Oder | 140 km ² | Beregnung |
| Dossespeicher Kyritz mit Dosse-, Jäglitz- und Rhingebiet | Unterer Rhin | 124 km ² | Staubewässerung, Beregnung |
| Havelländisches Obstanbaugebiet | Havel | 120 km ² | Beregnung |

4.3 Öffentliche Wasserversorgung

In der öffentlichen Wahrnehmung ist die Wasserversorgung der Bevölkerung sicherlich einer der wichtigsten Aspekte des Landschaftswasserhaushaltes. Hier ergeben sich naturgemäß gravierende Unterschiede zwischen dem dicht besiedelten urbanen Raum Berlins und seines Umlands auf der einen Seite und den dünn besiedelten Regionen Brandenburgs auf der anderen Seite. Im Folgenden dienen die Daten zur öffentlichen Wasserversorgung, wie sie vom Statistischen Bundesamt (2009) veröffentlicht wurden, als Grundlage. Damit wird der Wasserverbrauch zwar leicht unterschätzt, da private Entnahmen z. B. durch eigene Brunnen damit nicht erfasst werden. Angesichts eines Anschlussgrades der privaten Haushalte in Brandenburg und Berlin von über 98 % erscheint diese Differenz als vernachlässigbar. Allerdings werden in diesen Zahlen auch die Förderungen einzelner größerer Gewerbebetriebe nicht berücksichtigt.

Der auf die Einwohnerzahl bezogene Wasserverbrauch der privaten Haushalte in Brandenburg ist im Vergleich der deutschen Länder niedrig. Dies gilt generell für die neuen Bundesländer und wird einerseits auf die umfassenden Sanierungen der Wasserversorgungsanlagen und der Haustechnik, andererseits aber auch auf die massiv angestiegenen Wasserpreise v. a. in den 1990er Jahren zurückgeführt (Statistisches Bundesamt 2009). Im Gegensatz dazu ist der Wasserverbrauch der Haushalte in Berlin, ähnlich wie in den anderen Stadtstaaten, im oberen Bereich angesiedelt. Wird darüber auch der Verbrauch größerer Gewerbebetriebe etc. berücksichtigt, vergrößert sich die Differenz zwischen Brandenburg und Berlin aufgrund des höheren Anteils des produzierenden Gewerbes weiter (Tab. 4). Daraus ergibt sich ein Gesamtwasserverbrauch pro Kopf von 118 l/d in Brandenburg, und 152 l/d in Berlin.

Tabelle 4: Daten zur Öffentlichen Wasserversorgung in Brandenburg und Berlin im Jahr 2007. Quellen: Statistisches Bundesamt (2009), (1): MGUV (2009), sowie eigene Berechnungen

| | Brandenburg | Berlin | Einheit |
|--|--------------------|---------------|------------------------------|
| Fläche | 29.480 | 891 | km ² |
| Einwohnerzahl | 2.536.000 | 3.416.000 | Einwohner |
| | | | |
| Gesamtwasserabgabe an Verbraucher | 109 | 189 | Mio. m ³ /a |
| entspricht Pro-Kopf-Verbrauch | 118 | 152 | l/d pro Einwohner |
| Wasserabgabe an Haushalte und Kleingewerbe | 90 | 138 | Mio. m ³ /a |
| entspricht Pro-Kopf-Verbrauch | 100 | 112 | l/d pro Einwohner |
| | | | |
| Grundwasserneubildungsfläche für Gesamtwasserverbrauch: | 1.267 | 2.198 | km ² |
| entspricht Pro-Kopf-Verbrauch | 500 | 643 | m ³ pro Einwohner |
| entspricht Anteil der Landesfläche | 4,3 | 246,7 | % |
| | | | |
| Wasserschutzgebiete⁽¹⁾ | 1.664 | | km ² |
| entspricht Anteil der Landesfläche | 5,6 | | % |

Diese Zahl lässt sich in Beziehung zur Fläche, die für die jeweilige Grundwasserneubildung erforderlich ist, setzen. Hierbei wurde die mittlere Grundwasserneubildungsrate von 86 mm/a, die Lahmer und Pfützner (2003) für die gesamte Region Brandenburg und Berlin bestimmt haben, angesetzt. Demnach beträgt der „hydrologische Fußabdruck“ ohne Berücksichtigung virtuellen Wassers in Brandenburg

500, und in Berlin 643 m² pro Einwohner (Tab. 4). Bezogen auf die jeweilige Gesamtfläche entspricht dies in Brandenburg 4,3 % der Landesfläche und ist somit etwas niedriger als der tatsächlich als Wasserschutzgebiet ausgewiesene Anteil der Landesfläche. Die Wasserversorgung der Stadt Berlin benötigt dagegen rein rechnerisch annähernd das Zweieinhalbfache der Landesfläche (Tab. 4). Die Wasserversorgung der Stadt Berlin kann also nur dank massiver Importe, überwiegend in Form von Flusswasser aus Spree und Havel, gewährleistet werden. Zusammengerechnet wird somit ein Anteil von 11,4 % der Fläche von Berlin und Brandenburg für die öffentliche Wasserversorgung benötigt.

In Brandenburg wie auch in Berlin und generell im gesamten Bundesgebiet nimmt der Wasserverbrauch aktuell, wenn auch nur noch langsam, weiter ab. Dies hat inzwischen in vielen Regionen zu Problemen geführt, da die Ver- und Entsorgungsleitungen für den aktuellen Verbrauch überdimensioniert sind. Für Berlin schlägt hierbei zusätzlich noch das für die Konzipierung der Anlagen nach der Wende deutlich überschätzte Stadtwachstum, und für Brandenburg der in vielen Regionen zu verzeichnende Bevölkerungsrückgang zu Buche. Inzwischen werden verbreitet Ver- und Entsorgungsleitungen regelmäßig mit Trinkwasser gespült, um der Verkeimung entgegenzuwirken. Dieser „unproduktive“ Verbrauch der Ressource Trinkwasser ist immer noch kostengünstiger als der Rückbau der Leitungen.

Der Abwasseranfall entspricht bundesweit in etwa dem Wasserverbrauch (Statistisches Bundesamt 2009). Zwar wird einerseits tatsächlich Wasser „verbraucht“, z. B. bei Verwendung zur Gartenbewässerung, oder durch Leckagen im Leitungssystem. Andererseits wird dem Abwasser in Mischkanalisations-Systemen Niederschlagswasser aus der Stadtentwässerung beigefügt. Korrekterweise müsste deshalb eher vom Wassergebrauch als vom Wasserverbrauch die Rede sein. Allerdings ist damit auch eine räumliche Verlagerung verbunden, da Trinkwasser zum größten Teil aus dem tieferen Grundwasser gefördert wird, das Abwasser aber anschließend in großer Entfernung in die Vorfluter eingespeist wird. Damit werden erhebliche Wassermengen gerade an den besonders sensiblen grundwassernahen Ökosystemen oberhalb der Vorfluter vorbeigeleitet.

Sowohl hinsichtlich der Herkunft des Trinkwassers als auch der Entsorgung des gereinigten Abwassers unterscheiden sich Brandenburg und Berlin erheblich. In Brandenburg erfolgt sie überwiegend aus tieferen Grundwasserleitern. Dafür sind momentan ca. 540 Trinkwasserschutzgebiete ausgewiesen (MGUV 2009). Viele dieser Schutzgebiete wurden durch die Kreis- und Bezirkstage der DDR festgesetzt und wurden oder werden aktuell überprüft, die Schutzgebietsgrenzen an neue Kenntnisse und die veränderten Förderraten angepasst oder die Schutzgebietsauflagen neu formuliert. Viele Schutzgebiete wurden bereits oder werden voraussichtlich im Zuge der Zentralisierung der Wasserversorgung aufgelöst. Dies bedingt wiederum deutlich längere Leitungstrecken. Beispielsweise wurde die eigene Wasserversorgungsanlage der Stadt Müncheberg nach der Wende stillgelegt. Die Stadt wird inzwischen vom 12 km entfernten Wasserwerk Neuhardenberg versorgt. In Neuhardenberg wird auch das Müncheberger Abwasser aufbereitet und in den Vorfluter eingespeist.

Für die Trinkwasserversorgung in Brandenburg werden bevorzugt die tieferen Grundwasserstockwerke genutzt. Verbreitet handelt es sich hierbei um den Grundwasserleiterkomplex 2 (GWLK 2), der von dem überlagernden GWLK 1 durch mächtige Mergel- oder Tonschichten getrennt ist. Damit sind die genutzten Grundwasserressourcen gut gegen von der Oberfläche eingetragene Schadstoffe geschützt. Oft handelt es sich dabei um gespannte Grundwasserkörper. Der im Grundwasser enthaltene Sauerstoff wird durch Oxidation, beispielsweise von natürlich vorhandenen Pyriten oder organischer Substanz, aufgebraucht. Im Zuge dessen wird auch Nitrat durch Denitrifizierung abgebaut. Tatsächlich liegen die Nitratgehalte in den Grundwassermessstellen des Brandenburger Messnetzes zum größten Teil nahe oder unterhalb der Bestimmungsgrenze (Landesumwelt Brandenburg 2007). Damit unterscheidet sich die Situation in Brandenburg grundlegend von den ähnlich landwirtschaftlich intensiv genutzten Regionen beispielsweise in weiten Teilen Niedersachsens.

Die Wasserversorgung der Stadt Berlin erfolgt dagegen zu ca. drei Viertel durch Uferfiltrat aus Spree und Havel. Zwar gab es seit Beginn der zentralen Wasserversorgung in Berlin 1856 Phasen, in denen Seewasser direkt verwendet wurde. Inzwischen erfolgt die Trinkwasserversorgung aber über Brunnengalerien in Nähe der großen Berliner Flusseen, die überwiegend Seewasser nach Passagen des ufernahen Grundwasserleiters fördern. Mit dem Rückgang des Wasserverbrauchs nach der Wende um ca. die Hälfte wurden etliche kleinere Wasserwerke stillgelegt, die z. T. in größerer Entfernung von den Vorflutern Wasser förderten (Bärthel 1997).

Abwasser wurde nach dem Aufbau eines zentralen Entwässerungssystems durch James Hobrecht 1876 unbehandelt auf Rieselfeldern ausgebracht. Bis 1915 wurden dafür 18.000 ha Land von der Stadt im peripheren Bereich gekauft und als Rieselfelder genutzt. Das entspricht 20 % der heutigen Stadtfläche. Abzüglich des auf die Evapotranspiration entfallenden Anteils gelangte dieses Wasser über den Grundwasserpfad letztendlich zurück in die Berliner Vorfluter. Allerdings wurde bereits 1905 das erste Berliner Klärwerk in Wilmersdorf gebaut und sukzessive der Anteil des in Klärwerken aufbereiteten Abwassers gesteigert. Nach der Wende wurden die letzten Rieselfelder stillgelegt. Inzwischen wird ein kleiner Teil des Abwassers nach erfolgter Reinigung experimentell zur Stützung des Landschaftswasserhaushaltes verwendet. Der Rest wird direkt in die Berliner Vorfluter eingeleitet. Im Mittel beträgt der Anteil gereinigten Abwassers im Abfluss der Havel beim Verlassen des Berliner Stadtgebietes 13,6 %, im Teltow-Kanal vor Mündung in den Griebnitzsee sogar 28 % (U. Dünnbier, mündliche Mitteilung). In trockenen Sommern liegt dieser Anteil deutlich höher. Daraus wird deutlich, dass die Berliner Wasserversorgung nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ von den Zuflüssen in Spree und Havel abhängt.

Der Abwasseranfall im inneren Stadtgebiet wird außerdem stark durch die Ableitung von Niederschlagswasser in der hier vorherrschenden Mischkanalisation bestimmt. Bei starken Niederschlägen besteht die Gefahr, dass aufgrund beschränkter Kapazitäten ein Teil des Wassers ungereinigt direkt in die Vorfluter abgeführt werden muss. Dieser Gefahr wurde in den letzten Jahren durch den Bau zahlreicher Regenwasserrückhaltebecken begegnet. Angesichts der im Rahmen des Klimawandels prognostizierten Zunahme von Extremereignissen ist hier aber weiterhin mit Belastungen zu rechnen. Schließlich sei noch darauf hingewiesen, dass in dem Teil Berlins, der im Urstromtal liegt, größere Bauvorhaben nur mittels gezielter Wasserhaltung durchzuführen sind. Das Sumpfungswasser wird in der Regel jeweils direkt in die Vorfluter eingeleitet.

4.4 Bergbau

Obwohl im äußeren Süden des Landes Brandenburg und im angrenzenden Sachsen gelegen, hat der Bergbau im Lausitzer Revier gravierende Auswirkungen auf den Wasserhaushalt großer Teile Brandenburgs und Berlins. Die über einen Zeitraum von fast 100 Jahren erfolgten Einleitungen von Sumpfungswässern aus den Tagebauen in die Spree, einem der beiden Hauptvorfluter des Lausitzer Reviers, haben dort seit den 1960er Jahren zu einer deutlichen Erhöhung des Abflusses in der Spree geführt (Sonntag 2007), die sich vor allem während der Phasen des Niedrigwasserabflusses deutlich bemerkbar machte. Inzwischen allerdings wird zunehmend Wasser aus den Fließgewässern für die Flutung der Tagebaurestseen benötigt.

Für die Förderung der Braunkohle im Lausitzer Tagebau war bzw. ist eine Absenkung des Grundwasserspiegels um bis zu 70 m erforderlich (Sonntag 2007). Das Maximum der Absenkung wurde 1989/1990 erreicht. Nach Auskunft der Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH betrug die Ausdehnung des Absenkungstrichters 1990 1.350 km² (LMBV 2009). Dies würde rechnerisch 4,5 % der Fläche des Landes Brandenburg entsprechen. Allerdings entfällt tatsächlich ein großer Teil davon auf das Land Sachsen. Die für diese Absenkung erforderliche Sumpfung betrug 1990 37 m³/s, was 46 % der gesamten Grundwasserneubildung des Landes Brandenburg entsprechen würde (Grünewald 2003). Das daraus resultierende Grundwasserdefizit wird von LMBV (2009) für das Jahr 1989 mit 7 Mia. m³ angegeben. Wird für die Wiederauffüllung durch

die natürliche Grundwasserneubildung mit einer mittleren Rate von 86 mm/a (Lahmer und Pfützner 2003) auf der Fläche des Absenkungstrichters gerechnet, ergibt sich unter Vernachlässigung lateraler Grundwasserzu- und abströme ein Zeitbedarf von 60 Jahren. Andererseits entspricht das Grundwasserdefizit etwa dem 2,8-fachen der Grundwasserneubildung ganz Brandenburgs. Auch wenn diese Überschlagsrechnungen nur sehr grobe Annäherungen darstellen, wird dadurch doch die Größenordnung deutlich.

Andere Autoren nennen allerdings deutlich höhere Zahlen. Grünewald (2005) und Sonntag (2007) geben eine Ausdehnung des Absenkungstrichters im Jahr 1989 von 2100 km² an. Sonntag (2007) quantifiziert das Wasserdefizit mit 13 Mia. m³, von denen 9 Mia. m³ auf den Porenraum des Aquifers und 4 Mia. m³ auf das Volumen der Tagebaurestlöcher entfallen.

Im Fokus der öffentlichen Aufmerksamkeit stehen die Auswirkungen der Sumpfungmaßnahmen bzw. der Füllung der Tagebaurestlöcher auf den Abfluss der Spree. Im Jahr 1990 wurden im Mittel 3,3 m³/s in die Spree eingeleitet. Zehn Jahre später betragen die Einleitungen nur noch 1,3 m³/s (Sonntag 2007). Sinkende Abflüsse in der Spree stellen eine Gefährdung der ausgedehnten Feuchtgebiete im Spreewald dar, die für den Tourismus und für den Naturschutz eine wichtige Rolle spielen. 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). Andererseits sind die Wasserverluste durch Evapotranspiration aus diesem Feuchtgebiet bei geringem Flurabstand sehr hoch. Koch et al. (2009) rechnen mit einem Verlust von ca. 8 m³/s zwischen dem Zufluss der Spree in den Spreewald und dem Pegel Große Tränke kurz vor dem Erreichen des Stadtgebietes von Berlin.

Die Wasserführung der Spree hat auch für die Unterlieger des Spreewalds eine große Bedeutung. Das Wasserwerk Berlin-Friedrichshagen fördert Uferfiltrat aus dem Müggelsee, der von der Spree gespeist wird. Das Wasserwerk Briesen/Franfurt-Oder deckt seinen Bedarf zu 90 % aus Spreewasser, das infiltriert und nach Passage durch den Bodenfilter genutzt wird (Sonntag 2007). Für Berlin ist eine Mindestwasserführung darüber hinaus 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 ist deshalb eine Mindestwasserführung der Spree am Pegel Große Tränke, bei Erreichen des Stadtgebietes von Berlin, von 8 m³/s vertraglich vereinbart worden. Werden die oben genannten Verdunstungsverluste im Spreewald mit berücksichtigt, bedeutet das, dass während der Vegetationsperiode ein Mindestzufluss von 16 m³/s in den Spreewald gewährleistet werden muss. Dies bereitet angesichts der in den letzten Jahren relativ hohen Verdunstungsraten, der stark gesunkenen Einleitung von Sumpfungswässern und der Wiederauffüllung der Tagebaurestseen und des Grundwasserabsenkungstrichters zunehmend Probleme. Tatsächlich standen beispielsweise im Zeitraum 1997–2001 nur 66 % der noch im Jahr 1996 geschätzten Flutungswassermenge in der Lausitz zur Verfügung (Grünewald und Uhlmann 2004). Es ist deshalb vorgesehen, in den besonders kritischen Phasen im Sommer den Niedrigwasserabfluss durch die Nutzung von Speicherbecken im Bereich der oberen Spree zu stützen. Dafür wurde ein gemeinsames Wasserbewirtschaftungskonzept der Länder Sachsen, Brandenburg und Berlin entwickelt, das mit den Speichern Lohsa II, Bärwalde und Cottbusser See insgesamt 114,2 Mio. m³ Speichervolumen zur Verfügung stellt (Koch et al. 2009). Damit ließe sich der erforderliche Mindestzufluss in den Spreewald von 16 m³/s auch bei völligem Versiegen der Spree über die Dauer von über 80 Tagen aufrecht erhalten. Diese Speicher sind allerdings, anders als geplant, noch nicht in Betrieb genommen worden.

Entsprechend wäre dann die Flutung der Tagebaurestlöcher für die Dauer sommerlicher Trockenperioden und während der jeweils nachfolgenden Phasen der Wiederauffüllung der Speicher auszusetzen. Zu beachten ist allerdings, dass die Flutung der Tagebaurestlöcher nur ca. ein Drittel des Gesamtwasserbedarfes ausmacht und zwei Drittel für die Wiederauffüllung des Grundwasser-Absenkungstrichters benötigt wird. Solange letzteres nicht vollständig erfolgt ist, ist mit deutlich verringerten Schüttungsra-

ten der Fließgewässer innerhalb des Absenkungsgebietes und mit verstärkten Seihwasserverlusten aus den Fließgewässern zu rechnen.

Zusätzlicher Zeitdruck entsteht durch die Versauerungsproblematik. 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, das bei der anschließenden Flutung in Lösung geht und mit dem Grund- und Oberflächenwasser abtransportiert wird. Nach Sonntag (2007) liegen die Sulfatkonzentrationen in den sächsischen Tagebaurestseen bereits heute im Bereich des Grenzwertes im Trinkwasser von 240 mg/l oder deutlich, z. T. bis zum Zehnfachen, darüber. Zwar gelangen diese Wässer nicht direkt in den Abfluss, so dass für die Trinkwassergewinnung aus der Spree keine akute Gefahr besteht. Allerdings werden in einzelnen Fließgewässern, die Sulfatkonzentrationen von über 450 mg/l aufweisen, heute bereits deutliche Korrosionsschäden an älteren Betonbauwerken beobachtet. Für den Pegel Spreewitz an der Landesgrenze Sachsen-Brandenburg wurde ein Grenzwert von 400 mg/l festgelegt, der in maximal 10 % aller Fälle überschritten werden darf. In den letzten Jahren konnte dieses Ziel nicht eingehalten werden (Sonntag 2007).

Generell ist von einer deutlichen Verschärfung der Sulfatproblematik innerhalb der nächsten Jahrzehnte auszugehen. Mit zunehmendem Anstieg des Grundwasserspiegels wird auch mehr kontaminiertes Grundwasser zum Abfluss gelangen. Graupner et al. (2007) gehen, basierend auf großskaligen Modell-gestützten Abschätzungen, davon aus, dass der größte Teil der Sulfatfreisetzung nicht während der Ablagerung, sondern innerhalb der Kippen, und zwar bis in eine Tiefe von ca. 15 m erfolgt, solange das Material nicht wassergesättigt ist. Dies ist verbreitet über Jahrzehnte hinweg der Fall. Von daher ist es geboten, die Auffüllung des Grundwasserleiters so schnell wie möglich erfolgen zu lassen. Andererseits wird versucht, die Tagebaurestlöcher mit unkontaminiertem Oberflächenwasser zu füllen, um einen hydrostatischen Gegendruck gegen die lateral zuströmenden, hochgradig belasteten Grundwässer aufzubauen und eine Versauerung der Tagebaurestseen möglichst zu verhindern (Gröschke et al. 2002, Grünewald und Uhlmann 2004). Teilweise werden in den Restseen allerdings bereits heute pH-Werte von unter 3 gemessen.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass auch ohne klimatische Änderungen die Abflüsse in den Fließgewässern der Lausitz nicht mehr das Niveau der letzten Jahrzehnte erreichen werden. Die Situation wird weiter dadurch verschärft werden, dass mit der Schaffung großer künstlicher Wasserflächen die Verdunstungsverluste deutlich ansteigen werden (Sonntag 2007). Dies wird sich im Zuge zunehmend wärmerer, trockener Sommer, wie von den Klimamodellen für die Region vorhergesagt, noch weiter verstärken.

5 Prognosen

Aus dem bisher Ausgeführten wird deutlich, dass der Landschaftswasserhaushalt in der Region Brandenburg und Berlin wesentlich empfindlicher auf Änderungen der natürlichen und anthropogenen Rahmbedingungen reagiert als in anderen Regionen Deutschlands. Dies ist im Wesentlichen durch die geringen aktuellen Grundwasserneubildungsraten, die oftmals flachgründigen Seen, die verbreiteten Feuchtgebiete und die überwiegend sandigen Böden mit geringer Wasserhaltekapazität bedingt. Tatsächlich sind die Auswirkungen des historischen klimatischen Wandels und der bisherigen anthropogenen Eingriffe deutlich zu erkennen. Umso mehr interessiert die Frage, wie der zu erwartende globale Wandel einschließlich des prognostizierten Klimawandels sich auswirken wird und welche Handlungsoptionen zur Verfügung stehen.

5.1 Modellierung und Skalentransfer

Das gängige Werkzeug zur Abschätzung der Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen auf natürliche Systeme ist die Szenarienrechnung mittels Prozess-basierter Modelle. Dieser Ansatz ist in der Hydrologie wie auch in der Klimatologie weit verbreitet. Die folgenden Ausführungen beziehen sich primär auf hydrologische Modelle. Analoges gilt aber auch für Klimamodelle. Zurzeit wird unter Fachleuten eine intensive Diskussion über die Limitierungen dieser Modell-gestützten Ansätze und über die Unsicherheit der Modellergebnisse geführt. Teilweise wird dabei selbst von führenden Hydrologen (Kirchner 2006, Beven 2001a, Beven 2001b, Klemeš 1986) fundamentale Kritik an den verbreiteten Ansätzen geäußert.

Die Entwicklung von Modellierungsansätzen stützt sich auf die Ergebnisse unzähliger Prozessstudien, die in der Regel auf relativ kleiner Raum- und Zeitskala und unter gut kontrollierten Randbedingungen durchgeführt wurden. In Prozess-basierten Modellen lassen sich die Ergebnisse unterschiedlicher Studien integrieren und zur Abschätzung des hydrologischen Verhaltens auf größeren Raum- und Zeitskalen und im Wechselspiel einer Vielzahl von Einzelprozessen nutzen. Allerdings sind die Modellergebnisse in der Regel mit nicht vernachlässigbaren Unsicherheiten behaftet. Ein Teil dieser Unsicherheit resultiert aus ungenauen oder fehlerhaften Eingangsdaten, wie z. B. des Niederschlags. Eine weitere Quelle der Unsicherheit stellen die Parameterwerte der Modelle, wie z. B. der hydraulischen Leitfähigkeit im Boden oder im Aquifer, dar. Viele dieser Parameter lassen sich entweder gar nicht oder aber nicht in der nötigen räumlichen Auflösung *in situ* messen. Beispielsweise genügt es nicht, für die Modellierung des Wassertransports im Grundwasserleiter die mittlere hydraulische Leitfähigkeit zu kennen. Viel entscheidender ist die räumliche Verteilung und Konnektivität der Zonen hoher hydraulischer Leitfähigkeit. In der Praxis werden deshalb viele Parameter durch inverse Modellierung bestimmt, das heißt, durch systematisches Variieren der Parameterwerte und Vergleich der Modellergebnisse mit beobachteten Zielgrößen wie Grundwasserstand oder Abfluss. Da aber in der Regel jeweils mehrere Parameter anzupassen sind, lassen sich in den meisten Fällen keine eindeutigen Parameterkonstellationen finden: Hohe Werte für einen Parameter können meist durch entsprechende Variation anderer Parameter kompensiert werden (Kirchner et al. 1996, Beven et al. 2001).

Noch gravierender erweist sich aber die Unsicherheit hinsichtlich der gewählten Modellstruktur, das heißt, die Auswahl der als relevant erachteten Prozesse, die verwendeten Algorithmen zur Repräsentation dieser Prozesse und die Art der implementierten Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Prozessen. Dies erfolgt in der Regel nach der subjektiven Einschätzung des Modellierers (Beven 2000). Kirchner et al. (1996) zeigen, dass insbesondere in Kombination mit der Parameterbestimmung

durch inverse Modellierung eine Überprüfung des gewählten Modellansatzes in der Regel nicht mehr möglich ist. Daraus folgt, dass es in vielen Fällen eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Modelle und Parameterwerte mit sehr ähnlichen guten Ergebnissen für einen Testdatensatz gibt (z. B. Refsgaard und Knudsen 1996), diese Modelle für Szenarienrechnungen unter der Annahme geänderter Randbedingungen jedoch sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern (Beven 2001b, Uhlenbrook et al 1999).

Das Problem der Übertragbarkeit von Ergebnissen aus kleinskaligen Prozessstudien auf die Modellierung auf großer Skala wird in der Hydrologie oft als „Skalierung“ oder „Skalentransfer“ bezeichnet (Blöschl und Sivapalan 1995, Blöschl 2001). Damit ist aber in der Regel genau das Gegenteil von dem gemeint, was in großen Teilen der Physik unter „Skalierung“ gemeint ist. Letztere bezeichnet Phänomene als skalierend, die auf verschiedenen Skalen mit den gleichen Algorithmen bzw. unter Berücksichtigung eines Skalengesetzes beschrieben werden können. Als Beispiel seien fraktale Muster genannt, die auf verschiedenen Skalen jeweils die gleichen (statistischen) Eigenschaften aufweisen. Im Gegensatz dazu sprechen Hydrologen in der Regel von Skalierung, wenn die steuernden Faktoren skalenabhängig sind. Beispielsweise wird der Wassergehalt in einem Waldboden auf der Skala 10^{-3} bis 10^{-2} m primär von der Struktur des Bodens bestimmt, auf der Skala 10^0 bis 10^1 m von der Struktur des Kronendaches, und auf noch höherer Skala von großräumigen Mustern der meteorologischen Randbedingungen (Lischeid et al. 1998). Andere Beispiele finden sich bei Seyfried und Wilcox (1995), Blöschl (2001) und Sivakumar (2004).

Diese Skalenabhängigkeit kann aber aufgrund des erforderlichen Aufwandes nur in Einzelstudien nachgewiesen werden. Entsprechend ist eine Überprüfung der Übertragbarkeit auf andere Fallstudien im Einzelfall kaum möglich und höchstens gutachtlich abzuschätzen. Prinzipielle Probleme werden allgemein in den vielen Modellansätzen innewohnenden Stationaritätsannahmen, den oft nicht bekannten nichtlinearen Wechselwirkungen und dem Zusammenspiel multifaktorieller Effekte gesehen. Beispielsweise basieren die üblichen Ansätze zur Modellierung der Evapotranspiration auf den Ergebnissen aufwändiger Messkampagnen im möglichst homogenen Gelände. In einer kleinskalig strukturierten Landschaft, wie sie für Brandenburg typisch ist, spielen aber Rand- und Oaseneffekte der gut mit Wasser versorgten Kleingewässer und Feuchtgebiete eine große Rolle und führen hier zu überproportional hohen Verdunstungsraten (Frahm 2008). Die Evapotranspiration dieser Standorte hängt aber auch von der Luftfeuchtigkeit der anströmenden Luftmassen und damit der Evapotranspiration benachbarter Standorte in Windrichtung ab. Solche Effekte werden in den gängigen Wasserhaushaltsmodellen nicht berücksichtigt, dürften aber angesichts der prognostizierten klimatischen Änderungen in Zukunft noch eine größere Rolle spielen, als es momentan der Fall ist.

5.2 Szenarien

Im Mittelpunkt der aktuellen Diskussionen und der allgemeinen Wahrnehmung der Probleme des Wasserhaushalts in der Region Brandenburg-Berlin steht der Klimawandel. Entsprechend liegen hierzu inzwischen auch zahlreiche Studien vor, die in diesem Kapitel zusammengefasst werden. Demgegenüber fällt es deutlich schwerer, die zukünftige Entwicklung z. B. der sozio-ökonomischen Randbedingungen abzuschätzen. Unbestritten ist lediglich, dass die aktuelle demographische Entwicklung mit dem z. T. drastischen Rückgang der Bevölkerungsdichte in den dünn besiedelten Teilen Brandenburgs auch in den nächsten Jahren anhalten wird, während für Berlin und sein Umland mit einem schwachen Zuwachs gerechnet wird. Nichtsdestotrotz wird der Nutzungsdruck auf die Landschaft vermutlich weiterhin hoch bleiben, so dass nicht mit gravierenden Änderungen der Landnutzung gerechnet wird.

Je nach gewähltem Emissionsszenario der klimarelevanten Gase unterscheidet sich die prognostizierte Entwicklung der globalen Lufttemperatur langfristig deutlich (Abb. 12). Demgegenüber ist die Streubreite der unterschiedlichen Modelle eher zu vernachlässigen. Zu beachten ist, dass der beobachtete Anstieg der klimarelevanten Gase sich bisher eher im Bereich der pessimistischen Szenarien bewegte. Hält dieser Trend weiterhin an, wird sich die mittlere Temperatur der bodennahen Luftschicht

ten in den nächsten 50 Jahren um etwa 1°C erhöhen. Angesichts der Tatsache, dass die Temperaturen während der letzten Eiszeit im globalen Mittel nur wenige Grad unter den heutigen Werten lagen, bedeutet dies eine gravierende Änderung gegenüber den heutigen Zuständen.

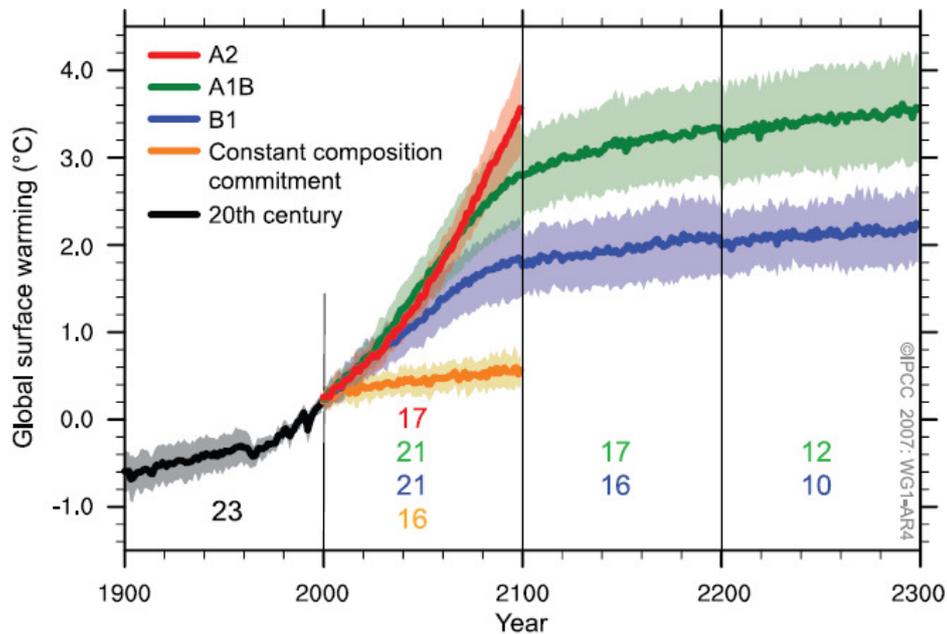


Abbildung 12: Prognostizierte Entwicklung der globalen Mitteltemperatur in Relation zum Mittelwert 1980–1990 für verschiedene Emissionsszenarien. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Werte verschiedener Modelle, die Zahlen geben die Anzahl der Modelle für die verschiedenen Szenarien und Perioden an. Quelle: Solomon (2007)

Für die hydrologisch interessierende Größe Niederschlag lassen sich allerdings keine ähnlich sicheren Aussagen treffen. Generell ist davon auszugehen, dass mit der Erwärmung der Troposphäre auch mehr Energie für die Evapotranspiration zur Verfügung steht. In der Tat weisen die vorliegenden Klimarkonstruktionen darauf hin, dass warme Perioden in der Regel auch niederschlagsreiche Phasen waren.

Für einzelne Regionen kann die Entwicklung aber auch ganz anders verlaufen. Insbesondere die Niederschläge sind lokal nur schwach mit der Temperatur korreliert. Entscheidender sind z. B. die Zugbahnen der Tiefdruckgebiete. Für Mitteleuropa ist ein enger Zusammenhang mit dem Nordatlantischen Oszillations-Index zu beobachten. Hohe Werte des Index gehen mit ausgeprägten Westwindphasen einher, die relativ warme, aber niederschlagsreiche Winter in Mitteleuropa zur Folge haben.

Für die Abschätzung der klimatischen Entwicklung in der Region Brandenburg-Berlin sind die globalen Klimamodelle aufgrund ihrer groben räumlichen Auflösung nicht geeignet. Deren Ergebnisse werden deshalb mittels regionaler Klimamodelle auf kleinere Raumskalen mit höherer räumlicher Auflösung transferiert. Dabei werden die Daten des gröber aufgelösten globalen Modells als Randbedingungen für die jeweiligen Regionalmodelle übernommen.

Dafür stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Beim „Dynamischen Downscaling“ werden die Prozesse in der Atmosphäre analog zum Ansatz der globalen Modelle physikalisch-deterministisch, jedoch in höherer Auflösung modelliert. Der Preis für die hohe räumliche und zeitliche Auflösung liegt in dem großen Rechenbedarf der Modelle. Für Deutschland wurde dafür vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg, basierend auf dem Wettervorhersage-Modell des Deutschen Wetterdienstes, das Regionalmodell REMO entwickelt, das die Klimaentwicklung in einem

10 km x 10 km-Raster simuliert (Jacob et al. 2008). Die ersten Ergebnisse sind aufgrund eines 2006 entdeckten Fehlers nicht zu verwenden. Inzwischen liegen aber die Ergebnisse des korrigierten Modells vor (Jacob et al. 2008, UBA 2006).

Beim „Stochastischen Downscaling“ wird die räumlich und zeitlich höher aufgelöste Modellierung der Klimaentwicklung mittels der für die jeweilige Region ermittelten statistischen Zusammenhänge wie z. B. Abhängigkeit meteorologischer Größen von der Topographie oder Häufigkeit verschiedener Wetterlagen vorgenommen (Spekat et al. 2007, Gerstengarbe et al. 2003). Damit können die regionalen Besonderheiten besser als in dem physikalisch orientierten Ansatz berücksichtigt werden. Außerdem sind diese Verfahren weniger rechenintensiv. Allerdings setzen die Verfahren voraus, dass sich zwar die Mittelwerte, nicht aber die statistischen Eigenschaften der meteorologischen Parameter in der Region ändern. Die Aussagekraft der Regionalmodelle ist deshalb insbesondere für längerfristige Prognosen beschränkt. Beispiele für den deutschen Raum sind die Modelle STAR (Werner und Gerstengarbe 1997) und WETTREG, das von der Firma Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrag für das Umweltbundesamt erstellt wurde (Spekat et al. 2007, UBA 2007).

Primäre Testgröße der Regionalmodelle ist die Temperatur. Der simulierte Niederschlag ist dagegen mit wesentlich höheren Unsicherheiten behaftet, da dessen räumliche und zeitliche Variabilität stärker von subskaligen Effekten abhängt, die von den Modellen nur grob approximiert werden können. Oft finden sich systematische Abweichungen der simulierten von den gemessenen Niederschlagswerten. Deshalb wird empfohlen, die simulierten Niederschlagswerte einer Bias-Korrektur zu unterziehen (Fowler et al. 2007, Leander und Buishand 2007). Schließlich ist zu beachten, dass die Regionalmodelle nur sehr eingeschränkte Aussagen zur Häufigkeit von Extremwetterlagen oder z. B. zu etwaigen Verschiebungen saisonaler Muster erlauben, da je nach gewähltem Ansatz die Ergebnisse in der Regel stark von den eingangs getroffenen Annahmen abhängen. Dies wäre aber z. B. für die Abschätzung der Hochwasserhäufigkeit oder die Evapotranspiration verschiedener Vegetationstypen und somit auch für die Abfluss- und Sickerwasserbildung wichtig.

Generell stimmen die verschiedenen Regionalmodelle für die Region Brandenburg-Berlin in einem prognostizierten deutlichen Temperaturanstieg 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 potentielle sommerliche Evapotranspiration ansteigt und generell mit einer Verringerung der Abflussbildung bzw. Grundwasserneubildung zu rechnen ist (Jacob et al. 2008, Spekat et al. 2007, Wechsung 2005, Gerstengarbe et al. 2003, Suckow et al. 2002).

Suckow et al. (2002) verwendeten verschiedene Klimaszenarien, um mittels zweier Waldsukzessionsmodelle flächendeckend die Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Grundwasserneubildung unter Wald in Brandenburg abzuschätzen. Nach ihren Ergebnissen blieb die Evapotranspiration bei einem Temperaturanstieg von 1,5°C fast unverändert, während die Niederschläge je nach Szenario um 40 bis 140 mm/a und die Sickerwasserbildung von heute 0–150 mm/a auf 0–60 mm/a zurückgingen.

Gerstengarbe et al. (2003) legten eine sehr detaillierte Studie zur Auswirkung des Klimawandels auf den Wasserhaushalt für den Zeitraum 2046–2055 vor. Sie legten das IPCC-Szenario A1B zugrunde (Abb. 12), das für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts von einer deutlichen Minderung der Treibhausgasemissionen ausgeht. Trotzdem wird sich der Temperaturanstieg in diesem Szenario bis Ende des Jahrhunderts fortsetzen. Für die Region Brandenburg und Berlin ergibt sich ein mittlerer Temperaturanstieg gegenüber dem Bezugszeitraum um 1,4 K. Der Temperaturanstieg erfolgt in der Region relativ gleichmäßig. Die höchsten Temperaturen werden im Berliner Raum und westlich, südwestlich und südöstlich von Berlin erwartet. Die Niederschlagswerte gehen in ihren Berechnungen innerhalb der nächsten 50 Jahre um 150 mm/a auf unter 450 mm/a zurück, wobei der Rückgang vor allem für die Sommermonate am stärksten ausgeprägt ist. Ihre Berechnungen zeigen überdies ein regi-

onal stark differenziertes Muster der Niederschlagsentwicklung. Mit weniger als 20 mm/a sind die Änderungen südöstlich Berlins minimal, während für die Niederlausitz ein Rückgang von mehr als 220 mm/a prognostiziert wurde. Für den Zeitraum 2046–2055 werden die niedrigsten Jahresniederschlagswerte im Nordosten Brandenburgs sowie im Bereich vom Fläming bis zur Niederlausitz mit weniger als 400 mm/a erwartet. Anzumerken ist allerdings, dass sich verschiedene Regionalmodelle hinsichtlich der räumlichen Muster der Entwicklung von Lufttemperatur, Niederschlag oder potentieller Evapotranspiration innerhalb von Brandenburg stark unterscheiden (Reimer et al. 2005).

In der Studie von Gerstengarbe et al. (2003) sinkt die klimatische Wasserbilanz, d.h. die Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Evapotranspiration, im Brandenburger Mittel von dem heutigen Wert von -25 mm/a bis 2046–2055 auf -124 mm/a ab. Aufgrund der saisonalen Verschiebung der Niederschläge sowie des Temperaturanstiegs im Winterhalbjahr nimmt die potentielle Evapotranspiration im Sommer um 200 mm/a ab und steigt im Winterhalbjahr um etwa den gleichen Betrag an. Überproportional steigt die Evapotranspiration von offenen Wasserflächen und von den grundwassernahen Standorten an, während sich auf grundwasserfernen Standorten mit leichten Böden die Evapotranspiration aufgrund des geringeren Bodenwasservorrats im Sommerhalbjahr verringert. Im Mittel der Region sinkt deshalb die tatsächliche Sickerwasserbildung nur um 46 mm/a ab. Die Abflussbildung sinkt von 101 mm/a auf nur noch 57,4 mm/a, d.h. um 43 %. Diese Änderung betrifft die Wintermonate stärker als die Sommermonate.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Ertrag von Winterweizen, Wintergerste und Mais wurden ebenfalls von Gerstengarbe et al. (2003) untersucht. Dazu wurde allerdings eine etwas andere Datenbasis herangezogen. Verglichen wurden die Simulationsergebnisse für den Zeitraum 2040–2050 mit dem Referenzzeitraum 1980–1990. Hierfür ergeben sich ein Temperaturanstieg von 1,7 K und eine Abnahme des mittleren Jahresniederschlags von 52 mm/a auf 478 mm/a. Für ganz Brandenburg ergibt sich ein mittlerer Rückgang der Weizenerträge von 17 %, während die simulierten Erträge beim Mais mit 2 % leicht ansteigen. Wird jedoch zusätzlich die düngende Wirkung der gestiegenen CO₂-Konzentrationen berücksichtigt, nehmen die Weizenerträge nur noch um 10 % gegenüber dem Referenzzeitraum ab, während sie für Mais um 8 % und für Gerste um 7 % ansteigen.

Wechsung et al. (2008) kommen prinzipiell zu ähnlichen Ergebnissen. Generell bleiben in ihrem Szenario die landwirtschaftlichen Erträge in Ostdeutschland für die nächsten 40 Jahre weitgehend stabil. Damit kompensieren sich die Effekte des verringerten Bodenwasservorrats im Sommer und der CO₂-Düngungseffekt weitgehend. In Brandenburg wird jedoch ein Rückgang der Mais-Erträge erwartet. Generell nehmen in Brandenburg, stärker als in anderen Teilen Ostdeutschlands, die Ertragssicherheit ab und die Sensitivität gegenüber trockenen Jahren zu. In beiden Studien wurden 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.

Die veränderten klimatischen Verhältnisse werden sich vermutlich auch auf den Schädlingsbefall landwirtschaftlicher Kulturen und der Wälder auswirken. Prognosen hierzu sind aber mit sehr großen Unsicherheiten behaftet, nicht zuletzt auch durch den kaum vorherzusagenden züchterischen Fortschritt, die Verwendung widerstandsfähigerer Arten oder Sorten und Fortschritte im Pflanzenschutz. Für die von der Kiefer dominierten Wälder Brandenburgs ist bei zunehmend trockener werdenden Sommern jedoch von einer weiteren Verschärfung des Waldbrandrisikos auszugehen. Bereits heute rangiert Brandenburg hinsichtlich des Waldbrandrisikos in Deutschland ganz vorne (Schretzmann 2001). Gerstengarbe und Werner (1997) gehen von einem Anstieg des Waldbrandrisikos bis 2050 um bis zu 30 % aus. Auf den dadurch entstehenden Brache- und Verjüngungsflächen ist die Evapotranspiration verringert und die Grundwasserneubildung erhöht. Das Waldbrandrisiko kann allerdings verringert werden, wenn die leicht entzündlichen Kiefernbestände durch Laub- oder zumindest Mischwälder ersetzt werden.

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. Koch et al. (2009) untersuchten mittels des Modells WBalMO die Auswirkungen verschiedener Bewirtschaftungsvarianten auf den Abfluss der Spree. Sie legten ihren Berechnungen 100 stochastisch generierte Realisierungen des Regionalmodells STAR zugrunde, das auf dem Klimaszenario A1B des IPCC beruhte (s. Abb. 12). Dieses Szenario hätte für das Gebiet der mittleren Elbe einen Temperaturanstieg von 2,1 °C gegenüber den heutigen Bedingungen zur Folge. Ohne weitere Maßnahmen würde der mittlere Abfluss der Spree am Pegel Große Tränke, d.h. nahe der Landesgrenze zu Berlin, bis 2050 auf 6 m³/s sinken und somit deutlich unter dem vertraglich vereinbarten Mindestzufluss von 8 m³/s liegen. Bereits 2020 würde hier im statistischen Mittel in 20 von 100 Jahren die Spree trocken fallen. Diskutiert werden deshalb Überleitungen aus der Elbe oder der Oder. Die Bau- und Betriebskosten, die auf die Dauer von ca. 40 Jahren anfallen würden, werden von den Autoren mit 3 bis 194 Mio. € veranschlagt. Die günstigste Variante der Oderwasserüberleitung durch den Oder-Spree-Kanal würde allerdings das Trockenfallen des Spreewaldes nicht verhindern können. Bei der Oderwasserüberleitung wären zudem Probleme der Wasserbeschaffenheit zu beachten. Gegen die Elbewasserüberleitung spräche neben den sehr hohen Kosten auch die zunehmend problematischer werdende Niedrigwasserführung in der Elbe.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, dass das Problem des klimatisch bedingten Meeresspiegelanstiegs im Bereich der deutschen Ostseeküste durch die tektonische Senkung dieser Region weiter verschärft wird. Meier et al. (2004) finden in ihren Szenariorechnungen einen Anstieg bis 2050 um bis zu 1 m. Dies ist zu vergleichen z. B. mit dem Stauziel im Unterwasser der Schleuse Hohensaaten unterhalb des Oderbruchs von nur 1,20 m über dem heutigen Meeresspiegel. Ein solcher Meeresspiegelanstieg hätte eine drastische Verflachung des Gradientens der Oder als Vorflut Ostbrandenburgs, eine deutliche Verringerung des Abflusses, zunehmende Probleme mit der Oderwasserqualität und ein deutlich gestiegenes Hochwasserrisiko zur Folge.

6 Anpassungsmaßnahmen

Angesichts der hier beschriebenen Bedrohungen des Landschaftswasserhaushalts wächst die Bereitschaft, konkrete Maßnahmen zu deren Abwehr oder Minderung zu ergreifen. Dabei ist zwischen direkt und indirekt wirksamen Maßnahmen zu unterscheiden. In vielen Fällen weisen diese Maßnahmen durchaus erwünschte Synergie-Effekte auf. In anderen Fällen allerdings ist das eine Ziel nur zulasten anderer zu erreichen, und die verschiedenen Ziele sind gegeneinander abzuwägen.

Der prognostizierte Klimawandel wird den bereits angespannten Landschaftswasserhaushalt weiter beeinträchtigen und den Wassermangel in der Region verschärfen. Oberstes Gebot wäre es demnach, die Emission von Treibhausgasen möglichst schnell deutlich zu reduzieren. Aber selbst bei einer sofortigen und vollständigen Reduktion würde aufgrund der Reaktionsträgheit des Klimasystems erst in einigen Jahrzehnten eine spürbare Entlastung zu erzielen sein.

Im Folgenden sollen deshalb einige Optionen der Anpassung an die zu erwartenden Änderungen vorgestellt werden. Dem Rückhalt des Wassers in der Landschaft muss wieder Vorrang gegenüber der immer noch weitgehend praktizierten schnellstmöglichen Abführung des Wassers aus der Landschaft eingeräumt werden. Eine Schließung der Rohrdränagen 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 z. B. als Paludikulturen zu nutzen, wie durch Anbau von Schilf, Weiden-Erlen-Gebüsch oder Pappeln zur stofflichen und energetischen Verwertung (Schäfer 2005, Wichtmann und Schäfer 2007, Tanneberger et al. 2008). Diese Kulturen könnten auch einen höheren Beitrag zur Erhaltung der Biodiversität und zur Kohlenstoff-Sequestrierung leisten.

Andererseits ist die Evapotranspiration von diesen Flächen sehr hoch. Die Erhaltung bzw. Wiedervernässung eines Feuchtgebietes ginge dann zulasten der Unterlieger. In vielen Fällen wäre es deshalb sinnvoller, die vorhandenen Anlagen in den Niederungen wieder für eine aktive Steuerung des Wasserhaushaltes, 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. 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.

Teilweise werden große Hoffnungen in die Züchtung neuer Sorten mit wesentlich geringeren Ansprüchen an die Wasserversorgung gesetzt. Allerdings weisen die heute verfügbaren Sorten bereits im Vergleich mit Wildpflanzen schon eine hohe Wassernutzungs-Effizienz auf. Es wird diskutiert, inwieweit dies bereits eine prinzipielle physiologische Limitation darstellen könnte (Rockström 2003). Dieses Potential kann aber nur bei optimaler Nährstoffversorgung und leistungsfähigem Pflanzenschutz erreicht werden. Hier könnten z. B. durch *Precision Farming* noch Reserven mobilisiert werden. Eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber Trockenphasen wäre allerdings voraussichtlich nur zum Preis einer geringeren Kohlenstoff-Allokation in den zu erntenden Feldfrüchten zu erreichen.

Zumindest im Umfeld Berlins könnten zudem noch große Wasserreserven mobilisiert werden. Die dort anfallenden Abwassermengen entsprechen einem Mehrfachen der natürlichen Grundwasserneu-

bildung des Stadtgebietes. Momentan wird dieses Wasser nach der Reinigung in die Vorfluter eingeleitet und somit schnellstmöglich abgeleitet. Würde es stattdessen 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, als Grundwasserzustrom dem Abfluss in den Vorflutern zugute kommen. Dieses Verfahren wird andernorts schon längst realisiert. In Deutschland steht dem momentan aber noch die restriktive Gesetzgebung entgegen, die dem Grundwasserschutz gegenüber der Entlastung der Fließgewässer Vorrang einräumt.

Der in Brandenburg wie auch in anderen Bundesländern angestrebte Waldumbau, d.h. die Umwandlung der 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 ist der Waldumbau aus Kostengründen nur sukzessive durch Ersetzen der jeweils hiebsreifen Nadelwaldbestände vorzunehmen und würde einen Zeitraum von ca. 100 Jahren erfordern. Dem wäre die Geschwindigkeit des Klimawandels entgegenzusetzen (Natkhin 2010). Eine deutlichere Reduktion der Evapotranspiration wäre allerdings z. B. durch ackerbauliche Nutzung der heute noch bewaldeten Flächen zu erreichen. Hierfür würde sich Mais als C4-Pflanze mit hoher Wassernutzungseffizienz anbieten. Ein solcher Landnutzungswandel wäre allerdings sowohl rechtlich als auch z. B. hinsichtlich der Naturschutz- oder Tourismus-Aspekte kaum im größeren Maßstab umzusetzen.

Als technisch und finanziell aufwändige Lösung sind in Einzelfällen Wasserüberleitungen, z. B. aus Oder oder Elbe, und die Nutzung großer Speicher zum Rückhalt des Wassers in den Wintermonaten zu erwägen. Dies wird sich vor allem in der Lausitz als unabdingbar erweisen. Die Flutung der Tagebaurestlöcher ist die einzige finanziell tragbare Lösung zur Kompensation des Massenverlustes durch den Braunkohleabbau und um zu verhindern, dass das saure Grundwasser in die Restlöcher exfiltriert. Allerdings wird damit auch der Wasserverlust der Landschaft durch erhöhte Verdunstung erhöht.

Entsprechend ist bei allen Maßnahmen, die auf die Erhaltung von Stillgewässern und Feuchtgebieten abzielen, die damit gesteigerte Evapotranspiration als Verlustterm des Landschaftswasserhaushalts zu berücksichtigen. Ein gezieltes Trockenfallenlassen einzelner Gewässer würde dem Zufluss in andere, unterhalb gelegene Gewässer und damit deren Erhaltung zugute kommen. Langfristig wird dies sich in vielen Fällen als notwendig erweisen.

Bei verringerter Grundwasserneubildung und lokal eventuell zusätzlich erhöhter Grundwasserförderung z. B. aufgrund des zunehmenden Bewässerungsbedarfs sinkt der hydrostatische Druck der oberen Grundwasserstockwerke. Dies kann örtlich dazu führen, dass saline Tiefenwässer im Bereich von Störungen oder Ausräumungen des Rupeltons bis in die oberen Grundwasserstockwerke aufsteigen und Förderbrunnen aufgrund der hohen Salzbelastung stillgelegt werden müssen. Deshalb hat das Land Brandenburg ein Sondermessnetz aufgebaut (Hannappel et al. 2007). In konkreten Einzelfällen muss dieser Möglichkeit verstärkt Rechnung getragen werden, z. B. durch entsprechende Untersuchungsprogramme und Modellrechnungen (Grube et al. 2000). Somit werden die Rahmenbedingungen für die Trinkwasserversorgung in Zukunft nicht nur für die Nutzung von Uferfiltrat aus Oberflächengewässern, sondern auch für die Förderung aus tiefen Grundwasserbrunnen voraussichtlich ungünstiger werden. Dies gilt für die Wasserquantität ebenso wie für die Wasserqualität. Neben der potentiellen Versalzung einzelner tiefer Förderbrunnen bedroht die zunehmende Exfiltration sulfathaltiger Grundwässer die Qualität der Spree. Schließlich würde der prognostizierte Rückgang der Grundwasserneubildung und der Abflussbildung generell eine Aufkonzentrierung von Schadstoffen in Grund- und Oberflächengewässer nach sich ziehen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Region Brandenburg-Berlin ist einerseits durch geringe Niederschläge und relativ hohe Evapotranspiration, andererseits durch viele Oberflächengewässer gekennzeichnet. Dadurch wirken und wirkten sich bereits geringe klimatische Änderungen deutlich auf den Landschaftswasserhaushalt aus. Der aktuell in weiten Bereichen Brandenburgs zu beobachtende Trend abnehmender Grund- und Seewasserstände ist vermutlich zu einem großen Teil klimatisch bedingt, wie es sie im Holozän öfter gegeben hat. Der anthropogen induzierte Klimawandel wird diesen Trend vermutlich weiter verstärken. Andererseits wird dieser Trend durch eine Kombination verschiedenster anthropogener Maßnahmen weiter verschärft. Darunter ist vor allem die Beschleunigung des Abflusses aus den Niederungen zu nennen. Durch ein Bündel abgestimmter Maßnahmen lassen sich die prognostizierten Verschlechterungen des Wasserhaushaltes in vielen Fällen abfedern. Dennoch wird langfristig ein Austrocknen vieler Kleingewässer und Feuchtgebiete nicht zu verhindern sein. Anpassung an den Klimawandel impliziert deshalb für Brandenburg, dieser Tatsache durch Entwicklung entsprechender integrativer Landnutzungs- und wasserwirtschaftlicher Konzepte Rechnung zu tragen.

Literatur

- Allan, J.A. (1993): Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible. In: ODA (Hrsg.): *Priorities for Water Resources Allocation and Management*. ODA, London, S. 13–26.
- Allan, J.A. (1994): Overall perspectives on countries and regions. In: Rogers, P., Lydon, P. (Hrsg.): *Water in the Arab World: Perspectives and Prognoses*. Harvard University Press, Cambridge, S. 65–100.
- Bärthel, H. (1997): *Wasser für Berlin: Die Geschichte der Wasserversorgung*. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Behrendt, H., Bachor, A. (1998): Point and diffuse load of nutrients to the Baltic Sea by river basins of north east Germany (Mecklenburg-Vorpommern). *Water Science and Technology* 38 (10): S. 147–155.
- Behrendt, A., Schalitz, G., Müller, L., Mindel, G., Hölzel, D. (2001): *Untersuchungen zur Niedermoorrenaturierung in Grundwasserlysimetern. 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, 24. und 25. April 2001*. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning.
- Beirat für Nachhaltige Entwicklung und Ressourcenschutz des Landes Brandenburg (2009): *Brandenburg auf dem Weg zur Modellregion für Nachhaltige Entwicklung. Endbericht 2009*.
- Beven, K. (2000): *Rainfall-runoff modelling. The Primer*. John Wiley and Sons Ltd., Chichester.
- Beven, K. (2001a): How far can we go in distributed modelling? *Hydrology and Earth System Sciences* 5: S. 1–12.
- Beven, K. (2001b): On fire and rain (or predicting the effects of change). *Hydrological Processes* 15: S. 1397–1399.
- Beven, K., Freer, J. (2001): Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology* 249: S. 11–29.
- Blöschl, G. (2001): Scaling in hydrology. *Hydrological Processes* 15: S. 709–711.
- Blöschl, G., Sivapalan, M. (1995): Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrological Processes* 9: S. 251–290.
- Bolte, A., Wolff, B., Anders, S. (2001): Tiefensickerung in Abhängigkeit von realer und natürlicher Waldbedeckung – eine bundesweite Modellstudie. In: *Funktionen des Waldes und Aufgaben der Forstwirtschaft in Verbindung mit dem Landschaftswasserhaushalt*. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Band 15. Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg, Landesforstanstalt Eberswalde, Potsdam, S. 77–86.
- Borgwardt, K., Dreger, F., Luthardt, V. (2006): Die „Meelake“ im Wandel – Veränderungen eines nordostbrandenburgischen Verlandungsmoores (1991–2004). *Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie* 40 (4): S. 166–176.
- Bork, H.-R., Bork, H., Dalchow, C., Faust, B., Piorr, H.-P., Schatz, T. (1998): *Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa: Wirkungen des Menschen auf Landschaften*. Klett-Perthes, Gotha, Stuttgart.
- Brown, A.E., Zhang, L., McMahon, T.A., Western, A.W., Vertessy, R.A. (2005): A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology* 310 (1–4): S. 28–61.
- Burroughs, W.J. (2001): *Climate change. A multidisciplinary approach*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y. (2003): Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international trade of livestock and livestock products. . In: Hoekstra, A.Y. (Hrsg.): *Virtual Water Trade. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade*. Value of Water Research Report Series No. 12, UNESCO-IHE, Delft, S. 48–76.
- Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y. (2004): *Water footprints of nations. Volume 2: Appendices*. Value of Water Research Report Series No. 16, UNESCO-IHE, Delft.

- Cole, J.J., Prairie, Y.T., Caraco, N.F., McDowell, W.H., Tranvik, L.J., Striegl, R.G., Duarte, C.M., Kortelainen, P., Downing, J.A., Middelburg, J.J., Melack, J. (2007): Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget. *Ecosystems* 10 (1): S. 172–185.
- Cuevas, J.G., Soto, D., Arismendi, I., Pino, M., Lara, A., Oyarzún, C. (2006): Relating land cover to stream properties in southern Chilean watersheds: trade-off between geographic scale, sample size, and explicative power. *Biogeochemistry* 81 (3): S. 313–329.
- Dalchow, C., Kiesel, J. (2005): Die Oder greift ins Elbegebiet: Spannungsverhältnisse und Sollbruchstellen zwischen zwei Flussgebieten. *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge* 12 (1–2): S. 73–86.
- Dannowski, R., Balla, D. (2004): Wasserhaushalt und geohydrologische Situation einer vernässten Niedermoorfläche mit Schilfanbau in Nordost-Brandenburg. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung* 43 (2): S. 27–40.
- Dannowski, R., Steidl, J. (2000): Modellierung des Gebietswasserhaushaltes mit dem Modell ABIMO. In: Landesumweltamt Brandenburg (Hrsg.): *Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg*. Studien und Tagungsberichte, Band 27, Landesumweltamt Brandenburg, S. 24–40.
- Deggau, M. (2006): Nutzung der Bodenfläche. Flächenerhebung 2004 nach Art der tatsächlichen Nutzung. *Wirtschaft und Statistik* 3: S. 212–219.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H. (1986): *Yield response to water*. FAO irrigation and drainage paper no. 33. FAO, Rome.
- Downing, J.A., Cole, J. J., Middelburg, J.J., Striegl, R.G., Duarte, C.M., Kortelainen, P., Prairie, Y.T., Laube, K.A. (2008): Sediment organic carbon burial in agriculturally eutrophic impoundments over the last century. *Global Biogeochemical Cycles* 22, doi:10.1029/2006GB002854.
- Dreger, F. (2001): *Geo- und bioökologische Analyse und Bewertung von Söllen in der Agrarlandschaft Nordostdeutschlands am Beispiel des Biosphärenreservates Schorfheide-Chorin*. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin.
- Dreger, F., Michels, R. (2002): *Die Entwicklung der Grundwasserstände in der Schorfheide 1980–2000*. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Band 15, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz, Potsdam, S. 11–15.
- Driescher, E. (2003): *Veränderungen an Gewässern Brandenburgs in historischer Zeit*. Studien und Tagungsberichte, Band 47, Landesumweltamt Brandenburg.
- DWD (2009): *Klimaatlas Deutschland, Klimakarten für Deutschland, Grasreferenverdunstung der Jahre 2004–2008*. Deutscher Wetterdienst, www.dwd.de (Download vom 01.12.2009).
- Eulenstein, F., Drechsler, H. (1992): *Ursachen, Differenzierung und Steuerung der Nitratkonzentration im Grundwasser überwiegend agrarisch genutzter Wassereinzugsgebiete*. Dissertation, Universität Göttingen, Fachbereich Agrarwissenschaften.
- 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): S. 577–582.
- Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Tebaldi, C. (2007): Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology* 27 (12): S. 1547–1578.
- Frahm, E. (2008): *Bestimmung der realen Evapotranspiration für Weide (Salix spp.) und Schilf (Phragmites australis) in einem nordostdeutschen Flusstalmoor*. Dissertation, Universität Rostock, Institut für Umweltingenieurwesen.
- Fu, G.B., Charles, S.P., Yu, J.J. (2009): A critical overview of pan evaporation trends over the last 50 years. *Climatic Change* 97 (1–2): S. 193–214.
- Gaillard, M.J. (1985): Postglacial paleoclimatic changes in Scandinavia and Central Europe. A tentative correlation based on studies of lake level fluctuations. *Ecologia Mediterranea* 11 (1): S. 159–176.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C. (1997): Waldbrandentwicklung im Land Brandenburg. *Der Wald* 7: S. 392–394.
- Gerstengarbe, F.-W., Badeck, F., Hattermann, F., Krysanova, V., Lahmer, W., Lasch, P., Stock, M., Suckow, F., Wechsung, F., Werner, P.C. (2003): *Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und*

- deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektive. PIK-Report 83, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam.
- Glaser, R. (2001): *Klimageschichte Mitteleuropas: 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen*. Primus Verlag, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Graupner, B., Koch, Ch., Werner, F., Benthous, F.-C. (2007): Großräumige Sulfatfreisetzung durch sekundäre Pyritoxidation im Lausitzer Bergbaurevier. In: Merkel, B.J., Schaeben, H., Hasche-Berger, A., Wolkersdorfer, C. (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, S. 143–150.
- Gröschke, A., Uhlmann, W., Rolland, W., Grünewald, U. (2002): Hydrochemische Entwicklung Lausitzer Tagebaueisen während der Flutung – Beispiel Gräbendorfer See. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 46 (6): S. 256–267.
- Grube, A., Hermsdorf, A., Land, M., Rechlin, 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 (1/2): S. 41–52.
- Grünewald, U. (2005): Probleme der integrierten Wasserbewirtschaftung im Spree-Havel-Gebiet im Kontext des globalen Wandels. In: Wechsung, F., Becker, A., Gräfe, P. (Hrsg.): *Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft*, Band 6. Weißensee Verlag, Berlin, S. 209–218.
- Grünewald, U., Uhlmann, W. (2004): Zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit in den Lausitzer Tagebaueisen: Ausgangspunkt, Stand und Perspektiven. *Surface Mining* 56 (2): S. 115–125.
- Häckel, H. (1999): *Meteorologie*. 4. Auflage. Ulmer-Verlag, Stuttgart-Hohenheim.
- Hannappel, S., Jakobs, F. (2002): *Bericht zur Grundwasserbeschaffenheit 1995 bis 2000 im Land Brandenburg*. Studien und Tagungsberichte, Band 41. Landesumwelt Brandenburg, Potsdam.
- 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): S. 5–14.
- Hannemann, M., Schirrmeister, W. (1998): Paläohydrogeologische Grundlagen der Entwicklung der Süß-/Salzwassergrenze und der Salzwasseraustritte in Brandenburg. *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge* 5 (2): S. 61–72.
- Harrison, S.P., Digerfeldt, G. (1993): European lakes as paleohydrological and paleoclimatic indicators. *Quaternary Science Reviews* 12 (4): S. 233–248.
- Harrison, S.P., Prentice, I.C., Guiot, J. (1993): Climatic controls on Holocene lake-level changes in Europe. *Climate Dynamics* 8 (4): S. 189–200.
- Herbst, M., Kappen, L. (1993): Die Rolle des Schilfs im standörtlichen Wasserhaushalt eines norddeutschen Sees. *Phytocoenologia* 23: S. 51–64.
- Herlihy, A.T., Stoddard, J.L., Johnson, C.B. (1998): The relationships between stream chemistry and watershed land cover data in the mid-Atlantic region. *U.S. Water, Air, and Soil Pollution* 105: S. 377–386.
- Hoekstra, A.Y. (2003): Virtual water: An introduction. In: Hoekstra, A.Y. (Hrsg.): *Virtual Water Trade. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade*. Value of Water Research Report Series No. 12. UNESCO-IHE, Delft, S. 13–23.
- Hoekstra, A.Y., Hung, P.Q. (2002): *A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade*. Value of Water Research Report Series No. 11. UNESCO-IHE, Delft.
- Hofmann, G. (1995): Zur Wirkung von Stickstoffeinträgen auf die Vegetation nordostdeutscher Kiefernwaldungen. In: *Wirkungskomplex Stickstoff/Wald*. UBA-Texte 28. Umweltbundesamt, Berlin, S. 131–140.
- Hofmann, G., Pommer, U. (2005): *Potentielle Natürliche Vegetation von Brandenburg und Berlin, mit Karte im Maßstab 1:200 000*. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Band 24. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz, Potsdam.
- Houghton, J.T., G.J., Jenkins, Ephraums, J.J. (Eds) (1990): *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge.
- 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 13*. Umweltbundesamt, Dessau.

- Johnsen, S.J., Dahl-Jensen, D., Dansgaard, W., Gundestrup, N. (2002): Greenland palaeotemperatures derived from GRIP bore hole temperature and ice core isotope profiles. *Tellus B* 47 (5): S. 624–629.
- Kaboth, U., Rechlin, B., Ginzler, G. (2008): Besteht für unsere Seen eine geogene Versalzungsgefahr? Hydrochemisch-genetische Untersuchungen von Speisungsbedingungen an Seen im Naturpark Stechlin. *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge* 15 (1/2): S. 69–79.
- Kaletka, T. (1996): Die Problematik der Sölle (Kleinhohlformen) im Jungmoränengebiet Nordostdeutschlands. *Naturschutz und Landespflege in Brandenburg, Sonderheft Sölle*, S. 4–12.
- Kaiser, K. (1996): Zur hydrologischen Entwicklung mecklenburgischer Seen im jüngeren Quartär. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 140: S. 323–342.
- Kaiser, K. (1998): Die hydrologische Entwicklung der Müritzer im jüngeren Quartär – Befunde und ihre Interpretation. *Zeitschrift für Geomorphologie Suppl.-Band* 112: S. 143–176.
- Kirchner, J.W. (2006): Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resources Research* 42, W03S04, doi:10.1029/2005WR004362.
- Kirchner, J.W., Hooper, R.P., Kendall, C., Neal, C., Leavesley, G. (1996): Testing and validating environmental models. *The Science of the Total Environment* 183: S. 33–47.
- Klemeš, V. (1986): Dilettantism in hydrology: Transition or destiny? *Water Resources Research* 22: S. 177–188.
- Koch, H., Grünwald, U., Kaltföfen, M., Kaden, S. (2009): Anpassungsstrategien für die Wasserbewirtschaftung an den globalen Wandel im Einzugsgebiet der Spree. *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 1: 600–605.
- Küster, H. (1999): *Geschichte der Landschaft in Mitteleuropa: Von der Eiszeit bis zur Gegenwart*. C.H. Beck, München.
- Lahmer, W., Pfützner, B. (2003): *Orts- und zeitdiskrete Ermittlung der Sickerwassermenge im Land Brandenburg auf der Basis flächendeckender Wasserhaushaltsberechnungen*. PIK-Report 85. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam.
- Lampe, R. (2008): Ausmaß und Folgen isostatischer Erdkrustenbewegungen an der Ostseeküste NE-Deutschlands. *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt* 62: S. 179–182.
- Landesumweltamt Brandenburg (2007): *Bericht zur Grundwasserbeschaffenheit im Land Brandenburg für den Zeitraum 2001 bis 2005*. Studien und Tagungsberichte, Band 55. Landesumweltamt Brandenburg, Potsdam.
- Landgraf, L., Rowinsky, V., Moritz, I., Koch-Lehker, A., Meisel, S., Hoth, D., Schönemann, C., Marschall, K., Gottwald, P. (2004): *Leitfaden zur Renaturierung von Feuchtgebieten in Brandenburg*. Studien und Tagungsberichte des Landesumweltamtes 50. Landesumweltamt, Potsdam.
- LBGR (1997): *Geologische Übersichtskarte des Landes Brandenburg*. Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg, Cottbus, Landesvermessungsamt Brandenburg, Frankfurt (Oder).
- Leander, R., Buishand, T.A. (2007): Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of Hydrology* 332 (3–4): S. 487–496.
- Lewandowski, J., Lischeid, G., Nützmänn, G. (2009): Drivers of water level fluctuations and hydrological exchange between groundwater and surface water at the lowland River Spree (Germany): field study and statistical analyses. *Hydrological Processes* 23: S. 2117–2128, doi: 10.1002/hyp.7277.
- Linacre, E.T. (2004): Evaporation trends. *Theoretical and Applied Climatology* 79 (1–2): S. 11–2.
- Lischeid, G., Alewell, C., Bittersohl, J., Göttlein, A., Jungnickel, C., Lange, H., Manderscheid, B., Moritz, K., Ostendorf, B., Sager, H. (1998): Investigating the impact of anthropogenic deposition on plants, soils and groundwater at different scales in a forested catchment: the Waldstein case study. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 50: S. 109–118.
- Lippstreu, L., Hermsdorf, N., Sonntag, A. (1997): *Geologische Übersichtskarte des Landes Brandenburg 1:300.000 – Erläuterungen*. Potsdam.
- Liu, J., Yang, H., Zehnder, A. (2007): Simulation of crop water relations on large scales with high spatial resolutions. In: Van Berts, C., Petry, D., Pahl-Wostl, C. (Hrsg.): *Global assessments: Bridging scales and linking to policy. Report on the joint TIAS-GWSP workshop held at the University of Maryland University College, Adelphi, USA, 10 and 11 May 2007*. GWSIP Issues in Global Water System Research No. 2. GWSP IPO, Bonn.
- Liu, J., Zehnder, A., Yang, H. (2009): Global consumptive water use for crop production: The importance of green water and virtual water. *Water Resources Research* 45, W05428, doi: 10.1029/2007WR006051.

- LMBV (2009): *Angaben zu Grundwasserdefizit und Stimpfungsmaßnahmen*. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, www.lmbv.de (Download vom 01.11.2009).
- Lorenz, M., Schwärzel, K., Wessolek, G. (2005): Auswirkungen von Klima- und Grundwasserstandsänderungen auf Bodenwasserhaushalt, Biomasseproduktion und Degradierung von Niedermooren im Spreewald. In: Wechsung, F., Becker, A., Gräfe, P. (Hrsg.): *Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft*, Band 6, Weißensee-Verlag, Berlin, S. 284–293.
- Magri, F., Bayer, U., Clausnitzer, V., Jahnke, C., Diersch, H.-J., Fuhrmann, J., Möller, P., Pekdeger, A., Tesmer, M., Voigt, J. (2005): Deep reaching fluid flow close to convective instability in the NE German basin – results from water chemistry and modelling. *Tectonophysics* 397: S. 5–20.
- Meier, H.E.M., Broman, B., Kjellström, E. (2004): Modelling sea level variability in different climates of the Baltic Sea. In: Isemer, H.-J. (Hrsg.): *Proceedings of the fourth study conference on BALTEX*. International BALTEX Secretariat Publication Series N. 29, S. 170–171.
- Merz, C., Steidl, J., Dannowski, R. (2009): Parameterization and regionalization of redox based denitrification for GIS-embedded nitrate transport modeling in Pleistocene aquifer systems. *Journal of Environmental Geology* 58: S. 1587–1599, doi: 10.1007/s00254-008-1665-6.
- Mey, S., Pfützner, B. (2008): *Analyse zur Minderung von Wassermangelsituationen mit einem gekoppelten Oberflächen-Grundwassermodell*. Poster. Tag der Hydrologie 2008, Hannover, <http://www.iww.uni-hannover.de/tdh2008/Poster/Mey.pdf> (Download vom 16.12.2009).
- MUGV (2009): *Wasserschutzgebiete im Land Brandenburg*. Brandenburgisches Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (MUGV), Potsdam, http://www.mugv.brandenburg.de/cms/detail.php?id=172350&_siteid=800 (Download vom 30.11.2009).
- Milnik, A., (1998): *In Verantwortung für den Wald – die Geschichte der Forstwirtschaft in der Sowjetischen Besatzungszone und der DDR*. Brandenburgisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Potsdam.
- MLUV (2009): *Moore in Brandenburg*. Ministerium für Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MLUV), Potsdam, <http://www.mluv.brandenburg.de> (Download vom 15.10.2009).
- Müller, J. (2002): Verdunstung der Baumvegetation und Tiefenversickerung in Kiefern-, Buchen- und Eichen-Ökosystemen in Abhängigkeit von Boden- und Bestandesstruktur und von der Witterung. In: Anders, S. et al. (Hrsg.): *Ökologie und Vegetation der Wälder Nordostdeutschlands. Einfluss von Niederschlagsarmut und erhöhtem Stickstoffeintrag auf Kiefern-, Eichen- und Buchen-Wald- und Forstökosysteme des nordostdeutschen Tieflandes*. Verlag Dr. Kessel, Oberwinter, S. 113–122.
- Müller, K. (2007): Die aktuelle Verbreitung der Kiefer in Brandenburg. In: Kätzel, R., Möller, K., Löfler, S., Engel, J., Liero, K. (Hrsg.): *Die Kiefer im nordostdeutschen Tiefland – Ökologie und Bewirtschaftung*. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Band 32, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg, Landesforstanstalt Eberswalde, Eberswalde, Potsdam, S. 9–13.
- 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): S. 117–136.
- Natkhin, M. (2010): *Modellgestützte Analyse der Einflüsse von Veränderungen der Waldwirtschaft und des Klimas auf den Wasserhaushalt grundwasserabhängiger Landschaftselemente*. Dissertation, Universität Potsdam.
- Refsgaard, J.C., Knudsen, J. (1996): Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research* 32 (7): 2189–2202.
- Reimer, E., Sodoudi, S., Mikusky, E., Langer, I. (2005): Klimaprognose der Temperatur, der potenziellen Verdunstung und des Niederschlags mit NEURO-FUZZY-Modellen. In: Wechsung, F., Becker, A., Gräfe, P. (Hrsg.): *Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft*, Band 6, Weißensee Verlag, Berlin, S. 96–109.
- Richter, D. (1997): *Das Langzeitverhalten von Niederschlag und Verdunstung und dessen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt des Stechlinseegebietes*. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.
- Riek, W., Stähr, F. (2004): *Eigenschaften typischer Waldböden im Nordostdeutschen Tiefland unter besonderer Berücksichtigung des Landes Brandenburg – Hinweise für die Waldbewirtschaftung*. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Band 19, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz, Potsdam.
- Rockström, J. (2003): Water for food and nature in drought-prone tropics: vapour shiit in rain-fed agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B* 358: S. 1997–2009.

- Rockström, J., Gordon, L., Falkenmark, M., Folke, C., Engvall, M. (1999): Linkages among water vapor flows, food production, and terrestrial ecosystem services. *Conservation Ecology* 3: . 1–28.
- Rost, S., Gerten, D., Bondeau, A., Lucht, W., Rohwer, J., Schaphoff, S. (2008): Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. *Water Resources Research* 44 (9), W09405, doi:10.1029/2007WR006331.
- Schäfer, A. (2005): Umweltverträgliche Erlenwirtschaft auf wieder vernässten Niedermoorstandorten. *Beiträge zu Forstwirtschaft und Landschaftsökologie* 38: S. 165–171.
- Schindler, U., Wolff, M., Kühn, G. (2001): Lysimeterstudie zum Einfluss von Düngung und Bewirtschaftung auf die Ertragsbildung, den Wasserhaushalt und die Nährstoffauswaschung im Trockengebiet der Uckermark. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 164: S. 697–703.
- 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): S. 451–463.
- Schretzmann, R. (2001): *Waldbrandschutz*. Heft 1354/2001. Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten e.V., Bonn.
- Seyfried, M.S., Wilcox, B.P. (1995): Scale and the nature of spatial variability: Field examples having implications for hydrologic modelling. *Water Resources Research* 31: S. 173–184.
- Simon, M. (2009): *Die landwirtschaftliche Bewässerung in Ostdeutschland seit 1949. Eine historische Analyse vor dem Hintergrund des Klimawandels*. PIK-Report 114. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.
- Sivakumar, B. (2004): Dominant processes concept in hydrology: moving forward. *Hydrological Processes* 18: S. 2349–2353.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R.B., Berntsen, T., Bindoff, N.L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J.M., Hegerl, G.C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B.J., Joos, F., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Overpeck, J., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, R., Stocker, T.F., Whetton, P., Wood, R.A., Wratt, D. (2007): Technical Summary. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Hrsg.): *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 University Press, Cambridge, New York.
- Sonnenberg, A., Chapagain, A., Geiger, M., August, D. (2009): *Der Wasser-Fußabdruck Deutschlands. Woher stammt das Wasser, das in unseren Lebensmitteln steckt?* WWF Deutschland, Frankfurt am Main.
- Sonntag, H. (2007): Problem Sulfat in der Spree – Stand der Diskussion und aktuelle Trends. In: Merkel, B.J., Schaeben, H., Hasche-Berger, A., Wolkersdorfer, C. (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, S. 151–156.
- Spekat, A., Enke, W., Kreienkamp, F. (2007): *Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG*. UBA-FZK 204 41 138. UBA-Publikationsreihe, Dessau.
- Stackebrandt, W., Manhenke, V. (Hrsg.) (2002): *Atlas zur Geologie von Brandenburg*. 2. Auflage. Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg.
- Statistisches Bundesamt (2009): *Statistisches Jahrbuch 2009 für die Bundesrepublik Deutschland*. Wiesbaden
- Strayer, D.L., Beighley, R.E., Thompson, L.C., Brooks, S., Nilsson, C., Pinay, G., Naiman, R.J. (2003): Effects of land cover on stream ecosystems: roles of empirical models and scaling issues. *Ecosystems* 6: S. 407–423.
- Suckow, F., Lasch, P., Badeck, F.-W. (2002): *Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Grundwasserneubildung*. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Band 15, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz, Potsdam, S. 36–44.
- 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*, doi: 10.1007/s10531-008-9495-0.
- UBA (2006): *Anpassung an Klimaänderungen in Deutschland – Regionale Szenarien und nationale Aufgaben. Hintergrundpapier*. Umweltbundesamt, Dessau.

- UBA (2007): *Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen. Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG. Hintergrundpapier „Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen“*. Umweltbundesamt, Dessau.
- Uhlenbrook, S., Seibert, J., Leibundgut, C., Rodhe, A. (1999): Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure. *Hydrological Sciences Journal* 44: 779–797.
- Vietinghoff, H. (1993): Der Wasserhaushalt des Großen Seddiner Sees – Problemdarstellung. *Naturschutz und Landschaftspflege* 2 (2): 22–27.
- 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): S. 1–17.
- Wechsung, F. (2005): Herausforderungen des globalen Wandels für die Elbe-Region. In: Wechsung, F., Becker, A., Gräfe, P. (Hrsg.): *Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft*, Band 6, Weißensee Verlag, Berlin, S. 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: Wechsung, F., Gerstengarbe, F.-W., Lasch, P., Lüttger, A. (Hrsg.) (2008): *Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel*. PIK-Report 112, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, S 18-32.
- Werner, P.C., Gerstengarbe, F.W. (1997): Proposal for the development of climate scenarios. *Climate Research* 8 (3): S. 171–182.
- Wichtmann, W., Schäfer, A. (2007): Alternative management options for degraded fens – Utilisation of biomass from rewetted peatlands. In: Okruszko, T., Maltby, E., Szatyłowicz, J. (Hrsg.): *Wetlands: Monitoring, Modeling and Management. Proceedings of the International Conference W3M*. Taylor & Francis Group, London.
- Zimmer, D., Renault, D. (2003): Virtual water in food production and global trade: Review of methodological issues and preliminary results. In: Hoekstra, A.Y. (Hrsg.): *Virtual water trade. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade*. Value of Water Research Report Series No. 12, UNESCO-IHE Delft, S. 93–109.

Autorenhinweis

Prof. Dr. Gunnar Lischeid
Institut für Landschaftswasserhaushalt
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung Müncheberg e.V.
Eberswalder Str. 84
15374 Müncheberg
Telefon: 033432 82250
E-Mail: lischeid@zalf.de

und

Institut für Geoökologie
Universität Potsdam

Bisherige Diskussionspapiere

| | |
|--------------------------------|---|
| Diskussionspapier 1 01/2009 | Karl-Dieter Keim: Spacing-Konzepte und Brückenprinzipien zur Formulierung von Handlungsvorschlägen. |
| Diskussionspapier 2 01/2010 | Gunnar Lischeid: Landschaftswasserhaushalt in der Region Berlin-Brandenburg. |
| Diskussionspapier 3 02/2010 | Katrin Drastig, Annette Prochnow und Reiner Brunsch: Wassermanagement in der Landwirtschaft. |

Der aktuelle Stand der Reihe sowie einzelne Texte sind unter anderem im Internet unter <http://globalerwandel.bbaw.de> einsehbar. An gleicher Stelle sind auch Hinweise auf weitere Publikationen und auf Veranstaltungen im Rahmen der *IAG Globaler Wandel – Regionale Entwicklung* zu finden.

Die Interdisziplinäre Arbeitsgruppe *Globaler Wandel – Regionale Entwicklung* geht Auswirkungen des globalen Wandels auf etablierte räumliche Ordnungsmuster nach. Das Anliegen der Arbeitsgruppe ist es, die Wechselwirkungen zwischen globalem Wandel und regionaler Entwicklung zu verstehen und daraus neue Handlungsorientierungen zu gewinnen.

