PIK Report

No. 83

STUDIE ZUR KLIMATISCHEN ENTWICKLUNG IM LAND BRANDENBURG BIS 2055 UND DEREN AUSWIRKUNGEN AUF DEN WASSERHAUSHALT, DIE FORST- UND LANDWIRTSCHAFT SOWIE DIE ABLEITUNG ERSTER PERSPEKTIVEN

F.-W. Gerstengarbe, F. Badeck, F. Hattermann,
V. Krysanova, W. Lahmer, P. Lasch, M. Stock,
F. Suckow, F. Wechsung, P. C. Werner

LAND
BRANDENBURG
Ministerium für Landwirtschaft,
Umweltschutz und Raumordnung

Gefördert durch das Ministerium für
Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung
des Landes Brandenburg

P I K

POTSDAM INSTITUTE
FOR
CLIMATE IMPACT RESEARCH (PIK)

Ansprechpartner:
Dr. Manfred Stock
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.
PF 60 12 03, D-14412 Potsdam
Tel.: +49-331-288-2506
Fax: +49-331-288-2600
E-mail: stock@pik-potsdam.de

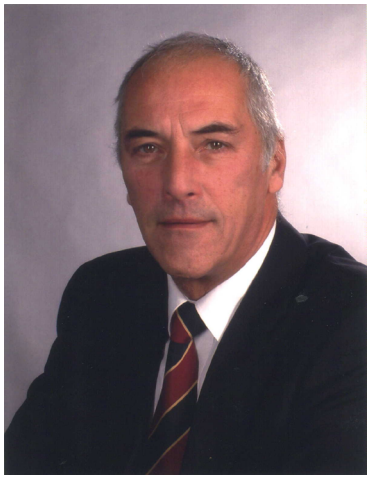
Herausgeber:
Dr. F.-W. Gerstengarbe

Technische Ausführung:
U. Werner

POTSDAM-INSTITUT
FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG
Telegrafenberg
Postfach 60 12 03, 14412 Potsdam
GERMANY
Tel.: +49 (331) 288-2500
Fax: +49 (331) 288-2600
E-mail-Adresse:pik@pik-potsdam.de

ISSN 1436-0179 POTSDAM, JUNI 2003

Grußwort



Die aktuelle Untersuchung des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis zum Jahr 2055 zeigt exemplarisch, wie anspruchsvolle Grundlagenforschung durchaus hohe Praxisrelevanz besitzen kann. Die Ergebnisse des PIK ermöglichen einen Blick in die Zukunft Brandenburgs in wichtigen Teilaspekten von Umwelt, Wasserressourcen, Land- und Forstwirtschaft. Es wird deutlich, dass der Klimawandel nicht mehr, wie noch vor wenigen Jahren, nur als theoretische Möglichkeit anzusehen ist, sondern Planungen und Aktivitäten sich hier und heute praktisch damit auseinandersetzen müssen. In der Praxis betrifft dies Entscheidungen und Planungen zum Naturschutz, zur Entwicklung des ländlichen Raumes, Ent- und Bewässerungsmaßnahmen, Hochwasserschutz, Waldumbau bis hin zum Havelausbau, um nur einige Bereiche zu nennen.

Die Autoren der Studie legen Wert auf die Feststellung, dass sie nicht Prognosen abgeben, sondern Orientierungshilfen. Ihre Bilder zur klimatischen Entwicklung in Brandenburg sind ähnlich zu interpretieren wie Radarbilder, die den einzuschlagenden Kurs nicht prognostizieren, sondern eventuell notwendige Kurskorrekturen zu Vermeidung möglicher Havarien zeigen sollen. Ein Schwerpunkt der Studie betrifft den Landschaftswasserhaushalt, bei dem aufgrund der zu erwartenden klimatischen Entwicklung Gefahren sichtbar werden. Den Wert dieser Hinweise kann angesichts der hohen Bedeutung, die Wasser für Natur und Lebensqualität hat, nicht hoch genug eingeschätzt werden. Die Studie zeigt Wege auf, wie wir in Brandenburg möglichen kritischen Entwicklungen der Ressource Wasser vorbeugend begegnen können. Hier und da wird dies auch heißen, einige tradierte Gewohnheiten und Verhaltensweisen in Frage zu stellen.

Mit der vorliegenden Studie wird die jahrelange Zusammenarbeit des PIK mit meinem Hause fortgeführt. Bereits die 1996 vorgestellte Vorläuferstudie "Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Land Brandenburg" hat die Bedeutung der Arbeit des PIK für die Region und seine Entwicklung deutlich werden lassen. Im Vergleich zum damals noch sehr unscharfen Blick in die Zukunft zeichnen sich heute durch wesentlich weiterentwickelte und verbesserte Methoden deutlich klarere Konturen ab. Dieser Fortschritt wurde ermöglicht durch eigene Forschungsarbeiten des PIK, das vom Bund geförderte Projekt GLOWA-Elbe sowie die durch den Deutschen Wetterdienst bereitgestellten Daten. Dank dieser Aktivitäten konnten die erzielten Ergebnisse mit Unterstützung meines Hauses auf Brandenburg übertragen werden. Zahlreiche Institutionen Brandenburgs sind somit in der Lage, diese Ergebnisse in ihrer praktische Arbeit zu nutzen und sich dieser ausgezeichneten Expertise zu bedienen.

Wolfgang Birthler

Minister für Landwirtschaft,
Umweltschutz und Raumordnung
des Landes Brandenburg

Abstract

The results of the second Brandenburg Study continue the approach set by the pilot study which appeared six years ago, using considerably improved methodology. The focus here is on regional climate developments and how these will affect the water budget, forestry and agriculture. In a subsequent review of the results with a view to future decision-making, necessary measures and possible options, we strive to unite scientific horizons with user perspectives.

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung - Umgang mit dem Klimawandel in Brandenburg 1

1 KLIMATOLOGIE 3

1.1 Untersuchungsmethodik 4
1.1.1 Stand der Forschung 4
1.1.2 Das Szenarienmodell 5

1.2 Die mittleren klimatischen Verhältnisse Brandenburgs 1951-2000 9
1.2.1 Lufttemperatur 9
1.2.2 Niederschlag 10
1.2.3 Sonnenscheindauer 11
1.2.4 Bewölkung 12

1.3 Berechnung des wahrscheinlichsten Zukunftsszenariums 13
1.3.1 Einleitung 13
1.3.2 Kurze Beschreibung des wahrscheinlichsten Niederschlagsszenariums für das Elbe-Einzugsgebiet 15

1.4 Die mittleren klimatischen Verhältnisse in Brandenburg für den Zeitraum 2046-2055 16
1.4.1 Lufttemperatur 16
1.4.2 Niederschlag 17
1.4.3 Sonnenscheindauer 18
1.4.4 Bewölkung 19

1.5 Vergleich der Klimaänderungen zwischen den Zeiträumen 2046/2055 und 1951/2000 20
1.5.1 Lufttemperatur 20
1.5.2 Niederschlag 21
1.5.3 Sonnenscheindauer 22
1.5.4 Bewölkung 23

1.6 Bewertung der Klimaänderungen 24

1.7 Ausblick 24

1.8 Literatur 25

2 HYDROLOGISCHE AUSWIRKUNGEN VON KLIMAÄNDERUNGEN IM LAND BRANDENBURG 27

2.1 Einführung 27

2.2 Darstellung der verwendeten Methodik 29

2.3 Beschreibung der mittleren hydrologischen Verhältnisse für den derzeitigen Klimazustand 30

2.4 Entwicklung der Grundwasserstände Brandenburgs unter derzeitigen Klimabedingungen 33

2.5 Auswirkungen des Klimaszenariums auf den Wasserhaushalt 37

2.6 Bewertung der zu erwartenden Änderungen 42

2.7 Berücksichtigung von Klimaänderungen in aktuellen Forschungsprojekten 43

2.8 Schlussfolgerungen und Empfehlungen 44

2.9 Literatur 45

3 BRANDENBURGS WÄLDER 49

3.1 Problemstellung 49

3.2 Methode 49
3.2.1 Modell 4C 50
3.2.2 Datengrundlage 51
3.2.3 Simulationsexperimente 53

3.3 Analysen und Ergebnisse 54
3.3.1 Kohlenstoffspeicherung 54
3.3.2 Grundwasserneubildung 56

3.4 Diskussion und Schlussfolgerungen 58

3.5 Literatur 59

4 AUSWIRKUNGEN VON MÖGLICHEN KLIMAÄNDERUNGEN IN DER PERIODE 2040-2050 AUF WASSERHAUSHALT UND ERTRÄGE IN DER LANDWIRTSCHAFT IN BRANDENBURG 63

4.1 Problemstellung 63

4.2 Modellierungsansatz 64

4.3 Klimaszenarium 65

4.4 Ergebnisse und Diskussion 67

4.5 Ausblick 70

4.6 Literatur 70

5 PERSPEKTIVEN FÜR BRANDENBURG IM KLIMAWANDEL 73

5.1 Wen betrifft die Studie und was erfährt man über die Zukunft? 73
5.1.1 Brandenburg muss sich auf die globale Erwärmung einstellen 73
5.1.2 Trends und Extremwerte 73
5.1.3 Wahlmöglichkeit zwischen verschiedenen Zukünften 74

5.2 Die Perspektiven der Studie für verschiedene Bereiche 75
5.2.1 Direkte Auswirkungen der Klimaänderung 75
5.2.2 Wasserwirtschaft und Wasserverkehrswege 75
5.2.3 Forst- und Landwirtschaft 76
5.3 Resümee 77
Anlage 1 79

Einleitung - Umgang mit dem Klimawandel in Brandenburg

Der globale Klimawandel zeigt heute bereits in verschiedenen Regionen der Erde deutliche, aber sehr unterschiedliche Auswirkungen. Auch in Deutschland lassen sich schon spürbare Verschiebungen der Klimazonen und andere signifikante Veränderungen von Umwelt- und Lebensbedingungen feststellen. Wir müssen uns daher die Frage stellen, wie diese Veränderungen die Region Berlin-Brandenburg betreffen und vor allem zukünftig noch betreffen werden.

Dieser Prozess spielt sich, vereinfacht betrachtet, auf zwei verschiedenen Ebenen ab, die auch unterschiedliche Entscheidungen und Maßnahmen erfordern:

- Global ändert sich das Klima aufgrund verschiedener natürlicher, hauptsächlich globaler Ursachen im Zusammenwirken mit einer Vielzahl sich summierender lokaler anthropogener Ursachen. Diese Entwicklung ist für die nächsten Jahrzehnte kaum mehr aufzuhalten, sondern wird sich wahrscheinlich noch verschärfen und beschleunigen (siehe Kapitel 1).
- Regional erscheinen die Folgen der Klimaveränderung, wobei die Auswirkungen außer vom globalen Klimawandel stark davon abhängen, wie vorbereitet und ertüchtigt oder überrascht und verwundbar eine bestimmte Region entweder vorsorgend agiert oder passiv reagiert.

Folgende Punkte werden bei nüchterner Analyse des heutigen Wissens immer deutlicher und sollten daher bei Entscheidungen und Maßnahmen berücksichtigt werden:

1. Anthropogene Emissionen von Treibhausgasen haben im Vergleich zu natürlichen Ursachen inzwischen einen wesentlichen Anteil am Klimawandel, der weiter steigen wird. Den stärksten Beitrag liefert dabei die Freisetzung von Kohlendioxid aus Verbrennung fossiler Energieressourcen. Den zweitwichtigsten Beitrag zur Erhöhung der Treibhausgaskonzentration liefert die Verdrängung naturnaher Ökosysteme durch intensive Formen der Landnutzung für Ansiedlungen, Verkehrserschließungen und industrialisierte Landwirtschaft.
2. Unbedingt notwendige Maßnahmen zur Verminderung dieser Emissionen werden infolge starker Interessenkonflikte nur zögerlich realisiert und wenn, dann führen sie auch nur mit systembedingt großer zeitlicher Verzögerung zu einer verminderten Zunahme der globalen Erwärmung. Außer den Interessenkonflikten ist der Kosten-Nutzenkonflikt zwischen heutigen und regionalen Kosten einerseits und zukünftigem und globalem Nutzen andererseits hinderlich.
3. Dieses Dilemma von großer zeitlicher Verzögerung zwischen dem Ursachenkomplex einer Zunahme oder Reduktion der Treibhausgasemissionen und der Reaktion des Klimasystems darauf als erstem Glied in der Kette der Auswirkungen ist eine große Herausforderung für eine verantwortungsvolle Politik des Klimaschutzes. Anstelle zögerlicher Umsetzung von Emissionsreduktionen sollten noch über die Kioto-Ziele hinaus reichende Maßnahmen entschlossen verfolgt werden.
4. Vor diesem Hintergrund sollte man sich bewusst sein, dass seit etwa 8000 Jahren keine Klimaänderung an Ausprägung und Geschwindigkeit nur annähernd dem ver-

gleichbar ist, was uns in den kommenden Jahrzehnten bevorsteht. Wenn dies inzwischen auch als wissenschaftlich gut begründet anzusehen ist, bestehen jedoch noch große Unsicherheiten hinsichtlich der zu erwartenden Auswirkungen. Dies ist keinesfalls Grund zur Beruhigung, sondern eher als zusätzlicher Risikofaktor anzusehen.

5. Die zwar noch nicht in aller Schärfe zu erkennenden aber möglicherweise einschneidenden Konsequenzen des Klimawandels sind jedoch auch kein Grund zur Panik. Neben den unter Punkt 2) angesprochenen Maßnahmen zum Schutz des Klimas sind parallel dazu zusätzliche Maßnahmen zur vorbeugenden Anpassung an die zu erwartende Klimaänderung dringend zu empfehlen. In diesem Sinne arbeitet die Klimafolgenforschung nicht an Prognosen über katastrophale Auswirkungen, sondern an Strategien zu ihrer Vermeidung.

Die in den folgenden Kapiteln dargestellten Ergebnisse dieser Brandenburgstudie II setzen mit wesentlich verbesserten Methoden den Ansatz der vor sechs Jahren erschienenen Pilotstudie[1] fort. Schwerpunkte sind hier regionale Klimaentwicklung und deren Auswirkungen auf Wasserhaushalt, Forst- und Landwirtschaft. In einer anschließenden Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf zu treffende Entscheidungen, einzuleitende Maßnahmen und mögliche Optionen wird versucht, den wissenschaftlichen Horizont mit der Nutzerperspektive zu verbinden.

1. Stock, M. und Tóth, F. (Hrsg.); "Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Land Brandenburg"; Pilotstudie des PIK für das MUNR, Potsdam 1996

1 KLIMATOLOGIE

2001 veröffentlichte das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) seinen Third Assessment Report *(IPCC, 2001)*. In ihm wird die zu erwartende Klimaentwicklung im 21. Jahrhundert abgeschätzt. In Abbildung 1 ist die Bandbreite der zu erwartenden mittleren globalen Temperaturerhöhung dargestellt. Sie beruht zum einen auf der Verwendung unterschiedlicher Emissionsszenarien zum anderen auf der Unsicherheit der eingesetzten Klimamodelle. Zur Abschätzung der Klimaentwicklung im Land Brandenburg wurde als Basis das globale Szenarium A1B ausgewählt, weil es die mittlere Entwicklung gut widerspiegelt, da es nicht Ziel dieser Studie war, extreme Entwicklungen abzuschätzen, sondern eine Aussage zur wahrscheinlichsten zu liefern. Wie die Werte aus dem Szenarium A1B eingesetzt werden, wird im Kapitel 1.3.1 erläutert.

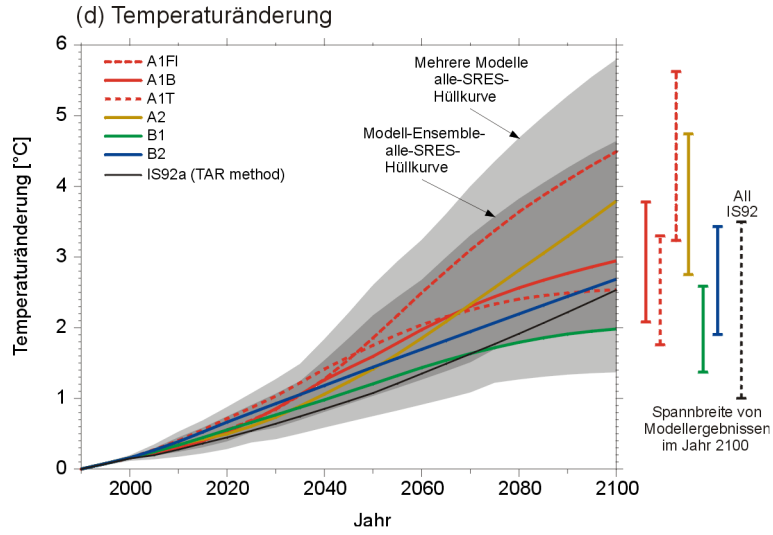


Abb. 1: Bandbreite der möglichen mittleren globalen Temperaturänderungen im 21. Jahrhundert.

Die in der folgenden Studie zusammengestellten bzw. berechneten Daten zur Klimatologie und der zukünftigen Entwicklung des Klimas im Land Brandenburg beruhen in einigen Teilen auf den Ergebnissen eines durch das BMBF geförderten Projektes zur Erforschung der Hydrologie im Elbe-Einzugsgebiet (GLOWA-ELBE, Förderkennzeichen: 07 GWK 03/). In diesem Projekt wird das gesamte Elbe-Einzugsgebiet untersucht. Da Brandenburg in dieses Gebiet eingebettet ist, können so die klimatischen Entwicklungen der Umgebung des Landes mit in die Bewertung einbezogen werden.

1.1 Untersuchungsmethodik

1.1.1 Stand der Forschung

Das Klimasystem der Erde ist ein hochgradig nichtlineares System. Das heißt, dass deren Entwicklung nicht oder nur in sehr beschränktem Maß vorhersagbar ist *(Lorenz, 1963)*. Um trotzdem zu Aussagen über mögliche Klimaentwicklungen bzw. deren Auswirkungen zu kommen, geht man den Weg über die Szenarienentwicklung. Unter einem Szenarium versteht man dabei die Beschreibung eines sich einstellenden Klimazustandes, wenn über einen definierten Zeitraum bestimmte Annahmen zur Änderung bestimmter Einflussgrößen gemacht werden. (Bekanntestes Beispiel ist die Erhöhung der Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre.) Die Art des Szenariums richtet sich nach den Änderungsgrößen, dem gewählten Maßstab sowie der spezifischen Fragestellung. Werkzeuge zur Szenarienerstellung sind sowohl Klimamodelle (Energie-Bilanz-Modelle, Zirkulationsmodelle) als auch statistische Methoden, die auch gekoppelt angewendet werden können. Im Folgenden wird ein statistisches Modell zur Entwicklung von Klimaszenarien vorgestellt, dessen Grundlage sowohl Klimamodellaussagen als auch Beobachtungsdaten sind.

Werden globale Klimaänderungen erwartet, sind in erster Linie deren regionale Auswirkungen von besonderem Interesse. Da globale Klimamodelle zur Zeit und in absehbarer Zukunft nicht in der Lage sind, für eine Region verwendbare Modellergebnisse meteorologischer Parameter zu liefern *(IPCC, 2001)*, muss zur Abschätzung von Klimaentwicklungen in solchen Gebieten auf andere Möglichkeiten der Datenbereitstellung zurückgegriffen werden. Dabei darf die Konsistenz sowohl räumlich, zeitlich als auch zwischen den meteorologischen Größen nicht verletzt werden.

Drei wesentliche Methoden zur Szenarienentwicklung werden zur Zeit diskutiert:

Im Rahmen der ersten Methode wird versucht, ein regionales Klimamodell zu entwickeln, dass in ein globales eingebettet ist und von diesem mit den notwendigen Randwerten versorgt wird (z. B. *Machenhauer et al., 1996*). Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der physikalischen Verknüpfung großskaliger und kleinskaliger Prozesse. Der Nachteil ist, dass Verknüpfungen und Prozesse zur Zeit noch zu ungenau modelliert werden und so zu Fehlern führen, die eine Weiterverwendung der Ergebnisse in der Regel nicht möglich macht.

Die zweite Methode verwendet Klimamodellergebnisse, die über statistische Verfahren in kleinerskalige Bereiche transformiert werden *(Zorita et al., 1993)*. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass direkt auf die Klimamodellergebnisse zugegriffen wird, so dass eine physikalische Fehlerfortpflanzung wie bei der Kopplung von Klimamodellen entfällt. Ein Nachteil liegt darin, dass die Fehler des Klimamodells durch den statistischen Ansatz nicht beseitigt werden, sondern direkt in das Szenarium eingehen.

Die dritte Methode geht davon aus, dass die großräumigen, vom Klimamodell angegebenen Änderungen für bestimmte meteorologische Größen in einer Region im Mittel als richtig anzusehen sind. Auf der Basis einer solchen Annahme werden langjährige Beobachtungsreihen mit entsprechenden statistischen Methoden so aufbereitet, dass sie diese Änderungen in Form eines Szenariums wiedergeben. Der Vorteil der Methode

besteht darin, dass die vorhandenen Klimamodellfehler bei der Szenarienbildung auf ein Minimum reduziert werden, wobei die bereits angeführte Konsistenz erhalten bleibt. Von Nachteil ist der nicht mehr vorhandene physikalische Zusammenhang zwischen den Klimamodellergebnissen und denen des Szenariums.

Da die beiden erstgenannten Vorgehensweisen zur Zeit noch keine oder nur eingeschränkt befriedigende Ergebnisse liefern wurde hier auf der Basis der letztgenannten Methode ein Modell entwickelt, das zu einer Resultatsverbesserung führt.

1.1.2 Das Szenarienmodell

a) Grundprinzip

Basis des Szenarienaufbaus sind beobachtete Zeitreihen meteorologischer Größen. Entsprechend der Aufgabenstellung, das heißt, der Beantwortung der Frage welche Entwicklungstendenz welcher meteorologischen Größe untersucht werden soll, wird eine Bezugsgröße für die Untersuchungen ausgewählt. Berücksichtigt werden muss dabei, welche meteorologische Größe in ihrer tendenziellen Entwicklung vom globalen Klimamodell hinreichend genau reproduziert wird. (Sieht man zum Beispiel die großräumige Temperaturerhöhung in den nächsten Jahrzehnten als ein sicheres Ergebnis der Klimamodelle an, empfiehlt es sich, die Temperatur als Bezugsgröße auszuwählen.) Nach diesen Vorgaben wird der Bezugsgröße aus den Beobachtungen die vom Klimamodell vorgegebene Änderung aufgeprägt. Dies wird in der Regel ein Trend sein. Durch einen speziellen Algorithmus werden die anderen beobachteten meteorologischen Größen konsistent diesen Änderungen angepasst. Dabei wird darauf geachtet, dass deren statistische Grundeigenschaften und Zusammenhänge im wesentlichen erhalten bleiben.

b) Beschreibung des beobachteten Klimas

- Statistisch konstante Kenngrößen

Da, wie bereits erwähnt, die statistischen Charakteristika des simulierten Klimas nicht wesentlich von denen des beobachteten abweichen sollen, müssen letztere in einem ersten Schritt bestimmt werden. Bei den Kenngrößen handelt es sich um den Mittelwert (in der Simulation zuzüglich der vorgegebenen Änderung), die Standardabweichung, die Erhaltungsneigung, den Jahresgang sowie die interannuelle Variabilität.

Eine detaillierte Beschreibung dieser Charakteristika ist hier nicht notwendig, da diese als allgemein bekannt vorausgesetzt werden. Es muß aber darauf hingewiesen werden, dass die Güte der Schätzung der Charakteristika wesentlich von der Länge der Beobachtungsreihen (Stichprobenumfang) sowie deren Qualität abhängt.

Eine wichtige Rolle spielt außerdem die zeitliche Auflösung der vorhandenen Beobachtungsreihen, die entsprechend gewählt werden muss (z. B. Tageswerte).

- Einbeziehung komplexer Zusammenhänge

Hat man eine Bezugsgröße festgelegt, so werden gleiche bzw. ähnliche Werte innerhalb der Beobachtungsreihe auftreten. Dabei können die Ursachen, die zu diesen Werten führen durchaus unterschiedlich sein. (Gleiche Tagesmitteltemperaturen können sowohl bei großer als auch kleiner Tagesamplitude auftreten.) Dies wiederum hat Auswirkungen

auf die dazu parallel auftretenden anderen meteorologischen Größen. Um hier zu einer richtigen Erfassung dieser komplexen Zusammenhänge zu kommen, muss die Bezugsgröße durch mehrere sie beschreibende Parameter charakterisiert werden. Bei der angeführten Temperatur können dies das Tagesminimum, das Tagesmaximum, das Temperaturverhalten der Vortage (Erhaltungsneigung) und die Tagesamplitude sein. Müssen die jahreszeitlichen Variationen noch berücksichtigt werden, ist ein weiterer Parameter zur Beschreibung nötig, wie zum Beispiel die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer.

Nach Festlegung der die Bezugsgröße beschreibenden Parameter kann man diese mit Hilfe multivariater Verfahren exakt klassifizieren. In dem vorliegenden Modell wird dazu ein speziell dafür entwickeltes Cluster-Analyseverfahren verwendet *(Gerstengarbe, Werner, 1997; Gerstengarbe et al., 1999)*. Diese Methode ermöglicht es, die Werte der Bezugsgröße in statistisch signifikant voneinander getrennte Cluster einzuteilen bei gleichzeitig automatischer Bestimmung der optimalen Cluster-Anzahl. Dabei erfolgt die Clusterung nach einer vorgegebenen Elementauswahl, in diesem Fall nach der Zeiteinheit (z.B. Tag). Man erhält also eine Anzahl von Clustern, in denen jeweils eine bestimmte Menge von Elementen (Tage einer Zeitreihe) enthalten ist. Somit lassen sich jedem Element in einem Cluster die konkreten Werte der anderen meteorologischen Größen exakt zuordnen. Die weitere Verwendung der mit der Cluster-Analyse aus der Beobachtungsreihe gewonnenen Ergebnisse wird in Abschnitt d) erläutert.

c) Erstellung des simulierten Klimas

- Bearbeitung der Bezugsgröße

Die Erstellung der simulierten Reihe der Bezugsgröße erfolgt in mehreren Schritten. Gegeben sind dazu die Tagesmittelwerte einer mehrjährigen Beobachtungsreihe.

1. Schritt
Berechnung der Jahresmittelwerte aus den Beobachtungen, Bestimmung der interannuellen Variabilität und Rangbestimmung. Die Rangbestimmung ist notwendig, um die Witterungscharakteristik der einzelnen Jahre besser erfassen zu können.

2. Schritt
Erzeugung einer simulierten Reihe der Jahresmittelwerte mit Hilfe eines Zufallszahlengenerators unter Berücksichtigung der statistischen Eigenschaften der Beobachtungsreihe und Rangbestimmung.

3. Schritt
Aufprägung der vorgegebenen Änderung (Trend) auf die simulierte Reihe.

4. Schritt
Bestimmung der Anomalien zwischen Tageswert und Jahresmittelwert für jedes Jahr der Beobachtungsreihe.

5. Schritt
Jedem simulierten Jahr werden entsprechend seines Ranges die entsprechenden Anomalien der Tageswerte zufällig zugeordnet. Dabei setzt sich jeder Tageswert zusammen aus Summe von Jahresmittelwert, dem Wert der Änderung und dem Anomaliewert.

6. Schritt
Da der Erhalt der statistischen Charakteristika eine wichtige Randbedingung darstellt, muss die simulierte Reihe entsprechend überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden.

7. Schritt
Um im Folgenden auf die Beobachtungsgrößen zurückgreifen zu können, werden die gleichen, die Bezugsgröße beschreibenden Parameter (s. Cluster-Analyse) für die simulierte Reihe bestimmt.

d) Verknüpfung von beobachtetem und simuliertem Klima

Mit Abarbeitung des 6. Schrittes aus Abschnitt c) ist eine Simulation der Bezugsgröße vollständig abgeschlossen. Dieser Bezugsgröße müssen nun die anderen meteorologischen Größen zugeordnet werden. Dazu werden die im 7. Schritt berechneten Parameterkombinationen verwendet. Jede dieser Parameterkombinationen lässt sich in eines der berechneten Cluster der Beobachtungsreihe (s. Abschnitt b)) mit Hilfe des Abstandes von Mahalanobis *(Weber, 1980)* einordnen. Danach wird ein Element (Tag) aus diesem Cluster "bedingt zufällig" ausgewählt. Dadurch können die anderen meteorologischen Größen unter Wahrung der Konsistenz dem jeweiligen Tag in der simulierten Reihe zugeordnet werden. "Bedingt zufällig" bedeutet dabei, dass zur Sicherung der Erhaltungsneigung der jeweilig davorliegende Tag bei der Auswahl berücksichtigt wird.

Behandelt werden muss jetzt noch die Situation, dass aufgrund der vorgegebenen Änderung (Trend) Werte in der simulierten Reihe der Bezugsgröße auftreten, die außerhalb des Wertebereichs der Beobachtungsreihe liegen. In diesem Fall wird angenommen, dass die Werte der anderen meteorologischen Größen ihren beobachteten Wertebereich nicht verlassen. Dieses Vorgehen ist berechtigt, da Voruntersuchungen gezeigt haben, dass in diesem Fall der Fehler deutlich geringer ist als bei einer nicht gesicherten Extrapolation dieser Größen. Damit ist es möglich, die zuzuordnenden Elemente entsprechend der geschilderten Vorgehensweise aus den den extremalen Bereich beschreibenden Clustern zu entnehmen. Man erhält für eine Station ein vollständig simuliertes Klima, das durch die vorgegebenen meteorologischen Größen charakterisiert ist.

Zur Beschreibung der räumlichen Struktur des Klimas sind in der Regel mehrere Stationen notwendig. Sind mehrere Stationen (Beobachtungsreihen) vorhanden, muss bei der Erstellung des simulierten Klimas die beobachtete räumliche Struktur erhalten bleiben. Um dies zu gewährleisten wird wie folgt vorgegangen:

Bei der Beschreibung regionaler Klimaänderungen kann man davon ausgehen, dass das Untersuchungsgebiet im großräumigen Maßstab ein einheitliches Klimagebiet darstellt. Aus diesem Grund wird in einem ersten Schritt eine Bezugsstation ausgewählt, die die mittleren klimatischen Verhältnisse dieser Region am besten widerspiegelt. Für diese Station wird das simulierte Klima wie oben beschrieben erstellt. Da aufgrund dieser Vorgehensweise bekannt ist, welches Element (Tag) der Beobachtungsreihe an welcher Stelle der simulierten Reihe eingesetzt wurde, kann man für jede weitere Beobachtungsreihe eine entsprechende simulierte Reihe erzeugen. Dabei bleibt die räumliche Konsistenz aufgrund der vorgegebenen Annahmen erhalten.

e) Erzeugung einer ausreichend großen Stichprobe von Szenarien

Wie unter d) bereits erwähnt, wurde mit dem Algorithmus bisher nur eine Realisierung berechnet. Um eine Wahrscheinlichkeitsaussage zur Sicherheit des Eintretens der simulierten Klimaänderungen zu treffen, müssen entsprechend viele Realisierungen erzeugt werden. Dies wird erreicht, indem man mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation eine Reihe in der zeitlichen Abfolge zufällig erzeugter Realisierungen berechnet. Das heißt, dass die unter c) angegebenen Arbeitsschritte 2-7 sowie der Arbeitsschritt d) für jede Realisierung neu berechnet werden. In Abbildung 2 ist die Grundstruktur des Modellaufbaus dargestellt.

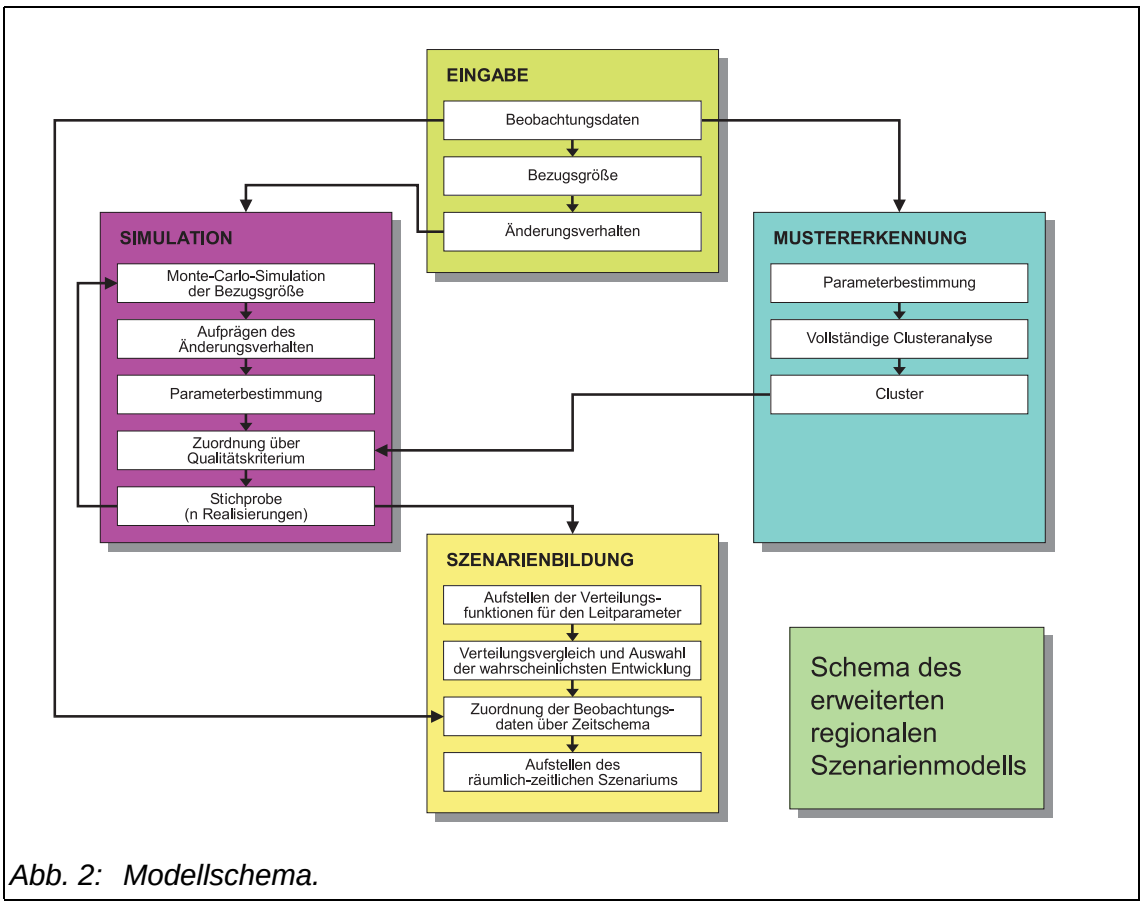


Abb. 2: Modellschema.

f) Ergebnisse

Das Modell erzeugt Zeitreihen auf Tageswertbasis die räumlich und in den Beziehungen zwischen den einzelnen meteorologischen Größen konsistent sind. Sie sind somit einsetzbar in den Modellen der Klimafolgenforschung. Darüber hinaus lassen sich aus den Reihen klimatologische Charakteristika ableiten (Trends, Mittelwerte, Varianzen, Verteilungen etc.). Nicht erzeugt werden können (außer für die Bezugsgröße Temperatur) neue, noch nicht beobachtete Extreme von Tageswerten (z. B. Tagessumme des Niederschlags).

1.2 Die mittleren klimatischen Verhältnisse Brandenburgs 1951-2000

1.2.1 Lufttemperatur

Die räumliche Struktur der Jahresmittelwerte der Lufttemperatur ist Abbildung 3 zu entnehmen. Man erkennt, dass je nach Region, die Werte zwischen 7.8 °C und 9.5 °C schwanken. Die wärmeren Regionen findet man im Berliner Raum und westlich bis südwestlich davon sowie im Südosten. Maximum und Minimum der Lufttemperatur sind räumlich ähnlich strukturiert. Sie reichen von 12.1 °C - 13.9 °C bzw. von 4.0 °C - 5.8 °C. Weitere Angaben zu Parametern der Lufttemperatur sind in Tabelle 1 gelistet. Die Angaben beziehen sich jeweils auf den grössten bzw. kleinsten im Land Brandenburg zwischen 1951 und 2000 beobachteten Wert.

Parameter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Heisse Tage	0 - 5 [1)]	0 - 27	0 - 6	-	0 - 27
Sommertage	0 - 24	3 - 63	0 - 16	-	5 - 76
Frosttage	3 - 46	0 - 1	0 - 32	21 - 90	35 - 148
Eistage	0 - 13	-	0 - 13	1 - 75	0 - 74
Max. Temp.	33.8 [2)]	39.4	33.3	19.8	39.4
Min. Temp.	-22.5	-1.4	-23.3	-29.5	-29.5

Tab. 1: Temperaturcharakteristika für Brandenburg.
Heisse Tage: Tmax>= 30 °C, Sommertage: Tmax>= 25 °C [1)] *Tage pro Jahr,*
Frosttage: Tmin < 0 °C, Eistage: Tmax < 0 °C [2)] *° C*

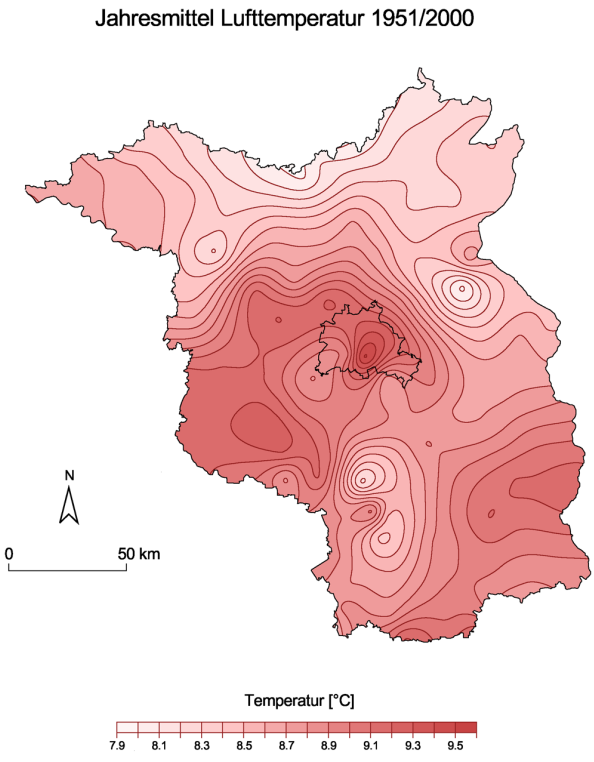


Abb. 3: Räumliche Verteilung des Jahresmittels der Lufttemperatur, Zeitraum 1951/2000.

1.2.2 Niederschlag

Die räumliche Struktur der Jahressummen des Niederschlags ist Abbildung 4 zu entnehmen. Bezüglich des Niederschlagsdargebots ist Brandenburg im Vergleich zu anderen Teilen Deutschlands trocken. Das Gebietsmittel für das Land liegt deutlich unter 600 mm pro Jahr wobei der Nordosten mit weniger als 500 mm am trockensten ist. Tabelle 2 ergänzt die Angaben zum Niederschlagsverhalten.

Parameter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Summe	38 - 313	35 - 464	37 - 310	34 - 277	298 - 860
N.-Tage.	16 - 72	13 - 77	16 - 80	19 - 83	88 - 293
Tagesmax.	109	172	70	38	172

Tab. 2: Niederschlagscharakteristika für Brandenburg.
Summe: mm; N.-Tage: Anzahl der Tage mit Niederschlag >=0. mm;
Tagesmax.: Höchste Tagessumme des Niederschlags in mm

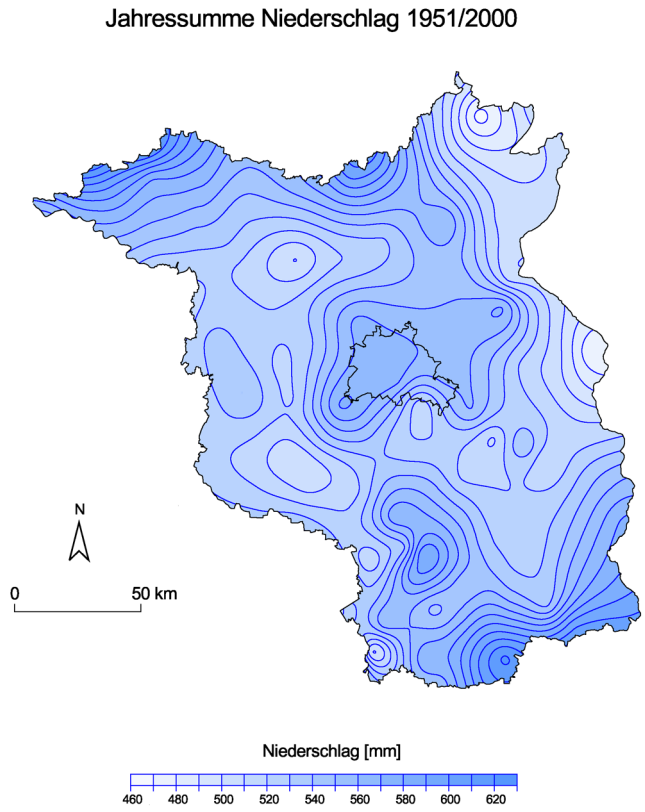


Abb. 4: Räumliche Verteilung der Jahressumme des Niederschlags, Zeitraum 1951/2000.

1.2.3 Sonnenscheindauer

Im Mittel scheint die Sonne in Brandenburg zwischen 4.2 und 4.7 Stunden pro Tag (Abbildung 5). Dabei sind die Werte räumlich wenig strukturiert. Der Nordwesten weist die geringste Sonnenscheindauer auf, der mittlere und nordöstliche Teil die höchste. Weitere Angaben sind der Tabelle 3 zu entnehmen.

Parameter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Summe	314 - 749	457 - 867	177 - 555	65 - 267	1237 - 2121
Tage o. So	0 - 28	0 - 16	0 - 38	0 - 61	1 - 126

Tab. 3: Charakteristika der Sonnenscheindauer für Brandenburg. Summe: h; Tage o. So: Anzahl der Tage ohne Sonnenschein

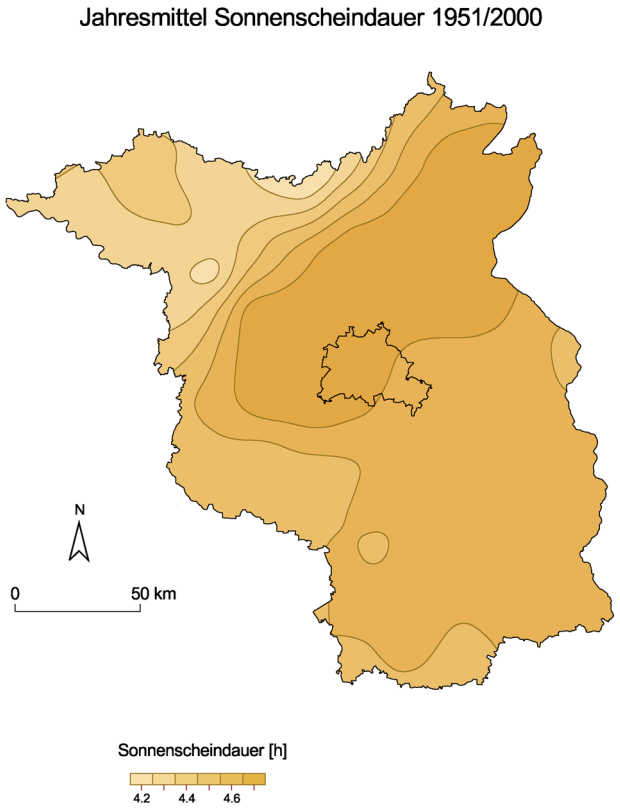


Abb. 5: Räumliche Verteilung des Jahresmittels der Sonnenscheindauer, Zeitraum 1951/2000.

1.2.4 Bewölkung

Gebiete geringer mittlerer Bewölkung liegen nördlich von Berlin sowie im Süden Brandenburgs. Die höchsten Werte findet man im Nordwesten, Nordosten und südwestlich von Berlin. Insgesamt sind die regionalen Unterschiede aber nur gering (Abbildung 6).

Parameter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
heitere Tage	0 - 54	0 - 42	0 - 27	0 - 16	4 - 126
trübe Tage	4 - 50	2 - 44	8 - 52	16 - 67	44 - 176

Tab. 4: Charakteristika der Bewölkung für Brandenburg.
Heitere Tage: Bedeckungsgrad <= 1/8; trübe Tage: Bedeckungsgrad >= 7/8

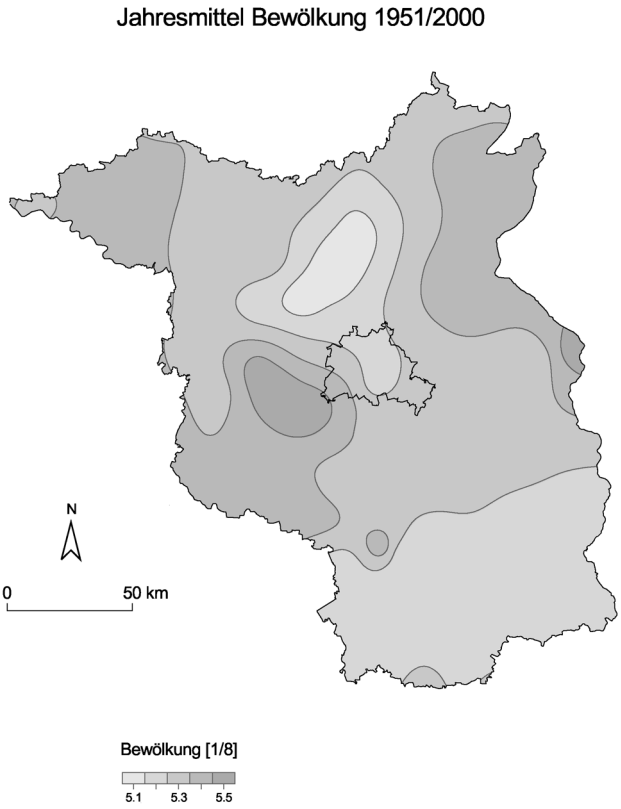


Abb. 6: Räumliche Verteilung des Jahresmittels des Bedeckungsgrades, Zeitraum 1951/2000.

1.3 Berechnung des wahrscheinlichsten Zukunftsszenariums

1.3.1 Einleitung

Die Szenarienberechnungen beruhen auf einem vorgegebenen Temperaturtrend von ca. 1.4 K für den Zeitraum 2001-2055. Dieser Trend wurde aus Ergebnisdaten des Klimamodelllaufs ECHAM4-OPYC3 des MPI für Meteorologie Hamburg bestimmt *(DKRZ, 2001)*. Diesem Lauf liegt das A1B-CO_2-Emissionsszenarium *(IPCC, 2001)* zugrunde, was eine relativ moderate Temperaturerhöhung zur Folge hat. Um eine ausreichend große Stichprobe zu bekommen, wurden 100 Simulationsläufe (Realisierungen) sowohl für den Beobachtungszeitraum als auch den Simulationszeitraum durchgeführt. Aus der Verteilung der daraus gewonnenen Niederschlagstrends (s. Tabelle 5a, b) wurde das **wahrscheinlichste Zukunftsszenarium** zur Interpretation wie folgt ausgewählt:

Klasse Nr.	Klassengrenze	Prozentualer Anteil
1	< -47.4 mm	2
2	< -32.8 mm	5
3	< -18.2 mm	10
4	< -3.6 mm	15
5	< 11.0 mm	12
6	< 25.6 mm	18
7	< 40.2 mm	16
8	< 51.1 mm	10
9	< 65.7 mm	6
10	>= 65.7 mm	6

Tab. 5a: Verteilung der Niederschlagstrends für die Station Magdeburg auf der Basis der simulierten Daten für den Zeitraum 2001-2055

Klasse Nr.	Klassengrenze	Prozentualer Anteil
1	< -69.4 mm	2
2	< -62.0 mm	5
3	< -47.4 mm	10
4	< -39.8 mm	15
5	< -32.5 mm	12
6	< -17.9 mm	18
7	< -6.9 mm	16
8	< 3.6 mm	10
9	< 18.2 mm	6
10	>= 18.2 mm	6

Tab. 5b: Verteilung der Niederschlagstrends für die Station Magdeburg auf der Basis der simulierten Daten für den Beobachtungszeitraum 1951-2000.

Da der Temperaturtrend vorgegeben wurde, ergeben sich nur für die anderen meteorologischen Größen Variationen in den Trends bezüglich der einzelnen Realisierungen.

Meteorologisch gesehen ist dabei der Niederschlag die wichtigste Größe und wurde deshalb als Bezug für die Bestimmung des wahrscheinlichsten Szenariums verwendet.

Der Zeitraum 2001-2055 (und kein längerer bis z.B. 2100) wurde aus zwei Gründen gewählt:

1. Für ein statistisches Szenarienmodell dürfen sich die zukünftigen Änderungen nicht zu weit von den Ausgangsbedingungen (Beobachtungen) entfernen, damit die Beziehungen zwischen den einzelnen meteorologischen Größen im statistischen Sinn noch als konstant betrachtet werden können.
2. Nach ca. 2050 laufen die globalen Klimaszenarien (s. Abbildung 1) sehr weit auseinander in Abhängigkeit von der angenommenen Entwicklung der Treibhausgasemissionen. Außerdem werden auch die Fehler der globalen Klimamodelle größer. Das bedeutet insgesamt, dass die Aussagen zur Klimaentwicklung in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts sehr unsicher sind.

Der Vergleich der Trendverteilungen der simulierten Werte für die Zukunft (Tabelle 5a) und der für den Beobachtungszeitraum (Tabelle 5b) sowie die Heranziehung des tatsächlich beobachteten Niederschlagstrends, erlaubt abzuschätzen, welche Realisierung für die Zeit 2001-2055 die wahrscheinlichste ist. Der beobachtete Trend an der Station Magdeburg (Abbildung 7), als einer typischen Station für das Elbe-Einzugsgebiet und somit auch für das Land Brandenburg, beträgt -81.6 mm, der entsprechende simulierte Trend -75.0 mm und die obere Grenze der nach unten offenen Klasse der Häufigkeitsverteilung < -69.4 mm. Damit ergibt sich aus der "Simulationsweise" des Modells, dass die Realisierung mit einer starken Niederschlagsabnahme die wahrscheinlichste darstellt.

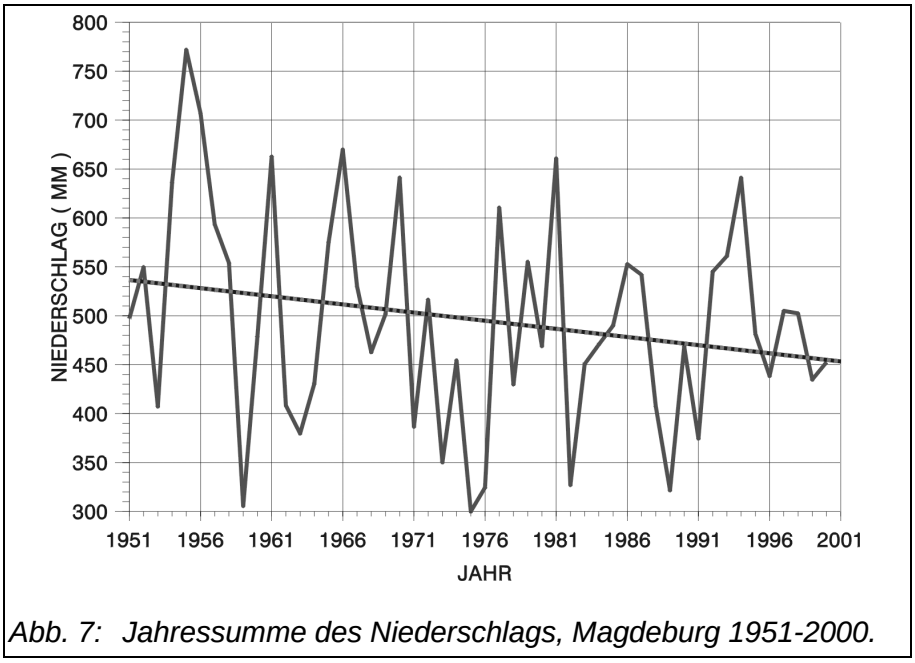


Abb. 7: Jahressumme des Niederschlags, Magdeburg 1951-2000.

1.3.2 Kurze Beschreibung des wahrscheinlichsten Niederschlagsszenariums für das Elbe-Einzugsgebiet

Eine erste Interpretation der Niederschlagsentwicklung im Szenarienzeitraum kann anhand der Abbildung 8a und Abbildung 8b vorgenommen werden. Man erkennt, dass sich das Gebiet mit einer jährlichen Niederschlagssumme < 500 mm deutlich vergrössert. Dabei gibt es in diesem Bereich sogar Regionen, in denen die Niederschlagssumme unter 400 mm pro Jahr sinkt, wie zum Beispiel im Leebereich des Harzes. Zieht man zur weiteren Analyse die Differenzenkarte des Niederschlags 2046/55-1951/00 heran (Abbildung 8b) erkennt man, dass es Regionen mit einer Niederschlagsabnahme > 200 mm gibt (z.B. im Gebiet um Luckau oder auch im Lee des Fichtelbergs). Andererseits ist eine Niederschlagszunahme bis zu 300 mm in den westlich gelegenen Gebirgsregionen (Harz und Thüringer Wald) zu beobachten. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass grosse Teile des Elbe-Einzugsgebietes bei der vorgegebenen Entwicklung mit hoher Wahrscheinlichkeit von einem deutlichen Niederschlagsrückgang betroffen werden.

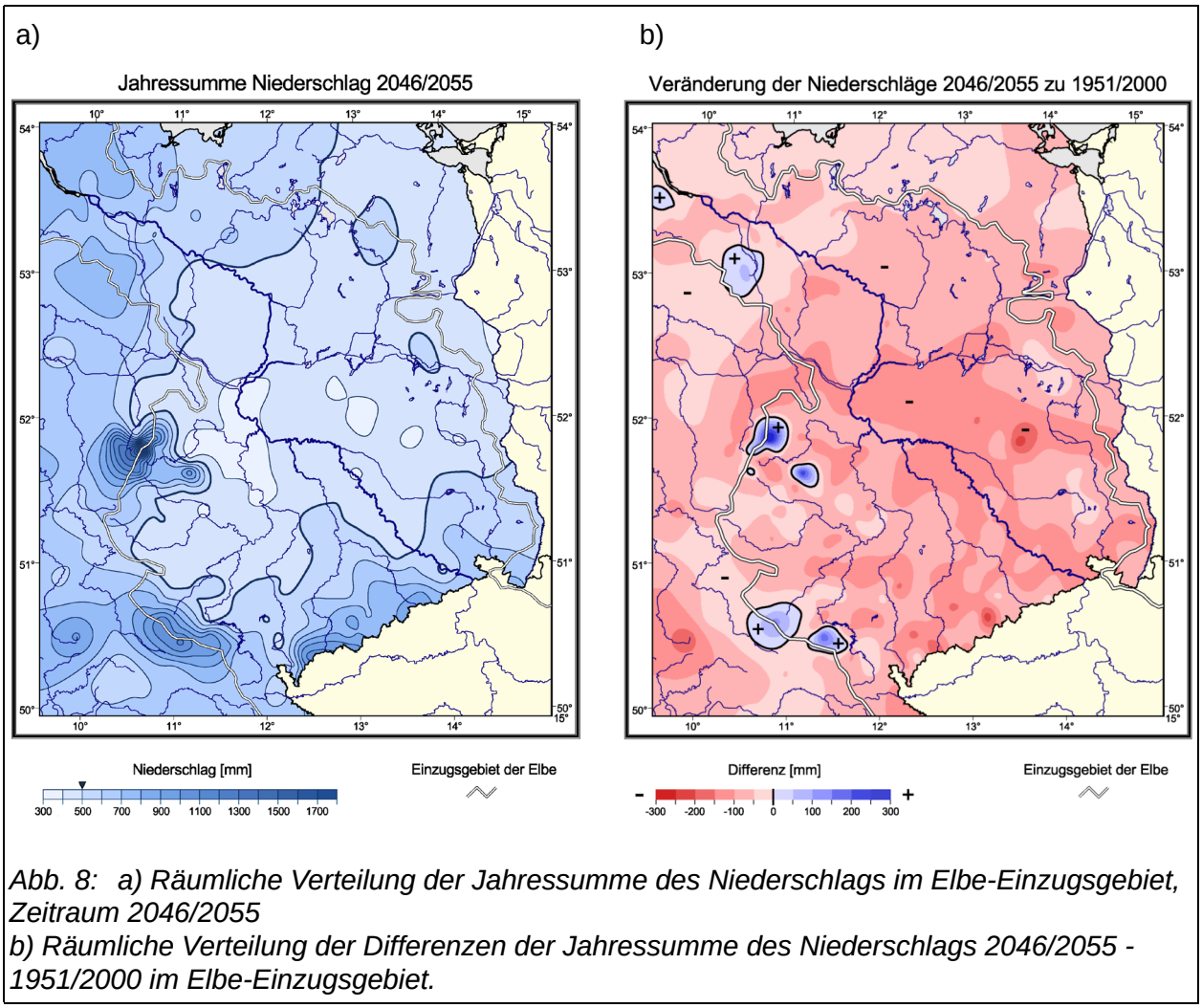


Abb. 8: a) Räumliche Verteilung der Jahressumme des Niederschlags im Elbe-Einzugsgebiet, Zeitraum 2046/2055
b) Räumliche Verteilung der Differenzen der Jahressumme des Niederschlags 2046/2055 - 1951/2000 im Elbe-Einzugsgebiet.

1.4 Die mittleren klimatischen Verhältnisse in Brandenburg für den Zeitraum 2046-2055

1.4.1 Lufttemperatur

Die räumliche Struktur der Jahresmittelwerte der Lufttemperatur ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Werte schwanken zwischen 10.1°C und 11.6°C. Die wärmeren Regionen findet man wiederum im Berliner Raum und west- bis südwestlich davon sowie im Südosten. Maximum und Minimum der Lufttemperatur sind räumlich ähnlich strukturiert. Sie reichen von 14.0 °C - 16.1 °C bzw. von 5.8 °C - 7.5 °C. Weitere Angaben zu Parametern der Lufttemperatur sind in Tabelle 6 gelistet. Die Angaben beziehen sich jeweils auf den grössten bzw. kleinsten im Land Brandenburg zwischen 2046 und 2055 beobachteten Wert.

Parameter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Heisse Tage	0 - 4	0 - 31	0 - 6	-	0 - 38
Sommertage	1 - 18	19 - 70	0 - 21	-	22 - 89
Frosttage	0 - 31	-	0 - 17	10 - 65	28 - 101
Eistage	0 - 5	-	0 - 7	0 - 36	0 - 41
Max. Temp.	36.3	38.2	34.9	19.2	37.9
Min. Temp.	-12.6	1.0	-7.9	-20.3	-20.3

Tab. 6: Temperaturcharakteristika für Brandenburg.
Heisse Tage: Tmax>= 30 °C, Sommertage: Tmax>= 25 °C,
Frosttage: Tmin < 0 °C, Eistage: Tmax < 0 °C

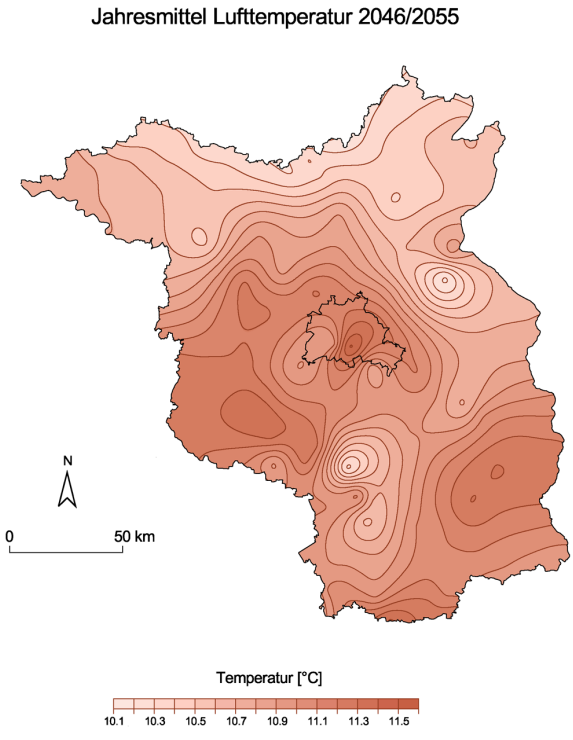


Abb. 9: Räumliche Verteilung des Jahresmittels der Lufttemperatur, Zeitraum 2046/2055.

1.4.2 Niederschlag

Die Abbildung 10 zeigt die räumliche Struktur der Jahressummen des Niederschlags. Das Gebietsmittel für das Land liegt deutlich unter 450 mm pro Jahr wobei der Nordosten und besonders das Gebiet vom Fläming bis zur Niederlausitz mit weniger als 400 mm am trockensten ist. Tabelle 7 vervollständigt die Angaben zum Niederschlagsverhalten.

Parameter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Summe	45 - 226	39 - 296	24 - 241	37 - 203	274 - 712
N.-Tage.	21 - 59	12 - 51	15 - 63	19 - 74	95 - 227
Tagesmax.	68	148	82	33	148

Tab. 7: Niederschlagscharakteristika für Brandenburg.
Summe: mm; N.-Tage: Anzahl der Tage mit Niederschlag >=0.1 mm;
Tagesmax.: Höchste Tagessumme des Niederschlags in mm

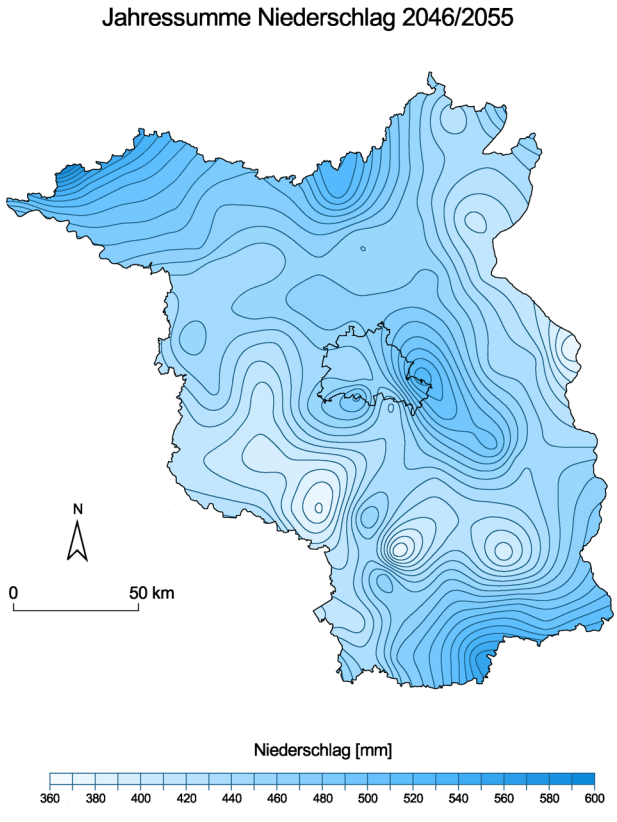


Abb. 10: Räumliche Verteilung der Jahressumme des Niederschlags, Zeitraum 2046/2055.

1.4.3 Sonnenscheindauer

Eine leichte Zunahme der Schwankungsbreite der Sonnenscheindauer (0.2 h) führt zu einer etwas strukturierteren regionalen Verteilung der mittleren Stundenwerte (Abbildung 11).

Parameter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Summe	442 - 614	498 - 919	248 - 491	75 - 248	1366 - 2108
Tage o. So	0 - 19	0 - 12	1 - 34	0 - 52	4 - 93

Tab. 8: Charakteristika der Sonnenscheindauer für Brandenburg. Summe: h; Tage o. So: Anzahl der Tage ohne Sonnenschein

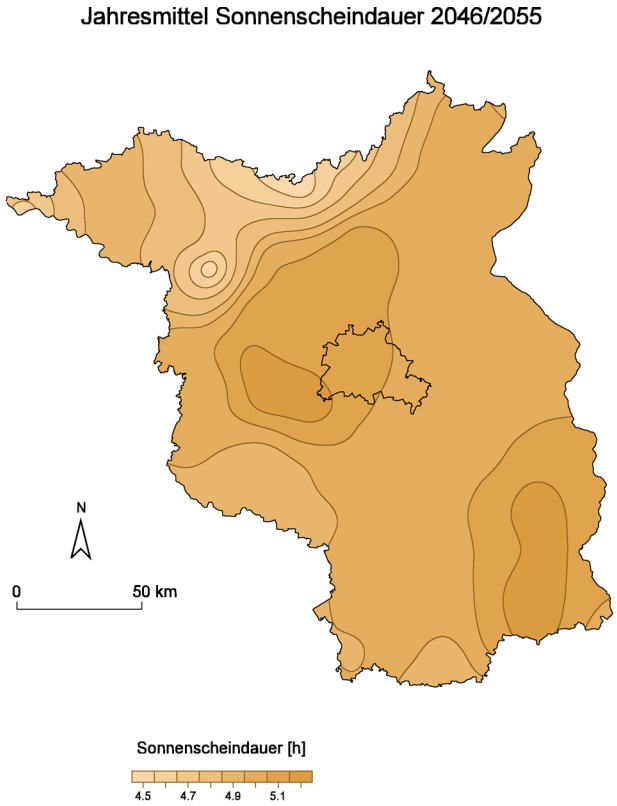


Abb. 11: Räumliche Verteilung des Jahresmittels der Sonnenscheindauer, Zeitraum 2046/2051.

1.4.4 Bewölkung

Die wesentliche Struktur der Bewölkungscharakteristik wird auch im Zeitraum 2046/2055 beibehalten (Abbildung 12).

Parameter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
heitere Tage	2 - 16	1 - 24	2 - 20	0 - 16	7 - 67
trübe Tage	6 - 31	0 - 24	10 - 41	16 - 51	49 - 131

Tab. 9: Charakteristika der Bewölkung für Brandenburg.
Heitere Tage: Bedeckungsgrad <= 1/8; trübe Tage: Bedeckungsgrad >= 7/8

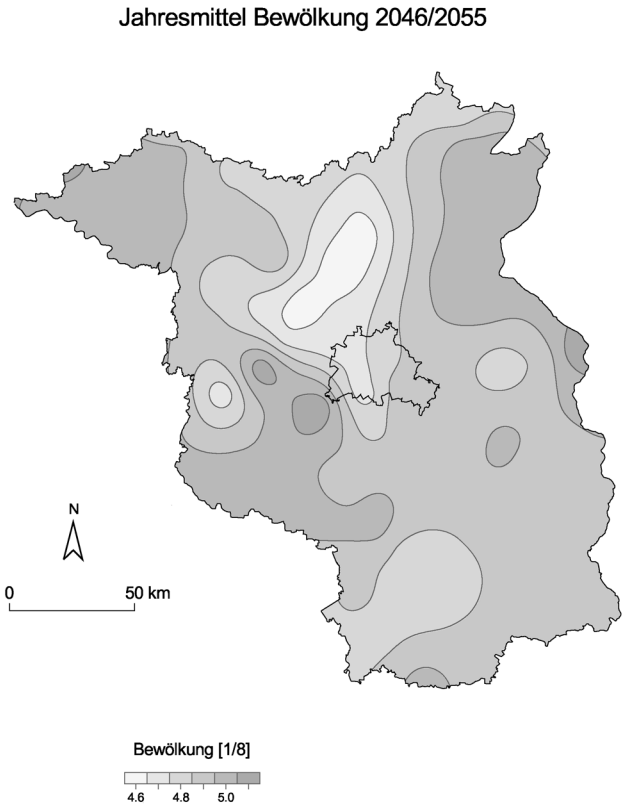


Abb. 12: Räumliche Verteilung des Jahresmittels des Bedeckungsgrades, Zeitraum 2046/2055.

1.5 Vergleich der Klimaänderungen zwischen den Zeiträumen 2046/2055 und 1951/2000

1.5.1 Lufttemperatur

Die Abbildung 13 zeigt die Temperaturdifferenz zwischen den letzten 10 Jahren des Szenarienzeitraums und dem Mittelwert des Beobachtungszeitraums. Die Differenzen sind generell größer als 2 K und sind räumlich nur schwach strukturiert. Das bedeutet, dass die zeitlichen Änderungen stärker ausfallen als die Verschiebung der räumlichen Temperaturverteilung, die im wesentlichen erhalten bleibt mit ihren "Wärme-" und "Kältezentren".

Im Gegensatz zu den nur schwach strukturierten räumlichen Temperaturdifferenzen unterscheiden sich die in der Tabelle 1 und Tabelle 6 angegebenen Temperaturcharakteristika deutlich voneinander. So liegt die Anzahl der heissen Tage und der Sommertage im Zeitraum 2046/55 deutlich höher als im Zeitraum 1951/2000. Invers dazu verhalten sich die Häufigkeiten von Frost- und Eistagen. Gleichzeitig weisen die höchsten Tagesmaxima nur im Frühjahr und Herbst einen Anstieg auf (im Sommer und Winter liegen sie unter den Beobachtungswerten) wohingegen die niedrigsten Minima in allen Jahreszeiten angehoben werden.

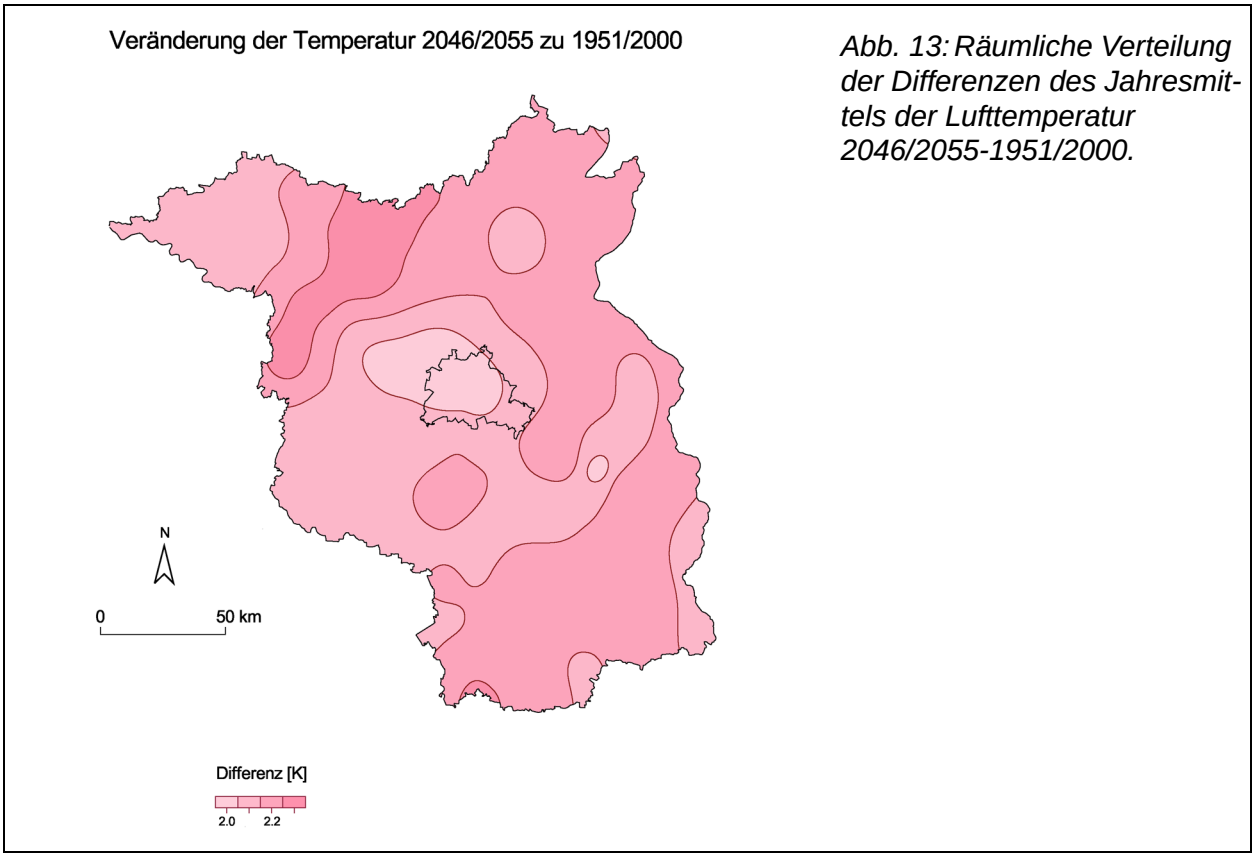


Abb. 13: Räumliche Verteilung der Differenzen des Jahresmittels der Lufttemperatur 2046/2055-1951/2000.

1.5.2 Niederschlag

Aus Abbildung 14 ist zu erkennen, dass es bis zum Ende des Szenarienzeitraums zu einer deutlichen Abnahme in den Jahressummen des Niederschlags für alle Regionen Brandenburgs kommt. Es ist eine starke räumliche Differenzierung der Abnahme zu verzeichnen. Sie reicht von -17.8 mm (südöstlich Berlins) bis zu -221.0 mm (Luckau).

Im Vergleich der Tabelle 2 und Tabelle 7 für die beiden Zeiträume spiegelt sich der allgemeine Niederschlagsrückgang wider. Alle Parameter zeigen am Ende des Szenariumzeitraums kleinere Werte (ausser der höchsten Tagessumme im Herbst) als im Ist-Klima.

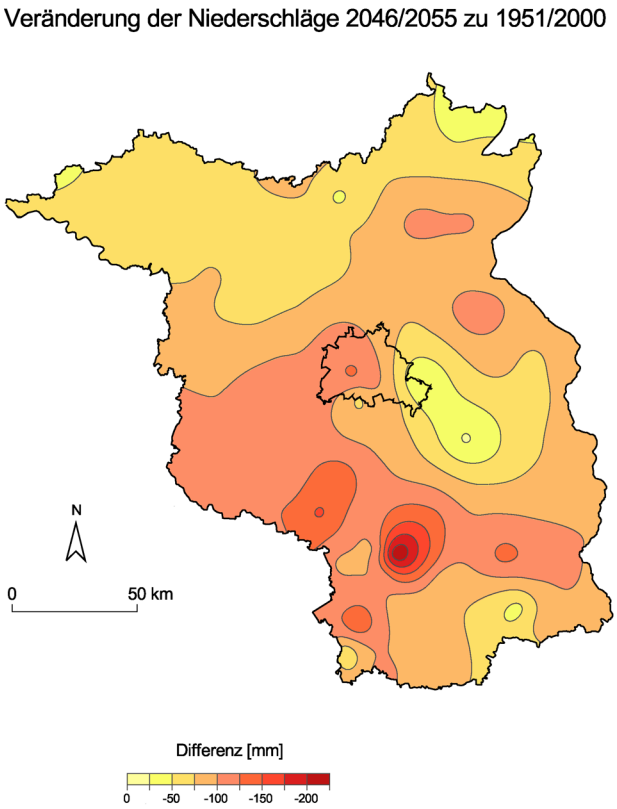


Abb. 14: Räumliche Verteilung der Differenzen der Jahressumme des Niederschlags 2046/2055-1951/2000.

1.5.3 Sonnenscheindauer

Die Sonnenscheindauer nimmt im Szenarienzeitraum generell im gesamten Gebiet Brandenburgs zu (Abbildung 15). Der höchste Anstieg ist im Nordwesten und im Südosten mit mindesten 0.6 Stunden pro Tag zu verzeichnen. Aus der Tabelle 3 und der Tabelle 8 ist zu ersehen, dass die Minimalsumme der Sonnenscheindauer im Szenarienzeitraum für alle Jahreszeiten angestiegen ist, bei der Maximalsumme gilt dies nur für den Sommer. Gleichzeitig gehen die Tage ohne Sonnenschein deutlich zurück.

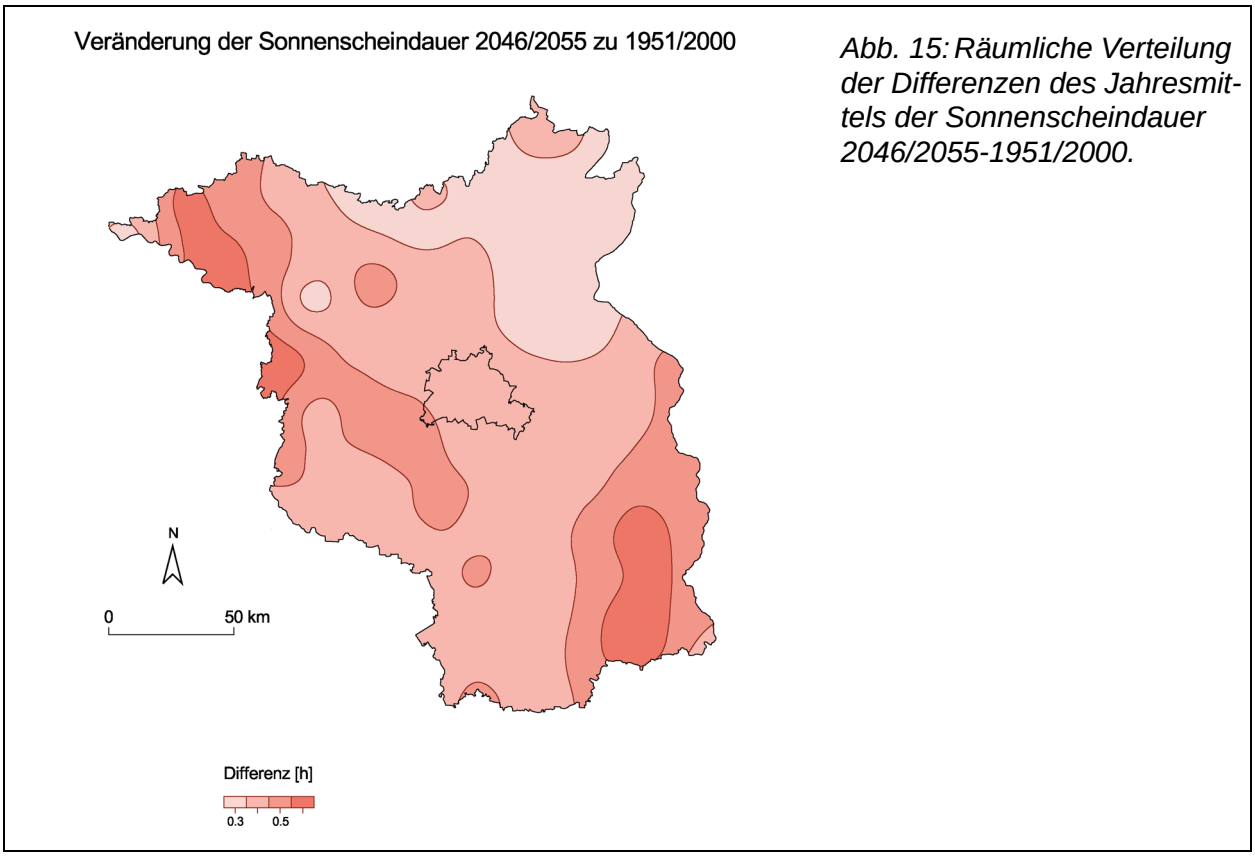


Abb. 15: Räumliche Verteilung der Differenzen des Jahresmittels der Sonnenscheindauer 2046/2055-1951/2000.

1.5.4 Bewölkung

Parallel zur Zunahme der Sonnenscheindauer nimmt die Bewölkung im gesamten Untersuchungsgebiet ab (Abbildung 16), wobei die stärkste Abnahme in einem Streifen, der westlich bis nördlich von Berlin liegt, zu beobachten ist. Ein Vergleich der Tabelle 4 und der Tabelle 9 zeigt, dass in allen Jahreszeiten sowohl die heiteren als auch die trüben Tage abnehmen. Das heisst, dass im Szenarienzeitraum die Schwankungsbreite der Bewölkung gegenüber dem Beobachtungszeitraum deutlich zurückgeht.

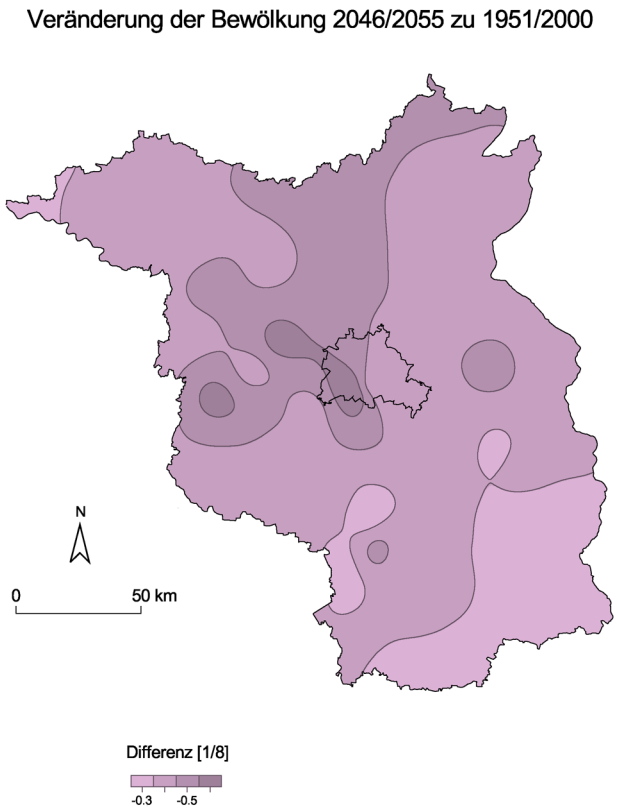


Abb. 16: Räumliche Verteilung der Differenzen des Jahresmittels des Bedeckungsgrades 2046/2055-1951/2000.

1.6 Bewertung der Klimaänderungen

Bei einer moderaten Vorgabe eines mittleren Temperaturanstiegs von 1.4 K für den Zeitraum 2001/2055 ergibt sich als markanteste Klimaänderung ein deutlicher Rückgang in den Jahressummen des Niederschlags. Der stärkste Rückgang ist dabei im Sommer zu beobachten. Damit verbunden ist eine Zunahme der Sonnenscheindauer bei gleichzeitigem Rückgang der Bewölkung und ihrer Schwankungsbreite.

Anmerkung: Nicht diskutiert wurden die im klimatologischen Sinn geringen Änderungen, die statistisch nicht signifikant sind, der meteorologischen Grössen Luftdruck, Wasserdampfdruck, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit. Allerdings werden diese Grössen in den folgenden Untersuchungen verwendet und tragen somit zu Änderungen in der Hydrologie, Land- und Forstwirtschaft des Landes Brandenburg bei.

Das Szenarium A1B geht in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts von einer deutlichen Emissionsminderung aus. Trotzdem wird sich der Temperaturanstieg bis zum Ende des Jahrhunderts fortsetzen. Das heisst, dass es hinsichtlich der Klimaentwicklung Brandenburgs keine Entwarnung geben wird, sich also die Randbedingungen, denen man sich anpassen muss, noch verschärfen werden.

Die Ergebnisse des Projektes GLOWA-Elbe (s. auch Kapitel 1) zeigen, dass sich im gesamten Elbe-Einzugsgebiet das Klima wie in Brandenburg entwickeln wird und daher z. B. keine Entlastung des Wasserdargebots (s. Kapitel 2.5 und Kapitel 2.6) durch eine höhere Wasserführung der Flüsse oder durch Überleitungen zu erwarten ist.

1.7 Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse stellen die mittlere Klimaentwicklung Brandenburgs dar. Offen ist noch die Frage, wie sich in den nächsten 50 Jahren extreme Ereignisse hinsichtlich der Häufigkeit und Intensität ihres Auftretens entwickeln werden. Diese Frage ist von besonderem Interesse, da im Rahmen der zu erwartenden Klimaänderungen mit einer Zunahme extremer Ereignisse zu rechnen ist. Aus diesem Grund befasst sich der in Vorbereitung befindliche 4. Assessment Report des IPCC mit der Frage der globalen Entwicklung extremer Ereignisse.

Außerdem müssen dazu noch die regionalen dynamischen Klimamodelle auf einen Stand gebracht werden, der Aussagen zu Extremen in ihrem räumlichen und zeitlichen Auftreten ermöglicht. Aber heute kann man schon einschätzen, dass die Extreme wie Hochwasser, Dürren, Stürme u. a. auch zukünftig weiter zunehmen werden oder sich ihre Anzahl auf einem hohen Niveau stabilisiert. Global nahmen diese Erscheinungen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts um mehr als das Vierfache zu *(Münchener Rück, 2000)*.

Aufgrund der nicht expliziten Untersuchung der Extreme konnten auch die von außen kommenden Einflüsse wie die Entstehung von Hochwässern in den Oberläufen von Elbe, Spree und Oder durch Starkregen nicht behandelt werden.

Als Beispiel für eine Untersuchung zu den Folgen von Extremen kann die bereits vor einiger Zeit am PIK erstellte Studie zur Waldbrandgefährdung im Land Brandenburg bis 2050 angeführt werden, deren Ergebnisse der Anlage 1 zu entnehmen sind.

1.8 Literatur

DKRZ, (2001): http://www.dkrz.de/, unter: Klimadatenbank/Klimadatensätze am DKRZ.

Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., (1997): "A method to estimate the statistical confidence of cluster separation", *Theor. Appl. Climatol.*, **57**, p. 103-110.

Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., Fraedrich, K. (1999): "Applying non-hierarchical cluster analysis algorithms to climate classification: some problems and their solution", *Theor. Appl. Climatol.*, **64**, 3-4, p.143-150.

IPCC (2001): "Climate change 2000, Summary for policy makers", Cambridge University Press, Cambridge UK.

Lorenz, E.N., (1963): "Deterministic nonperiodic flow", *J. Atm. Sciences*, **20** (130), p. 448.

Machenhauer, B., Windelband, M., Potzet, M., Jones, R.G., Déqué, M., (1996): "Validation of present-day regional climate simulations over Europe: nested LAM and variable resolution global model simulations with observed or mixed layer ocean boundary conditons", Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 191, Hamburg.

Münchener Rück, (2000): "topics 2000, Naturkatastrophen - Stand der Dinge", Sonderheft Millennium, München.

Weber, E., (1980): "Grundriß der biologischen Statistik", VEB Gustav Fischer Verlag, Jena.

Zorita, E., Hughes, J.P., Lettemaier, D.P., Storch, H.v., (1993): "Stochastic characterization of regional circulation patterns for climate model diagnosis and estimation of local precipitation", Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 109, Hamburg.

Brandenburg liegt im Bereich des gemässigten, kontinentalen Klimas mit einer durchschnittlichen Jahresmitteltemperatur je nach Region zwischen 7.8 °C und 9.5 °C. Das Land gehört mit einer Jahresniederschlagssumme deutlich unter 600 mm (im Nordosten weniger als 500 mm) zu den trockensten Regionen Deutschlands. Dabei nahmen insbesondere in den letzten Jahrzehnten die Summen der Sommerniederschläge zur Zeit deutlich ab, die der Winterniederschläge leicht zu.

Innerhalb der nächsten 50 Jahre sind bei einem moderaten Temperaturanstieg von 1.4 K in Brandenburg folgende Klimaänderungen im Vergleich zur aktuellen Situation zu erwarten:

- *Niederschlagsrückgang*

  Das Gebietsmittel der Jahressumme liegt um 2050 unter 450 mm, im Nordosten und Süden Brandenburgs unter 400 mm.

  Die Abnahme ist räumlich stark differenziert und reicht von -17.8 mm (südöstlich von Berlin) bis zu -221.0 mm um Luckau.

- *Zunahme der Sonnenscheindauer*

  Höchster Anstieg mit mindestens 0.6 h pro Tag im Nordwesten und Südosten.

- *Abnahme der Bewölkung*

  Am deutlichsten dokumentiert durch einen Rückgang der Anzahl trüber Tage.

2 HYDROLOGISCHE AUSWIRKUNGEN VON KLIMAÄNDERUNGEN IM LAND BRANDENBURG

2.1 Einführung

Ein sich insbesondere in den letzten Jahren andeutender Klimawandel und durch ihn vermehrt auftretende Naturkatastrophen, vom Menschen verursachte Eingriffe in die Umwelt (wie z. B. Veränderungen des natürlichen Abflussgeschehens durch Landnutzungsänderungen und infrastrukturelle Maßnahmen), aber auch Fehlplanungen und Misswirtschaft führen weltweit zu einer Zuspitzung von Wasserproblemen, welche die Umsetzung einer ausreichenden Wasserversorgung sowie einer nachhaltigen Entwicklung auf diesem Sektor beeinträchtigen. Die Überbeanspruchung der Wasserressourcen, verschärft durch lange Trockenperioden und extreme Hochwasserereignisse erhöhen die sozialen und ökonomischen Probleme auch in Ländern der sogenannten "1. Welt". Die zunehmenden Ansprüche an das begrenzt verfügbare Gut Wasser erfordern deshalb eine umweltverträgliche und nachhaltige Bewirtschaftung dieser Ressource.

Die Einflüsse von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt resultieren u. a. aus räumlichen und innerjährlichen Verschiebungen des Niederschlags, Änderungen der Verdunstung aufgrund ansteigender Temperaturen und einer Zunahme von Extremereignissen (Starkregen, Trockenperioden, Dürren). Änderungen von Klimagrößen haben somit direkten Einfluss auf die hydrologischen Prozesse und damit auf die regionale Wasserbilanz und den Betrieb hydrologisch-wasserwirtschaftlicher Systeme (siehe z. B. *Becker und Lahmer 1996, Lahmer und Becker 2000, Lahmer et al. 2001b, Lahmer 2002a/b/c*). Neben diesen hydrologischen Auswirkungen können Klimavariabilität und Klimaschwankungen auch signifikante Auswirkungen auf andere naturräumliche Systeme sowie auf volkswirtschaftlicher Ebenen haben.

Zu den von Wasser weniger begünstigten Regionen gehört auch das Land Brandenburg, wo viele der global erkennbaren Tendenzen regional ihren Niederschlag finden. Hinsichtlich des Landschaftswasserhaushaltes finden sich in Brandenburg (und allgemein in großen Teilen des pleistozänen norddeutschen Tieflandes) besondere naturräumliche Bedingungen. So ist Brandenburg bei Jahresniederschlagssummen von etwa 500 bis 650 mm einerseits als "wasserarm", im Hinblick auf seinen hohen Feuchtgebiets- und Gewässeranteil andererseits als "gewässerreich" einzustufen. Grund für diesen scheinbaren Widerspruch sind die geomorphologischen Besonderheiten mit verbreitet auftretenden sandigen Böden und gut durchlässigen Grundwasserleitern.

Trotz häufig "verregneter Sommer" in den letzten Jahren und trotz der in Zusammenhang mit der Jahrhundertflut im August 2002 auch im Havelgebiet aufgetretenen Überflutungen (siehe Abbildung 17) wird für Brandenburg (und Ostdeutschland generell) in Zukunft eine zunehmende Trockenheit prognostiziert. Die Änderungen des Wasserdargebotes werden gravierende Auswirkungen auf den regionalen Wasserhaushalt allgemein, auf die Wasserverfügbarkeit sowie auf verschiedenste volkswirtschaftlich bedeutende Sektoren (wie z. B. die Versorgung mit qualitativ hochwertigem Trinkwasser) mit sich bringen.



Abb. 17: In Zusammenhang mit der "Elbe-Jahrhundertflut" im August 2002 auch im Havelgebiet aufgetretene Überflutungen (Foto: W. Lahmer, 21.08.2002).

Aufgabe der Wissenschaft muss es deshalb sein, diese Auswirkungen mit den neuesten zur Verfügung stehenden Methoden zu analysieren, um die Gesellschaft auf die drohenden Gefahren hinzuweisen und rechtzeitig entsprechende Vorsorgemaßnahmen einzuleiten. Nachfolgend sollen deshalb folgende Fragen diskutiert werden:

- Welche Tendenzen zeigt der Wasserhaushalt Brandenburgs gegenwärtig?
- Wie verstärken sich diese Tendenzen unter Annahme eines Klimawandels?
- Welche Auswirkungen auf den Wasserhaushalt sind mittel- bis langfristig zu erwarten?
- Wie reagieren aktuelle Forschungsprogramme auf die beobachteten Tendenzen und auf die Zunahme von Extremereignissen?
- Welche Konsequenzen sind aus den bislang durchgeführten Untersuchungen zu ziehen?

Zur Beantwortung dieser Fragen sollen nachfolgend die im Land Brandenburg existierenden Gefahren für einen nachhaltigen Umgang mit der Ressource Wasser dargestellt werden. Da Informations- und Wissensdefizite zu Risiken bei der Identifizierung von

Gebieten mit einer kritischen Wassersituation und bei der Ableitung von Strategien führen, die für jedes Gebiet eine ausreichende Wasserversorgung und eine nachhaltige Entwicklung sichern, stellen umfangreiche Untersuchungen der örtlichen und regionalen Bedingungen die Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung von Gegenmaßnahmen dar. Nach einer kurzen Beschreibung der für die Untersuchungen verwendeten Methodik (Kapitel 2.2) werden deshalb zunächst die mittleren hydrologischen Verhältnisse in Brandenburg diskutiert (Kapitel 2.3). Anschließend wird anhand durchgeführter Trenduntersuchungen die Entwicklung der Grundwasserstände für den derzeitigen Klimazustand dargestellt (Kapitel 2.4). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden Ergebnissen gegenüber gestellt, die aus der Anwendung des in Kapitel 1.4 beschriebenen 1.4 K-Klimaänderungsszenariums resultieren (Kapitel 2.5). Die wesentlichen Resultate beider Studien werden anschließend zusammenfassend diskutiert (Kapitel 2.6).

Gegenüber der Frage nach dem Einfluss von Klimaänderungen auf die Wasserverfügbarkeit wurde die Frage, auf welche Weise die Gesellschaft den Zustand des Wasserkreislaufes direkt beeinflusst, bislang weniger beachtet. Hohe Bedeutung haben deshalb ganzheitliche Methoden, die Klimawirkungen, Landnutzungseffekte, sozio-ökonomische Aspekte und andere Einflussfaktoren bei den Analysen einschließen. Am Beispiel eines aktuellen, in den Rahmen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie eingebundenen Forschungsprojektes sollen deshalb in Kapitel 2.7 die Grundzüge einer integrierten Einzugsgebietsbetrachtung dargelegt werden und der Frage nachgegangen werden, inwieweit Klimaänderungen in aktuellen, hydrologisch relevanten Forschungsprojekten berücksichtigt werden. Auf der Basis dieser Diskussion werden am Ende (Kapitel 2.8) Schlussfolgerungen gezogen und Handlungsempfehlungen an die Politik von Seiten der Wissenschaft unterbreitet.

2.2 Darstellung der verwendeten Methodik

Zur Ableitung aussagekräftiger wasserhaushaltsrelevanter Ergebnisse auf der regionalen Ebene ist der Einsatz eines Wasserhaushaltsmodells notwendig, das für meso- bis makroskalige Gebiete (Flächengrößen von einigen 100 bis zu einigen 10.000 km²) belastbare Ergebnisse liefert. Die flächendeckende, zeitlich und räumlich hoch aufgelöste hydrologische Modellierung erfordert dabei eine der räumlichen Skala angemessene Herangehensweise, bei der die räumlichen Variabilitäten des Untersuchungsgebietes hinreichend genau erfasst werden. Dazu gehört die realitätsnahe Berücksichtigung klimatischer Triebkräfte *(Lahmer et al. 1999b, Lahmer et al. 2000a)* ebenso wie räumliche Aggregationsverfahren bei der Datenaufbereitung und der Durchführung der Simulationsrechnungen *(Lahmer et al. 1999a, Lahmer et al. 2001a)*.

Für die durchgeführten Arbeiten wurde das hydrologische Modellierungssystem ArcEGMO *(Pfützner 2002, Becker et al. 2002)* eingesetzt, das für hydrologische Einzugsgebiete sowie beliebig geformte Landschaftseinheiten die Modellierung aller maßgeblichen Prozesse des Landschaftswasserhaushaltes ermöglicht und sich aus verschiedenen Gründen für die hier vorgestellten Studien eignet. Dazu gehören neben der Anbindung an ein Geographisches Informationssystem (GIS) die Verwendung allgemein verfügbarer Karten, eine variable Untergliederung des Einzugsgebietes in beliebige hydrologische Flächeneinheiten sowie die zeitliche Aggregation aller Ergebnisgrößen zu

(mittleren) Monats-, Sommer-, Winter- und Jahreswerten. Im Gegensatz zu den meisten Modellen erfolgt die Modellierung nicht raster- sondern polygonbasiert, woraus sich zum einen eine bessere Anpassung an die Heterogenität des Untersuchungsgebietes ergibt, zum anderen bestimmte Fragestellungen problemorientierter bearbeitet werden können.

Die hohe zeitliche Auflösung von üblicherweise einem Tag eignet sich besonders gut für Szenarienrechnungen zu den Auswirkungen globaler Änderungen, da dort Informationen auf Tages- oder Monatsbasis eine entscheidende Rolle spielen *(Lahmer et al. 2001a, Müller-Wohlfeil et al. 2000)*. Auch Untersuchungen zur Hochwassergefährdung lassen sich (insbesondere bei Verwendung noch höher aufgelöster meteorologischer Eingangsdaten) durchführen *(Lahmer et al. 2000b)*. Positiv für solche Untersuchungen wirken sich insbesondere die variablen Möglichkeiten der räumlichen Aggregierung und Disaggregierung aus, die im Fall von Langzeitsimulationen (z. B. 50 bis 100 Jahre im Fall von Klimaänderungsszenarien) eine effektive Modellierung erst ermöglichen. Was die Zuverlässigkeit der mit ArcEGMO erzielten Ergebnisse betrifft, die sich aus Datenungenauigkeiten, der Dichte der benötigten meteorologischen Informationen und ihrer Übertragung in die Fläche oder der räumlichen Aggregierung von Informationen ergeben, so zeigen entsprechende Sensitivitätsanalysen (*Lahmer et al. 1999b und 2000a*), dass - je nach Untersuchungsgebiet und Datenlage - mit Ungenauigkeiten der absoluten Werte von bis zu 15% zu rechnen ist. Für relative Änderungen (wie z. B. beim später diskutierten Vergleich der Ergebnisse von zwei Klimazuständen) fallen die Ungenauigkeiten allerdings erheblich geringer aus. Weitere Informationen zu ArcEGMO sind unter www.arcegmo.de auch im Internet verfügbar.

Als räumliche Datengrundlagen für die Modellierungen wurden flächendeckend für das Land Brandenburg verfügbare Karten verwendet, die in einer für die Bearbeitung in einem GIS aufbereiteten Form zur Verfügung standen und den besonderen Anforderungen an die mesoskalige Modellierung entsprachen. Diese Karten enthalten Informationen zur Landnutzung und -bedeckung, zu den Böden, der Topographie, den mittleren Grundwasserständen sowie zur Einteilung des Landes Brandenburg in insgesamt 196 Teilgebiete. Für Wasserhaushaltsmodellierungen mit hoher zeitlich Auflösung werden darüber hinaus räumlich verteilte dynamische Informationen für den Niederschlag (die wichtigste Triebkraft hydrologischer Prozesse) sowie für weitere zur Berechnung der Verdunstung verwendete meteorologische Variablen (mittl. Tagestemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Sonnenscheindauer) benötigt. Entsprechende, an Niederschlags- und Klimahauptstationen erhobene Zeitreihen wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bereitgestellt. Ein Überblick über die für die Modellierungsarbeiten verwendeten räumlichen Grundlagenkarten samt kartographischer Darstellungen findet sich in *Lahmer et al. 2001c*. Die räumlichen Datengrundlagen wurden für alle nachfolgend beschriebenen Untersuchungen verwendet.

2.3 Beschreibung der mittleren hydrologischen Verhältnisse für den derzeitigen Klimazustand

Basis für Impaktanalysen unter Annahme eines geänderten Klimazustandes ist eine möglichst realitätsnahe Erfassung des gegenwärtigen hydrologischen Zustandes des Untersuchungsgebietes. Die Beschreibung der mittleren hydrologischen Verhältnisse für

den Zeitraum 1961-1998 war Inhalt der Studie "Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg" *(Lahmer et al. 2001c)*, die im Auftrag des Landesumweltamtes (LUA) Brandenburg erstellt wurde. Da sich die in Kapitel 2.5 beschriebenen Impaktanalysen auf den erweiterten Zeitraum 1951-2000 beziehen, wurde dieser Zustand zum Vergleich mit den Ergebnissen des Klimaänderungsszenariums (Zeitraum 2001-2055) neu erfasst.

Dazu wurden unter Verwendung des im vorangehenden Kapitel beschriebenen hydrologischen Modellierungssystems ArcEGMO für den "Ist-Zustand" (Referenzszenarium, Zeitraum 1951-2000) räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Wasserhaushaltsberechnungen für das Land Brandenburg durchgeführt und alle wichtigen Wasserhaushaltsgrößen wie Verdunstung, Sickerwasserbildung und Gesamtabfluss berechnet. Grundlage für die Berechnungen war das beobachtete Klima in der Periode 1951-2000 an insgesamt 85 Klimastationen. Da die meisten der für das Referenzszenarium erzielten Ergebnisse aus Gründen eines einfacheren Vergleiches in Zusammenhang mit denen des Klimaszenariums (Kapitel 2.5) dargestellt werden, soll sich die Beschreibung an dieser Stelle auf einige wenige Ergebnisse beschränken.

Wasserhaushaltsgröße	**PI**	**LT**	**EP**	**WB**	**ER**	**SWB**	**RO**	**QC**	
Referenzszenarium (Periode 1951-2000)									
mittl. Jahressummen	603.5	8.69	628.0	-24.5	511.1	80.7	11.9	101.0	mm/Jahr
mittl. Sommersummen	341.4	14.65	517.8	-176.4	403.0	-21.7	5.8	40.3	mm/Jahr
mittl. Wintersummen	262.1	2.74	110.2	151.9	108.1	102.4	6.1	60.7	mm/Jahr
1.4 K-Klimaänderungsszenarium (Periode 2001-2055)									
mittl. Jahressummen	553.6	10.03	677.9	-124.3	510.3	34.4	9.0	57.4	mm/Jahr
mittl. Sommersummen	315.4	15.97	547.0	-231.6	382.6	-34.1	4.4	23.6	mm/Jahr
mittl. Wintersummen	238.2	4.09	130.9	107.3	127.7	68.5	4.6	33.8	mm/Jahr
Differenzen zwischen 1.4K-Szenarium und Referenzszenarium									
mittl. Jahressummen	-49.9	1.34	49.9	-99.8	-0.8	-46.3	-2.8	-43.6	mm/Jahr
	-8.3	15.4	7.9	-406.9	-0.2	-57.4	-23.8	-43.2	%
mittl. Sommersummen	-26.0	1.32	29.2	-55.2	-20.4	-12.4	-1.4	-16.8	mm/Jahr
	-7.6	9.0	5.6	-31.3	-5.1	-56.9	-23.4	-41.6	%
mittl. Wintersummen	-23.9	1.35	20.7	-44.5	19.6	-34.0	-1.5	-26.9	mm/Jahr
	-9.1	49.4	18.7	-29.3	18.2	-33.2	-24.3	-44.3	%

Tab. 10: Für das Land Brandenburg berechnete mittlere Jahres-, Winter- und Sommersummen für die meteorologischen Eingangsgrößen Niederschlag (PI), mittl. Tagestemperatur (LT), potenzielle Verdunstung (EP), klimatische Wasserbilanz (WB) und die Wasserhaushaltsgrößen reale Verdunstung (ER), Sickerwasserbildung (SWB), Oberflächenabflussbildung (RO) und Gebietsabfluss (QC) für das Referenzszenarium (1951-2000) und das 1.4 K-Klimaänderungsszenarium (2001-2055) (Werte jeweils in mm/Jahr bzw. in °C für LT). Unten sind die zwischen dem 1.4 K-Klimaänderungsszenarium und dem Referenzszenarium berechneten Differenzen angegeben (jeweils in mm/Jahr bzw. in °C für LT sowie in % darunter).

So enthält der obere Teil von Tabelle 10 die mit Hilfe von ArcEGMO für das Referenzszenarium berechneten mittleren Jahres-, Sommer- (Monate Mai bis Oktober) und Wintersummen (Monate November bis April) aller meteorologischen Eingangs- sowie damit berechneter Wasserhaushaltsgrößen. Der Übersicht halber sind auch die für das 1.4 K-Klimaänderungsszenarium ermittelten und später in Kapitel 2.5 näher diskutierten Werte bereits hier angegeben.

Neben zeitlich aggregierten Ergebnissen erlauben flächendifferenzierte Ergebnisse (Karten) Aussagen zu besonders gefährdeten Teilregionen im Untersuchungsgebiet. Stellvertretend für die brandenburgweit berechneten Ergebnisse sind in Abbildung 18 die räumlichen Verteilungen der Verdunstung, Sickerwasserbildung, Oberflächenabflussbildung und Gesamtabflusshöhe dargestellt. Alle Karten zeigen eine starke Differenzierung der entsprechenden Werte, die von den Gebietseigenschaften (Vegetation, Bodeneigenschaften, Grundwasserstände), aber auch von den mittleren meteorologischen Bedingungen abhängt. So sind in der Karte der Oberflächenabflussbildung beispielsweise die durch einen hohen Versiegelungsgrad charakterisierten Städte deutlich zu erkennen. Die Auswirkungen eines geänderten Klimas auf diese Karten wird in Kapitel 2.5 diskutiert.

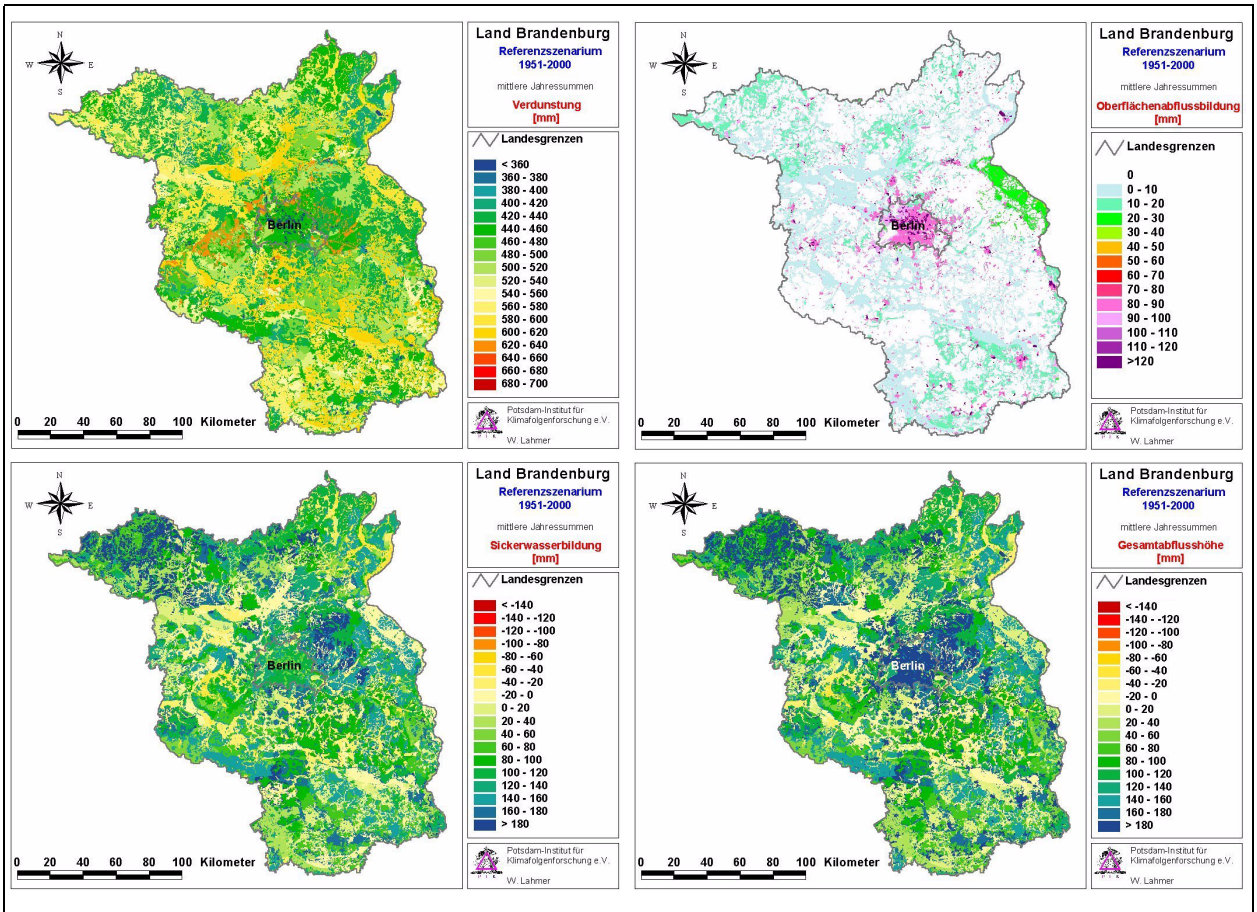


Abb. 18: Flächendarstellungen der für das Land Brandenburg berechneten Verdunstung, Sickerwasserbildung, Oberflächenabflussbildung und Gesamtabflusshöhe für das Referenzszenarium (beobachtetes Klima im Zeitraum 1951-2000).

2.4 Entwicklung der Grundwasserstände Brandenburgs unter derzeitigen Klimabedingungen

Nach jüngsten, auf der Auswertung von etwa 1.000 Grundwassermessstellen basierenden Untersuchungen des LUA Brandenburg weisen die Grundwasserstände Brandenburgs in den letzten Jahren eine fallende Tendenz auf (siehe Abbildung 19). Die Analyse langjähriger Ganglinien des Grundwasserstandes zeigt überwiegend einen schwachen Abfall, der oft anthropogen bedingt ist (z. B. Einstellung der Rieselfeldbewirtschaftung). Es werden aber auch Absenkungen beobachtet, die keine direkte anthropogene Ursache haben. Anstiege des Grundwasserstandes in bestimmten Regionen scheinen dagegen überwiegend anthropogen bedingt zu sein, z. B. durch die Einstellung der Entwässerung von Tagebauen oder die Steuerung des Grundwasserstandes durch Schöpfwerke. Der Grundwasserstand stabilisiert sich in den 90er Jahren landesweit auf einem Niveau, das unter dem vor 1970 liegt.

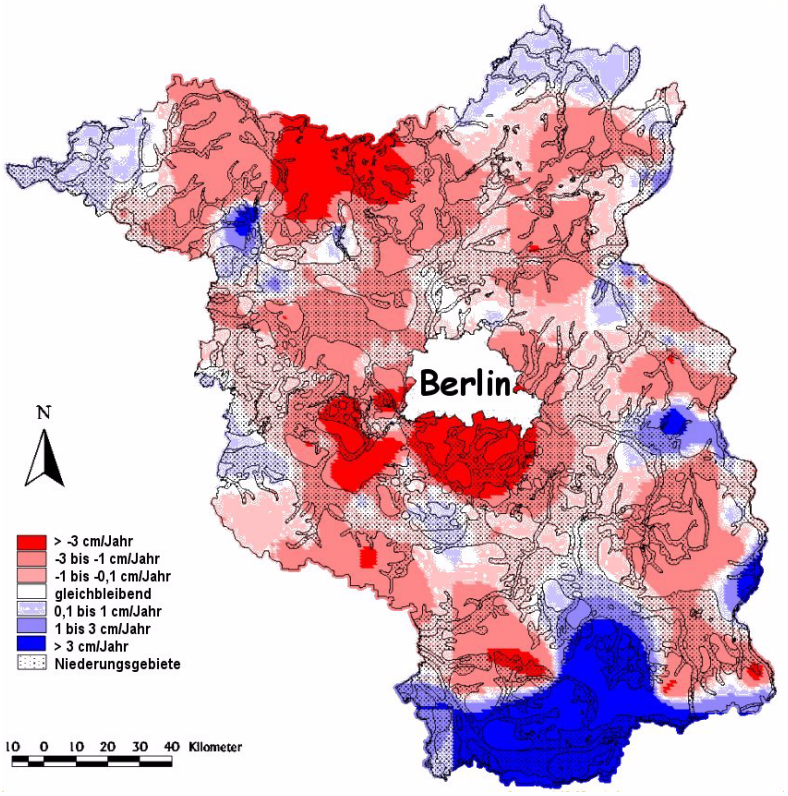


Abb. 19: Mittlere jährliche Veränderungen der Grundwasserstände des 1. Grundwasserleiters in Brandenburg. Flächenhaft interpolierte Trendentwicklung an 350 Messstellen im Zeitraum 1970-1999 (Quelle: Landesumweltamt Brandenburg).

Ohne eine Klärung der kausalen Zusammenhänge gestaltet sich eine Prognose und Extrapolation der beobachteten Trends schwierig. Die natürliche Ursache einer Änderung des Grundwasserspiegels liegt in einer Variation der gebildeten Sickerwassermenge, die wiederum von zahlreichen Parametern wie dem Niederschlag, der Flächennutzung, dem Grundwasserflurabstand, dem Bodentyp und der Temperatur abhängt. Zur wissenschaftlichen Untersetzung der Grundwasserproblematik wurden am PIK in Ergänzung zur bereits erwähnten Studie *(Lahmer et al. 2001c)* räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Untersuchungen der Sickerwassermenge durchgeführt. Die in die laufenden Untersuchungen des LUA eingebundene Studie "Orts- und zeitdiskrete Ermitt-

lung der Sickerwassermenge im Land Brandenburg" *(Lahmer und Pfützner 2001)* liefert wichtige Hinweise darauf, ob, in welche Richtung und wie signifikant sich die im Land Brandenburg gebildete Sickerwassermenge im Zeitraum 1961-1998 verändert hat.

Mit Hilfe von ArcEGMO wurden für den Zeitbereich 1961-1998 Simulationsrechnungen für das Land Brandenburg durchgeführt, die flächen- und zeitdiskrete Werte der Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung, Sickerwasserbildung, Oberflächenabflussbildung und Gebietsabfluss lieferten. Als meteorologische Triebkräfte wurden die Informationen von an 23 Klima- und 54 Niederschlagsstationen gemessenen meteorologischen Zeitreihen des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Die Trendanalysen der Sickerwassermenge erfolgten vor dem Hintergrund der zeitlichen Entwicklung aller anderen berechneten Größen, um auf diese Weise die Dynamik der Sickerwassermenge in Abhängigkeit von den meteorologischen Eingangsgrößen und den übrigen Wasserhaushaltsgrößen transparent zu machen.

Die in Abbildung 20 für die vier Teilperioden 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 und 1991-1998 dargestellten Mittelwerte der Sickerwasserbildung zeigen, dass für die mittleren Jahreswerte ein deutlicher Abfall von den 60er hin zu den 70er Jahren zu beobachten ist und diese anschließend auf niedrigem Niveau stagnieren. Dem gegenüber "erholen" sich die Mittelwerte für die Wintermonate (November bis April) nach einem vergleichbaren Abfall von der ersten zur zweiten Dekade in den 80er Jahren wieder, um in den 90er Jahren erneut leicht abzufallen. Die mittleren Sommerwerte sind für alle Dekaden durchweg negativ, doch erfolgt in den 90er Jahren verglichen mit den 80er Jahren ein leichter Anstieg zu geringfügig weniger negativen Werten.

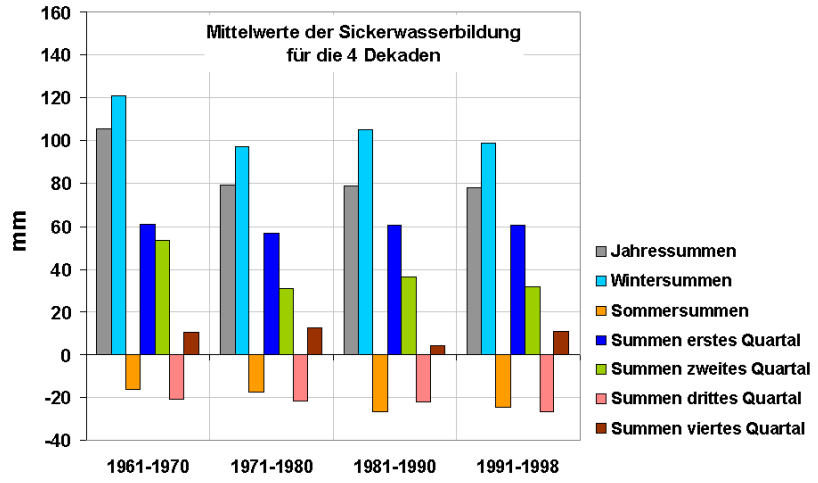


Abb. 20: Mittelwerte der für das Land Brandenburg berechneten Sickerwasserbildung (mittlere Jahres-, Halbjahres- und Quartalswerte) für die vier Teilperioden ("Dekaden") 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 und 1991-1998.

Auf der Basis von Jahressummen durchgeführte statistische Analysen zur zeitlichen Entwicklung der meteorologischen Eingangsgrößen sowie der daraus berechneten Wasserhaushaltsgrößen zeigen, dass im Zeitraum 1961 bis 1998 lediglich der Anstieg der mittleren Tagestemperatur um knapp 1 °C statistisch signifikant ist (siehe Abbildung 21). Für alle anderen Größen ergeben sich auf der Basis linearer Regressionsanalysen zwar mehr oder weniger große Änderungen, doch sind diese allesamt statistisch nicht signifikant (d. h. es handelt sich bei diesen Änderungen um keine Trends). Dies gilt insbesondere auch für die ebenfalls in Abbildung 21 dargestellten mittleren Jahresniederschläge

sowie die Sickerwasserbildung. So liefert die Regressionsgerade zwar eine Abnahme der Sickerwassermenge von 95 mm im Jahre 1961 auf 76.6 mm im Jahre 1998, doch erweist sich diese Abnahme um immerhin 19.4% als statistisch nicht signifikant.

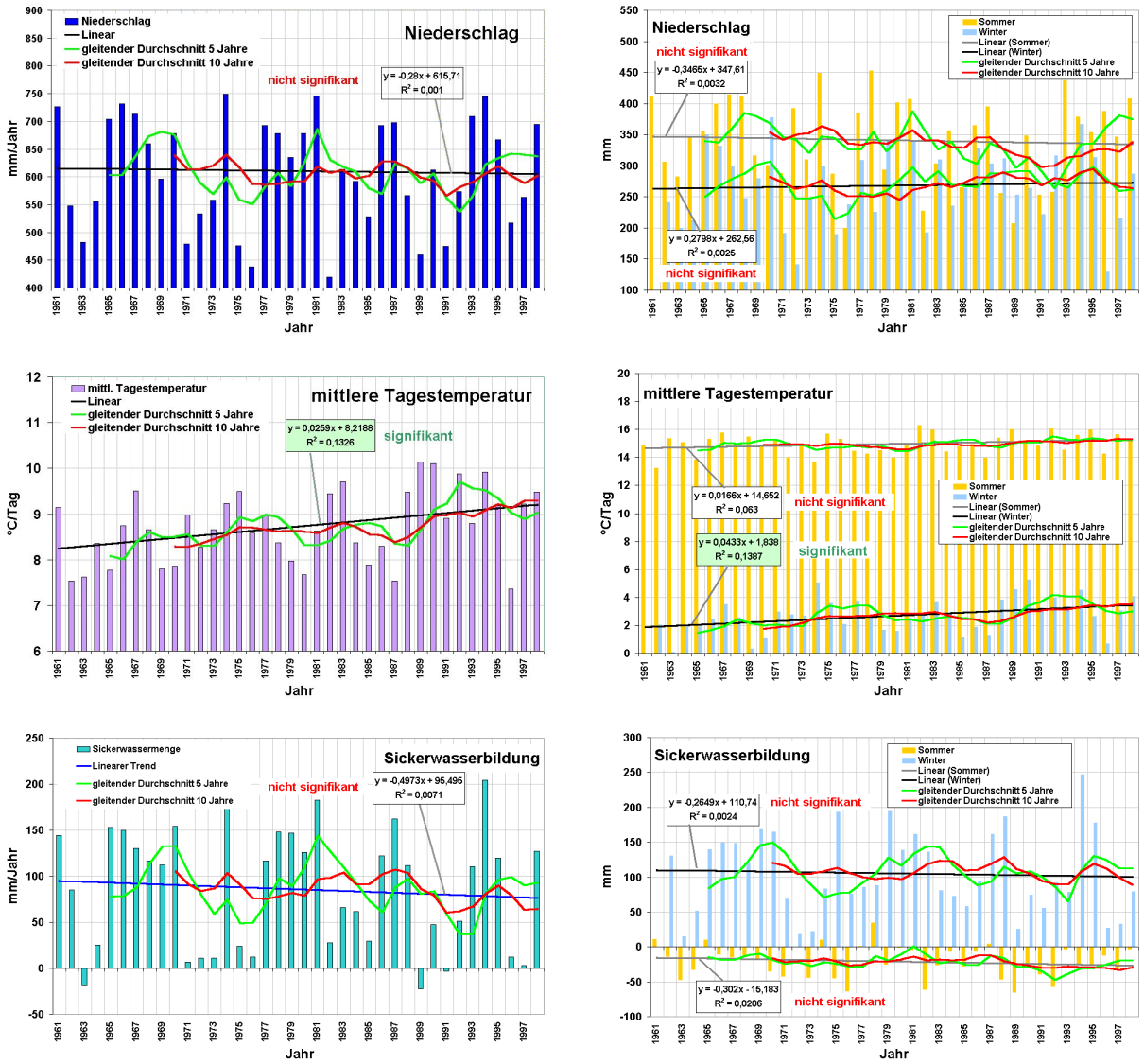


Abb. 21: Auf Basis von Jahressummen (links) sowie Halbjahressummen (Sommer/Winter, rechts) im Land Brandenburg für den Zeitraum 1961-1998 berechnete zeitliche Entwicklung der Größen Niederschlag, mittlere Tagestemperatur und Sickerwasserbildung. Neben Regressionsgeraden sind jeweils auch Gleitmittel über 5 bzw. 10 Jahre eingezeichnet. In beiden Fällen zeigt lediglich die mittlere Tagestemperatur eine statistisch signifikante zeitliche Veränderung (einen Trend).

Auf der Basis von Sommer- und Wintersummen für den gleichen Zeitraum durchgeführte statistische Analysen belegen, dass bis auf die für das Winterhalbjahr berechnete mittlere Tagestemperatur und die (in Abbildung 21 nicht dargestellte) reale Verdunstung ebenfalls keine der untersuchten Größen eine statistisch signifikante zeitliche Verände-

rung zeigt. Dennoch wird deutlich, dass die Temperaturen im Winterhalbjahr mit +1.6 °C deutlich stärker gestiegen sind als im Sommerhalbjahr (+0.6 °C). Für den Niederschlag ist eine Verschiebung vom Sommer (-12.8 mm) in den Winter (+10.4 mm) festzustellen. Diese Veränderungen sind aber genauso wenig statistisch signifikant wie die Abnahmen der Sickerwasserbildung von 110.5 mm auf 100.7 mm im Winter und von -15.5 mm auf -26.7 mm im Sommer.

Erweitert man die Analysen für die primär interessierende Sickerwasserbildung auf Quartale, so zeigt sich, dass im Zeitraum 1961-1998 auch keine der Quartalssummen einen Trend aufweist. Dies gilt selbst für die im zweiten Quartal (Monate März bis Mai, "Frühling") berechnete Abnahme um immerhin 32%. Erst auf Monatsbasis durchgeführte Trendanalysen zeigen, dass der Monat Mai eine statistisch signifikante Abnahme der Sickerwassermenge aufweist. Die Änderungen der Sickerwassermenge für alle anderen Monate fallen dagegen z.T. deutlich unter die Signifikanzschwelle.

Um die Teilflächen im Land Brandenburg zu lokalisieren, die eine statistisch signifikante Änderung der Sickerwassermenge aufweisen, wurden zusätzlich Trendanalysen für alle 1.600 modellierten Einzelflächen durchgeführt.

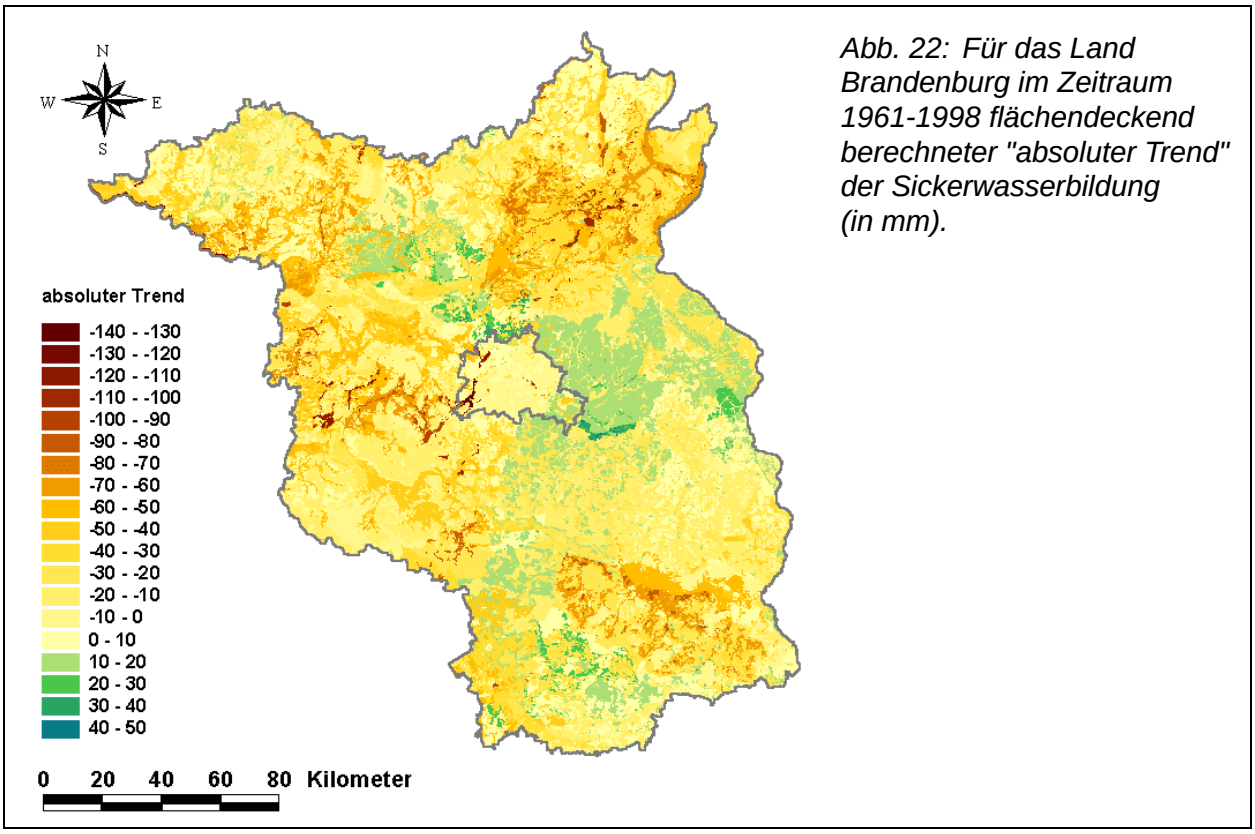


Abb. 22: Für das Land Brandenburg im Zeitraum 1961-1998 flächendeckend berechneter "absoluter Trend" der Sickerwasserbildung (in mm).

Die zwischen 1961 (Anfangszustand) und 1998 (Endzustand) auf der Basis einer linearen Regression flächendifferenziert berechneten und in Abbildung 22 dargestellten Änderungen der Sickerwassermenge ("absoluter Trend") reichen von -140 mm bis +50 mm. Knapp 75% der Gesamtfläche Brandenburgs sind danach durch eine Abnahme der Sickerwassermenge charakterisiert.

Allerdings zeigt sich, dass lediglich knapp 5% der Fläche Brandenburgs eine statistisch signifikante Änderung der Sickerwassermenge aufweisen. Bei diesen Flächen handelt es sich ohne Ausnahme um grundwassernahe Flächen (im Wesentlichen Niederungsgebiete, darunter mit etwa 31% bzw. 23% ihrer Gesamtfläche besonders die Typen "grundwassernaher Hochwald" und "grundwassernahe Wiesen"), deren ohnehin geringe Sickerwasserbildung um bis zu etwa 100 mm/Jahr weiter absinkt. Dies wird deutlich anhand der in Abbildung 23 dargestellten Lage dieser Flächen im Höhenmodell. Wesentliche Ursachen für die Abnahme der Sickerwassermenge sind die Abnahme des Niederschlags und die Zunahme der mittleren Tagestemperatur, insbesondere in den 90er Jahren mit ihren dicht aufeinander folgenden "Jahrhundertsommern".

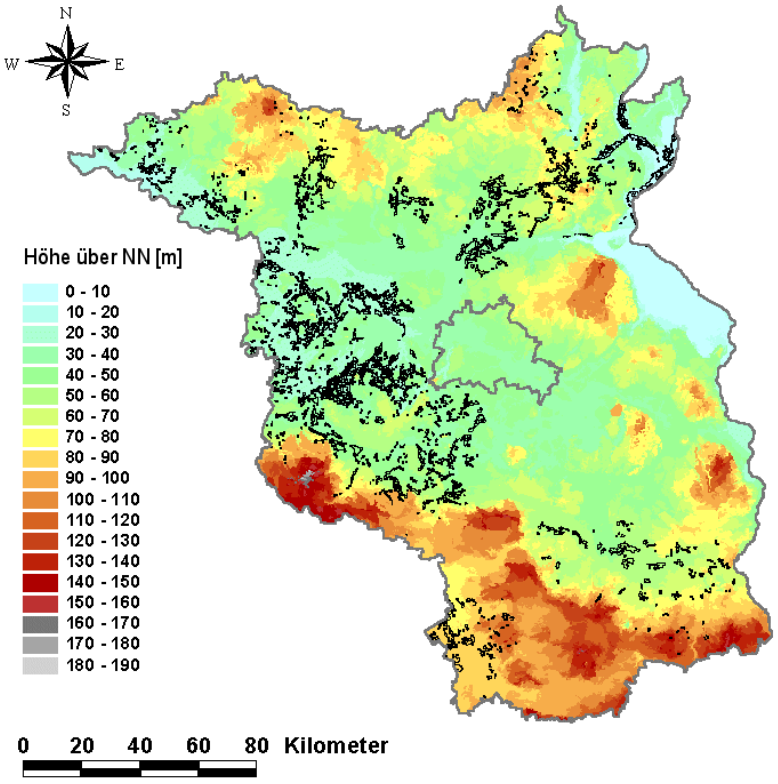


Abb. 23: Lage der Teilflächen im Land Brandenburg, für die eine signifikante Änderung der Sickerwassermenge zwischen 1961 und 1998 nachgewiesen wurde (schwarz umrandet).

2.5 Auswirkungen des Klimaszenariums auf den Wasserhaushalt

Angesichts der bereits existierenden und im vorangehenden Kapitel beschriebenen hydrologischen Probleme im Land Brandenburg erscheint es naheliegend, die Klimaverhältnisse in Untersuchungen zum regionalen Wasserhaushalt nicht länger als unveränderlich anzusehen. Die Frage, welchen Einfluss klimabedingte "Störungen" auf den regionalen Wasserhaushalt haben können, soll anhand ausgewählter Ergebnisse von Szenarioanalysen beleuchtet werden, die unter Verwendung des in Kapitel 1.4 beschriebenen Klimaszenariums (Zeitraum 2001-2055; Temperaturerhöhung um 1.4 °C sowie maximal möglicher Niederschlagsrückgang an den insgesamt 85 Klimastationen) für das Land Brandenburg durchgeführt wurden. Einige wichtige Ergebnisse der durchgeführten Wasserhaushaltsberechnungen sollen im Folgenden kurz dargestellt und diskutiert werden.

Die Ergebnisse der für das 1.4 K-Klimaänderungsszenarium auf Jahres- und Halbjahresbasis für das Gesamtgebiet berechneten meteorologischen Eingangs- sowie Wasserhaushaltsgrößen waren bereits in Zusammenhang mit der Beschreibung der mittleren hydrologischen Verhältnisse des derzeitigen Klimazustandes in Kapitel 2.3 angegeben worden (siehe Tabelle 10). Der untere Teil dieser Tabelle enthält die zwischen dem 1.4 K-Klimaänderungsszenarium und dem Referenzzustand berechneten Differenzen.

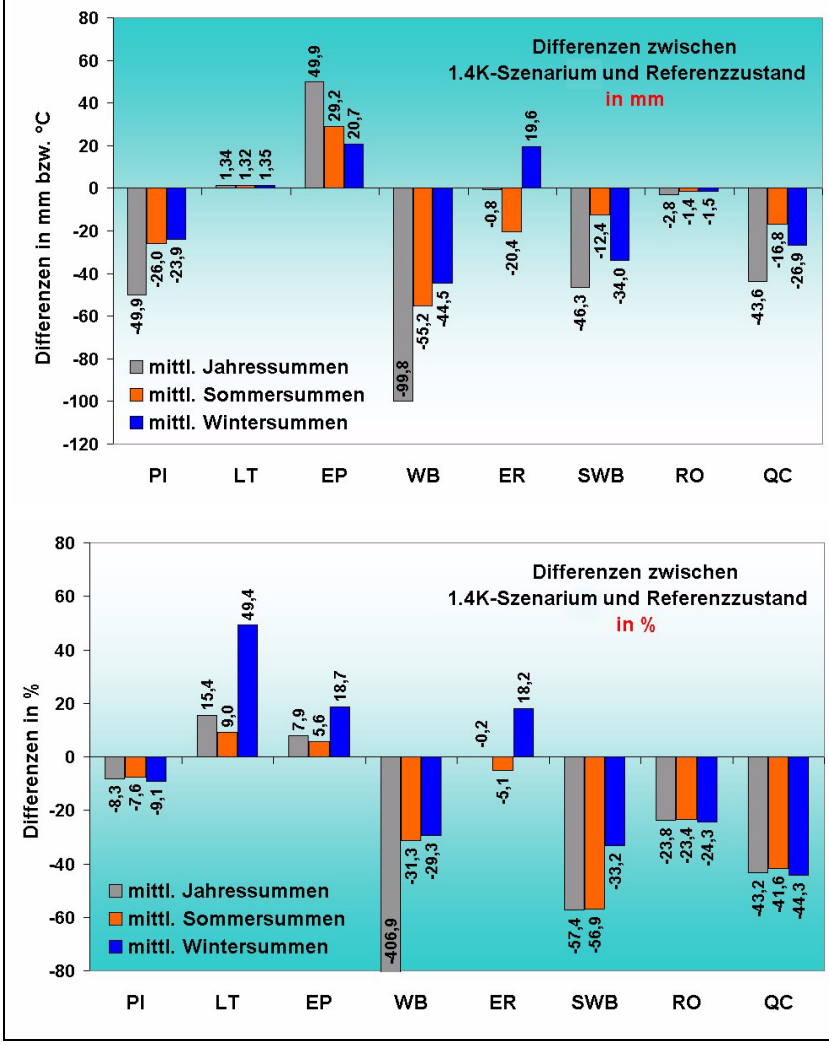


Abb. 24: Differenzen (oben: absolute Werte, unten: prozentual) der für den Referenzzustand (Periode 1951-2000) und das 1.4 K-Klimaänderungsszenarium (Periode 2001-2055) berechneten mittleren Jahres-, Sommer- und Wintersummen der Größen Niederschlag (PI), mittl. Tagestemperatur (LT), pot. Verdunstung (EP), klimatische Wasserbilanz (WB), reale Verdunstung (ER), Sickerwasserbildung (SWB), Oberflächenabflussbildung (RO) und Gesamtabflusshöhe (QC) im Land Brandenburg. Für LT sind die Differenzen der mittleren Tageswerte angegeben.

Die Darstellung dieser Differenzen in Abbildung 24 erlaubt einen direkten Vergleich beider meteorologischer Zustände. So verringert sich der mittlere Jahresniederschlag PI für das Klimaänderungsszenarium gegenüber dem Referenzzustand um etwa 50 mm/Jahr oder 8.3%. Dabei fällt der Rückgang im Winter mit 9.1% etwas stärker aus als im Sommer (7.6%). Deutlich werden auch die starken Änderungen der mittleren Tagestemperatur LT, die sich im Sommerhalbjahr um 9%, im Winterhalbjahr dagegen um 49% erhöht. Dies bedeutet, dass das Klimaänderungsszenarium insbesondere zu einer relativen Erhöhung der Wintertemperaturen führt – mit den entsprechenden Auswirkungen auf die ablaufenden hydrologischen Prozesse.

Die klimatische Wasserbilanz WB (Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung) sinkt im langjährigen Mittel von einem bereits negativen Wert von etwa -25 mm/Jahr für das Referenzszenarium auf nur noch -124 mm/Jahr für das Klimaänderungsszenarium und zeigt damit ausgeprägte Änderungen unter dem angenommenen geänderten Klima. Die Abnahmen im Sommer und im Winter sind dabei mit 55.2 mm (31.3%) bzw. 44.5 mm (29.3%) vergleichbar. Während sich im Fall der Verdunstung ER bei Betrachtung der mittleren Jahreswerte keine nennenswerte Änderung gegenüber dem Referenzzustand zeigt, liefert die zeitliche Aggregation zu Sommer- und Winterwerten einen deutlichen Informationsgewinn. So sinkt die Verdunstung im Sommer deutlich um etwa 20 mm, während sie im Winter um etwa den gleichen Betrag ansteigt. Die relativen Änderungen von -5.1% (Sommer) bzw. +18.2% (Winter) zeigen aber, dass sich wegen der höheren Temperaturen insbesondere die winterliche Verdunstung erhöht.

Die Sickerwasserbildung SWB sinkt für das angenommene Klimaänderungsszenarium im langjährigen Mittel beträchtlich, und zwar um etwa 46 mm/Jahr oder 57%. Für die letzten 15 Jahren ergibt sich im Vergleich zum Referenzzustand sogar ein Rückgang um 75%. Die Abnahme von im Jahresmittel 81 mm für den Referenzzustand auf nur noch 34 mm für das 1.4 K-Szenarium bedeutet eine erhebliche Änderung der regionalen Wasserbilanz mit den entsprechenden Auswirkungen auf Oberflächengewässer und Grundwasserstände. Die Abnahmen betreffen insbesondere das Winterhalbjahr, wo SWB gegenüber dem Referenzzustand um 34 mm zurückgeht, während der Rückgang im Sommerhalbjahr mit 12 mm (insbesondere wegen des verringerten Niederschlagsdargebotes) geringer ausfällt. Die für das 1.4 K-Szenarium berechnete Gesamtabflusshöhe (Gebietsabfluss) QC sinkt im langjährigen Mittel von 101 mm für den Ist-Zustand auf 57.4 mm für den Klimaänderungszustand, d. h. um etwa 44 mm/Jahr oder 43%. Wie im Fall der Sickerwasserbildung sind die Rückgänge für die letzten 15 Jahre mit 57 mm oder 60% besonders ausgeprägt. Insbesondere die abnehmenden Niederschläge und die zunehmende Verdunstung tragen zu dieser Abnahme bei. Dabei sind die Rückgänge im Sommerhalbjahr mit knapp 17 mm geringer als jene im Winterhalbjahr (etwa 27 mm).

Auch für das 1.4 K-Klimaszenarium wurden räumliche Verteilungen der meteorologischen Eingangs- und berechneten Wasserhaushaltsgrößen berechnet. Diese erlauben über den Vergleich mit den entsprechenden Karten des Referenzzustandes ortsdiskrete Aussagen zu den zu erwartenden Veränderungen. Beispielhaft für die erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 25 die räumlichen Verteilungen der mittleren Jahressummen der Verdunstung, der Sickerwasserbildung und der Gesamtabflusshöhe dargestellt, und zwar jeweils in absoluten Werten (links) und in Form der Differenzen gegenüber dem (in Abbildung 18 dargestellten) Referenzzustand (rechts).

Im Fall der Verdunstung ER zeigt der Vergleich zwischen den in Abbildung 18 und Abbildung 25 dargestellten Karten sowie die daraus resultierende Differenzkarte besonders deutlich, dass räumlich differenzierte Ergebnisse einen Informationsgewinn gegenüber einfachen Gebietsmittelwerten darstellen können. So ergibt sich unter der angenommenen Klimaänderung für das Gesamtgebiet nach Tabelle 10 praktisch keine Veränderung von ER, regional treten aber sehr wohl Differenzen auf, die von lokalen Erhöhungen von 60 mm oder mehr (für offene Wasserflächen und grundwassernahe Flächen) bis zu Rückgängen in der gleichen Größenordnung reichen. Grund für die trotz höherer Tempe-

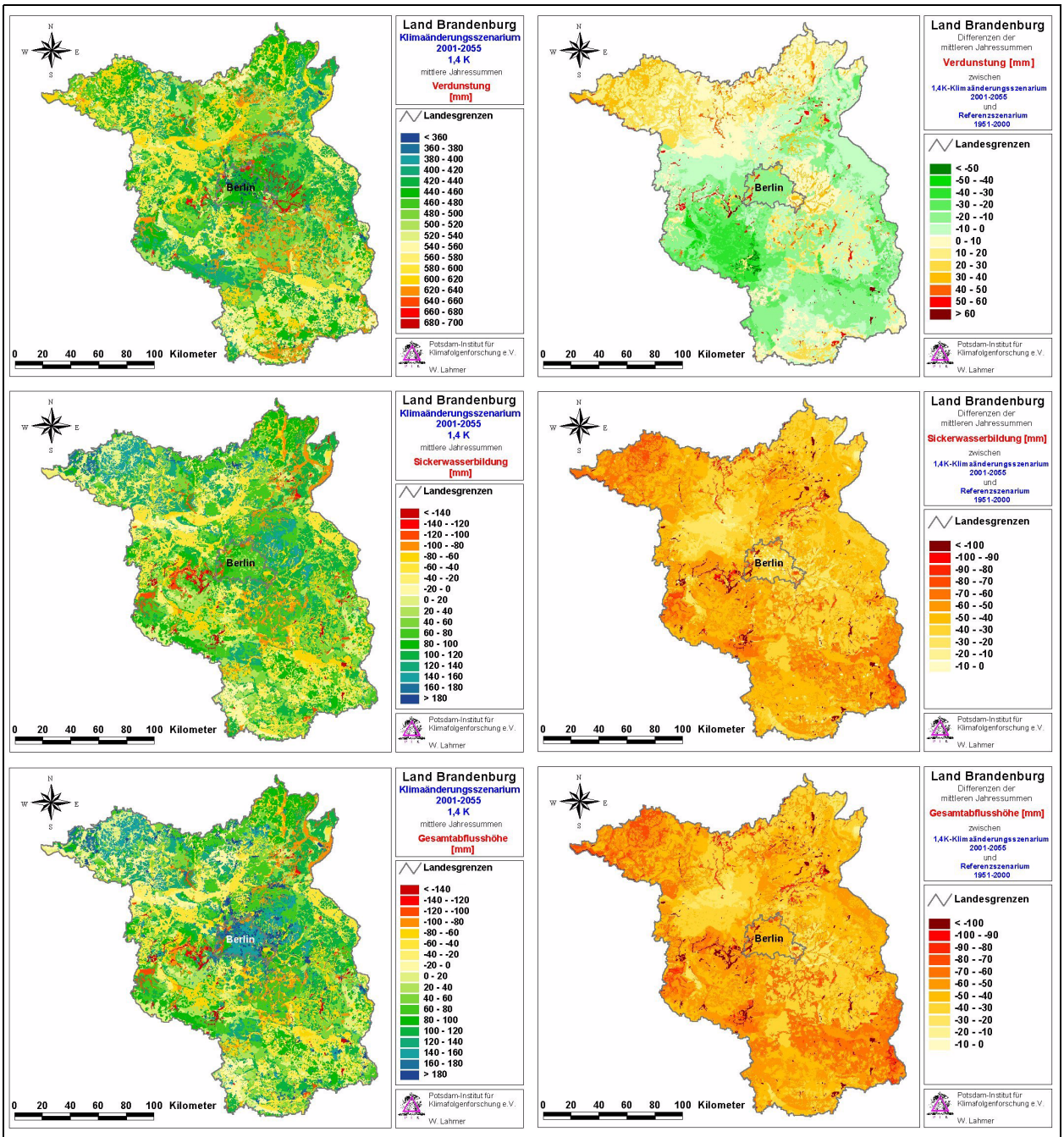


Abb. 25: Mittlere Jahressummen der Verdunstung, Sickerwasserbildung und Gesamtabflusshöhe für das 1.4 K-Klimaänderungsszenarium (2001-2055, links) im Land Brandenburg. Rechts sind die zwischen dem Klimaszenarium und dem "Ist-Zustand" (vgl. Abbildung 18*) berechneten Differenzen angegeben.*

raturen auftretenden Rückgänge sind die für den Zeitraum 2001-2055 angenommenen geringeren Niederschlagsmengen.

Während sich die Veränderungen zwischen dem Referenz- und dem Klimaänderungsszenarium im Fall der Verdunstung also sowohl in Zunahmen als auch in Abnahmen ausdrücken, zeigt die Sickerwasserbildung SWB unter dem geänderten Klima flächen-

deckende und z.T. dramatische Abnahmen. Dies wird insbesondere anhand der in Abbildung 25 dargestellten Differenzkarte deutlich. Im langjährigen Mittel sinkt SWB in Brandenburg gegenüber dem Ist-Zustand um etwa 57% (vgl. Tabelle 10), und zwar insbesondere auf den Flächen, für die die Verdunstung erheblich ansteigt (Niederungsgebiete, Seen etc.). Dieser drastische Rückgang beruht im Wesentlichen auf den abnehmenden Niederschlägen bei gleichzeitig zunehmenden Temperaturen. Neben dem Gesamtabfluss stellt die Grundwasserneubildung deshalb die gegenüber Klimaänderungen empfindlichste Wasserhaushaltskomponente dar.

Die für beide Klimazustände berechneten Karten der Gesamtabflusshöhe QC zeigen starke Korrelationen zu den entsprechenden Karten der Sickerwasserbildung. Während QC nach Abbildung 18 für den Referenzzustand fast flächendeckend positive Werte aufweist (nach Tabelle 10 beträgt der langjährige Mittelwert 101 mm/Jahr), beobachtet man für das 1.4 K-Klimaänderungsszenarium erhebliche Flächenanteile mit negativen Werten. Dies führt zu einer Differenzkarte, die unter der angenommenen Klimaänderung für das gesamte Land Brandenburg Abnahmen von QC ausweist. Für einzelne Teilflächen betragen diese mehr als 100 mm/Jahr.

Um zu untersuchen, in welchem Maße unterschiedliche Landschaftseinheiten in Brandenburg auf die angenommenen geänderten Klimabedingungen reagieren, wurden die zuvor diskutierten räumlichen Verteilungen aller Wasserhaushaltsgrößen eingehender analysiert. Diese Differenzierung nach verschiedenen Flächentypen ist besonders zur Ausweisung sensibler Teilregionen geeignet. Die Ergebnisse sollen am Beispiel der in Abbildung 26 dargestellten Verdunstung für insgesamt 15 verschiedene Flächentypen verdeutlicht werden.

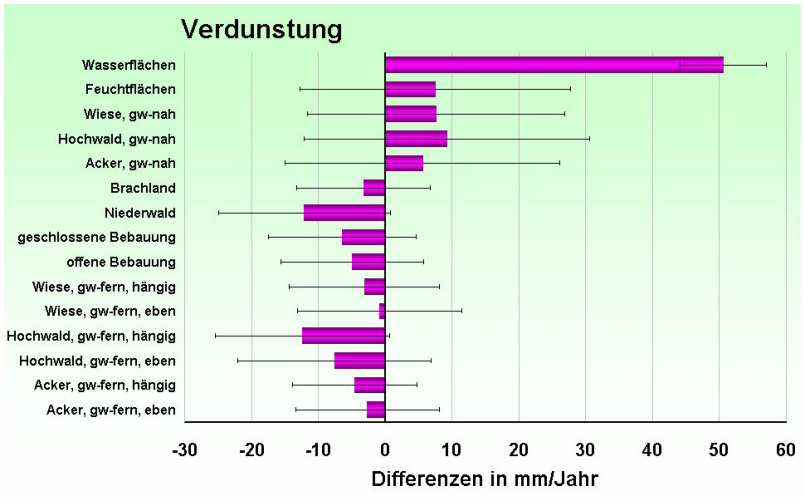


Abb. 26: Sensitivität verschiedener Flächentypen im Land Brandenburg gegenüber Klimaänderungen. Dargestellt sind die Differenzen der Verdunstung zwischen dem 1.4 K-Klimaänderungsszenarium (2001-2055) und dem Referenzzustand (1951-2000) für insgesamt 15 verschiedene Flächentypen. Die eingezeichneten Fehlerbalken resultieren im Wesentlichen aus der Verteilung des jeweiligen Flächentyps im Gesamtgebiet.

Die dort angegebenen Differenzen zwischen dem 1.4 K-Klimaänderungsszenarium und dem Referenzzustand weisen Werte zwischen etwa +50 mm/Jahr und -12 mm/Jahr auf, während die für das Gesamtgebiet ermittelte Differenz fast Null beträgt (siehe Abbildung 24). Unter der angenommenen Klimaveränderung ist die Verdunstung lediglich für offene

Wasserflächen und grundwassernahe Flächen höher als für den Referenzzustand, da hier immer noch ausreichend Wasser zur Befriedigung des erhöhten Verdunstungsanspruchs zur Verfügung steht. Alle übrigen Flächen zeigen eine gegenüber dem Referenzzustand verringerte Verdunstung, da hier wegen der reduzierten Niederschläge weniger Wasser zur Verdunstung angeboten wird. Für die Sickerwasserbildung ergibt sich daraus ein Rückgang für alle Flächentypen, der sich in der Differenzkarte von Abbildung 25 und dem in Tabelle 10 angegebenen Wert von etwa 57% für das Gesamtgebiet ausdrückt.

2.6 Bewertung der zu erwartenden Änderungen

Die vor dem Hintergrund einer bereits angespannten hydrologischen Situation mit sinkenden Grundwasserständen für das Land Brandenburg durchgeführten Untersuchungen zu den Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt zeigen, dass sich bis zum Jahre 2055 einige der den Landschaftswasserhaushalt bestimmenden Wasserhaushaltsgrößen deutlich - und zum Negativen - verändern werden *(Lahmer 2001, Lahmer 2002b)*. Schon die im Klimaszenarium angenommenen, relativ geringen Änderungen von Temperatur und Niederschlag können dabei erheblichen Einfluß auf Verdunstung, Sickerwasserbildung und Gebietsabfluss haben.

Ein weiterer Rückgang der schon nicht üppigen jährlichen Niederschläge in Brandenburg würde - bei gleichzeitig zunehmender Verdunstung - insbesondere im Sommer zu drastischen Folgen führen. So wäre bei sich intensivierenden sommerlichen Verdunstungsverlusten über offenen Wasserflächen und in Feuchtgebieten bis zum Jahre 2055 mit einer Sickerwasserbildung zu rechnen, die für das Land Brandenburg um mehr als die Hälfte unter der heutigen läge. Wegen der insbesondere in den Wintermonaten ansteigenden Temperaturen würde die Sickerwasserbildung trotz der zeitlichen Verlagerung des Niederschlags vom Sommer- in das Winterhalbjahr zurückgehen und somit weniger Wasser zum Ausgleich des (ebenfalls gestiegenen) sommerlichen Defizits über den langsamen Grundwasserpfad zur Verfügung stehen. Die Problematik der zu erwartenden Entwicklung wird letztlich auch an dem starken Rückgang der klimatischen Wasserbilanz deutlich, die unter den Annahmen des 1.4 K-Klimaänderungsszenariums für das gesamte Land Brandenburg im Jahresmittel ein erhebliches Wasserdefizit ausweist. Dieses Defizit nimmt für die letzten 15 Jahre des Änderungsszenariums sogar einen extremen Wert von -189 mm/Jahr an, weshalb insbesondere gegen Ende der Periode 2001-2055 mit erheblichen Problemen bei der Wasserverfügbarkeit zu rechnen wäre.

Die flächendeckende Abnahme von Sickerwasserbildung und Gebietsabfluss würde insbesondere in den trockenen Sommermonaten dazu führen, dass sich die Grundwasserbestände ernsthaft verringern, die Wasserstände in den Oberflächengewässern (Seen und Flüsse) merklich sinken und die Wasserqualität erheblich leidet (Fischsterben). Wegen der zunehmenden Verdunstung würde die Bodenfeuchtigkeit generell abnehmen. Etliche Flüsse und Moore könnten im Sommer trocken fallen und die in Brandenburg noch häufig anzutreffenden ausgedehnten Niederungen und Luchgebiete in ihrer vielfältigen Funktion verloren gehen. Gerade diese Gebiete stellen wegen der hohen Verdunstungs- und geringen Grundwasserneubildungsraten die gegenüber potenziellen Klimaänderungen besonders empfindlichen Naturräume dar. Insgesamt wären die Fol-

gen der angenommenen Klimaänderung damit nicht nur für den regionalen Wasserhaushalt sondern auch für alle besonders empfindlichen Naturräume und aquatischen Ökosysteme fatal. Da das den vorliegenden Untersuchungen zu Grunde gelegte 1.4 K-Klimaänderungsszenarium als relativ "konservativ" einzustufen ist, könnten die zu erwartenden Veränderungen im hydrologischen Regime durchaus noch ungünstiger ausfallen.

2.7 Berücksichtigung von Klimaänderungen in aktuellen Forschungsprojekten

Angesichts der hier dargestellten, unter einem geänderten Klima im Land Brandenburg zu erwartenden hydrologischen Probleme stellt sich die Frage, ob und inwieweit der langfristige Aspekt "Klimaänderung" in laufenden oder geplanten Forschungsprojekten berücksichtigt werden sollte. Zwar gibt es z.Z. einige Forschungsvorhaben, bei denen dieser Aspekt eine Rolle spielt (z.B. GLOWA-Elbe, www.glowa-elbe.de), auf der anderen Seite gehen vergleichbar wichtige Vorhaben von einem weiterhin unveränderlichen Klima aus.

Zu diesen Projekten gehören auch jene, die im Rahmen der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) bereits etabliert wurden oder in naher Zukunft begonnen werden. Zu den in der Region angelaufenen Forschungsvorhaben, die sich der Thematik des Flusseinzugsgebietsmanagements im Rahmen der WRRL widmen, gehört das vom BMBF geförderte Forschungsvorhaben "Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel" (*Bronstert und Lahmer 2001, Lahmer und Bronstert 2002, Lahmer 2002d/e,* www.havelmanagement.de). Das Projekt ist ausgerichtet auf eine praxisnahe Umsetzung der WRRL in einem wichtigen Teileinzugsgebiet der Elbe und auf die Lösung der dort anstehenden wasserwirtschaftlichen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Wesentliche Zielstellungen des Projektes sind die Entwicklung praxisorientierter Methoden für ein ganzheitliches Flusseinzugsgebietsmanagement, die Bereitstellung leistungsfähiger Instrumentarien zur nachhaltigen Verbesserung der Gewässergüte, die Ableitung verallgemeinerbarer Ergebnisse für die Umsetzung der WRRL, die Erarbeitung konkreter, exemplarischer Beiträge zur Lösung aktueller Probleme im Untersuchungsgebiet sowie die Ableitung eines Maßnahmenprogramms als Entscheidungshilfe für wasserwirtschaftliche Planungen.

Das Ziel des Forschungsprojektes ist also insbesondere darauf ausgerichtet, auf der Basis wissenschaftlich untersetzter Handlungsempfehlungen Wege aus der regionalen Wasserproblematik aufzuzeigen. Bei der Bearbeitung der Frage, wie die Wasserqualität verbessert und die Wasserversorgung langfristig gesichert werden kann, wird zwar der Anwendungsorientierung über eine enge Verbindung mit der wasserwirtschaftlichen Praxis, die Einbeziehung betroffener Gewässerbenutzer und Entscheidungsträger in die Ableitung von Leitbildern und Zielvorgaben sowie die Information und Einbeziehung der Öffentlichkeit ein hoher Stellenwert eingeräumt, doch stellt sich die grundlegende Frage nach den prinzipiellen Steuerungsmöglichkeiten und der Effektivität möglicher und als realistisch eingeschätzter Managementmaßnahmen, wenn diese ohne Berücksichtigung möglicher Klimaänderungen abgeleitet werden. Angesichts der im August 2002 aufgetretenen und zu Anfang erwähnten "Jahrhundertflut" in der Elbe erfolgte für die zweite Phase des bereits genannten Projektes GLOWA-Elbe zwar eine zusätzliche Orientie-

rung auf Fragen, die sich mit Klimaeinflüssen sowie anderen anthropogenen Einflussnahmen auf das Hochwassergeschehen beschäftigen, doch erscheint es angebracht, diesem Themenkomplex auch in Zusammenhang mit anderen wissenschaftlichen Themenstellungen zukünftig einen höheren Stellenwert einzuräumen.

2.8 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die weltweit zu beobachtende Zunahme von Extremereignissen und nicht zuletzt die in dieses Bild passende Hochwasserkatastrophe in der Elbe im August 2002 zeigen deutlich, dass die Bemühungen des Menschen, die Natur nach seinen Wünschen zu formen, zu Gegenreaktionen der Natur führen können, die mit hohen volkswirtschaftlichen Schäden und im schlimmsten Fall mit dem Verlust an Menschenleben einhergehen. Die durchgeführten Analysen zeigen, welchen Einfluss die in den 90er Jahren dicht aufeinander folgenden "Jahrhundertsommer" auf die hydrologische Situation des Landes Brandenburg gehabt haben und wie das hydrologische Regime auf zusätzliche, aus dem Globalen Wandel resultierende Störungen reagieren würde. Die Ergebnisse der durchgeführten Trendanalysen deuten darauf hin, dass die Auswirkungen der globalen Erwärmung auch in unserem Raum offensichtlich bereits eingesetzt haben und dass die Sorge um die Ressource Wasser unter dem Aspekt möglicher Klimaänderungen eine Schlüsselfunktion spielt.

Die vorgestellten Studien liefern zum Teil besorgniserregende Resultate. Bei den unter der angenommenen Klimaänderung in Brandenburg flächendeckend zu beobachtenden Abnahme von Sickerwasserbildung und Gesamtabflusshöhe dürften die prognostizierten Veränderungen des Grundwassers die größte Gefahr darstellen (siehe z. B. *Bild der Wissenschaft 2001*). Ein durch abnehmende Niederschläge und zunehmende Verdunstungsverluste hervorgerufenes Absinken des Grundwasserspiegels wäre für den Grundwasserhaushalt und die Trinkwasserversorgung äußerst negativ, da es neben einer Reduzierung des nutzbaren Wasserdargebotes zu weiteren unerwünschten Nebenwirkungen wie einem Aufstieg von Salzwasser aus dem Liegenden oder einem verstärkten Einfluss anthropogener Kontaminationen kommen könnte. Dennoch sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass all diese Folgen nicht eintreten *müssen*, da die Ergebnisse auf einem Szenarium beruhen, das *eine* Realisierung im Raum der möglichen Klimaentwicklungen darstellt - allerdings eine mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit.

Müssen wir also handeln? Nach Meinung der meisten Wissenschaftler ja. Zwar besteht im Hinblick auf mögliche Auswirkungen globaler Klimaänderungen noch kein Anlass zur Panik, durchaus aber zur Sorge, da die ansatzweise bereits sichtbar werdenden Veränderungen des globalen Klimas zu einer weiteren Verstärkung des Kreislaufes von Verdunstung und Niederschlag führen werden. Auch Brandenburg wird sich auf extreme Niederschlagsereignisse im Sommer sowie zunehmende Stürme im Winter einstellen müssen, eine Entwicklung, die wegen der prognostizierten Zunahme von Extremereignissen nur oberflächlich im Gegensatz zu der für die Region angenommenen generellen Erwärmung und Abnahme der jährlichen Niederschläge steht. Auf der einen Seite wird deshalb auch in der Zukunft in einzelnen Jahren mit dramatischen Störungen des hydrologischen Kreislaufes zu rechnen sein (z. B. auch in Folge extremer, zu Flutkatastrophen führender Niederschläge außerhalb Brandenburgs), auf der anderen Seite dürfte das

Klima in der Region Brandenburg aber langfristig deutlich trockener werden. Was die im 4. IPCC-Bericht behandelten Auswirkungen von Extremereignissen auf Regionen betrifft, so stehen detaillierte Untersuchungen zur hydrologischen Sensitivität gegenüber solchen Ereignissen in Brandenburgs allerdings noch aus.

Eine wesentliche Botschaft der hier vorgestellten Untersuchungen besteht deshalb darin, die Auswirkungen klimatischer Änderungen bei hydrologisch relevanten, mittel- bis langfristigen politischen Entscheidungsfindungen nicht mehr außer Acht zu lassen. Um irreversiblen Entwicklungen entgegenzusteuern, sind frühzeitig Maßnahmen zum Schutz der Ressource Wasser zu treffen. Dies schließt auch vermehrte Anstrengungen in Richtung auf einen "integrierten Klimaschutz" mit ein, um Ursachen (sofern noch möglich) zu vermeiden, bereits eingetretene Wirkungen zu vermindern und Anpassungen an unvermeidbare Folgen vorzunehmen. Insbesondere auf regionaler Ebene lassen sich mittelfristige Vorsorgestrategien entwickeln und umsetzen, weshalb Untersuchungen zu den hydrologischen Auswirkungen des Klimawandels hier von besonderem Interesse sind. Sensitivitäts- und Risikoanalysen dienen dabei zum einen dem Informationsgewinn hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen, zum anderen der Ableitung geeigneter Adaptions- und Managementstrategien. Auf diese Weise lassen sich dann möglicherweise auch in Zukunft unter veränderten klimatischen und wasserhaushaltlichen Bedingungen ökologisch notwendige Mindestgrundwasserstände und eine nachhaltige Trinkwasserbereitstellung gewährleisten.

Zu den wesentlichen Elementen einer zukunftsorientierten Vorsorgestrategie gehören neben einer rationellen Wassernutzung die Erhöhung des Gebietswasserrückhaltes (z. B. durch die Rückführung unangepasster Landnutzungen oder die Beendigung der Trockenlegung von Feuchtgebieten über Drainagen u.ä.) und ein disziplinübergreifendes Flussgebietsmanagement, aber auch Aspekte des Hochwasserschutzes (wie die Renaturierung von Flussläufen oder die Beseitigung der weiteren Zweckentfremdung von Retentionsräumen), um unerwünschte, auch sozioökonomische Folgen zunehmender Extremereignisse zu mindern. In diesem Zusammenhang wird aber auch die Frage zu stellen sein, ob im Lichte einer im laufenden Jahrhundert drohenden Wasserknappheit wasserwirtschaftliche Projekte, die in der Vergangenheit unter anderen klimatischen und volkswirtschaftlichen Bedingungen geplant wurden (wie z. B. das Brandenburg betreffende Projekt 17), heute noch umsetzungsrelevant sind, oder ob man die dafür eingeplanten finanziellen Mittel nicht besser für Maßnahmen des Klimaschutzes verwendet, die langfristig auch ökonomisch sinnvoller sein dürften.

2.9 Literatur

Becker, A., Lahmer, W., (1996): "Klimawandel und seine Auswirkungen auf den Wasserhaushalt", gwf-Wasser Special 14/96.

Becker, A., Klöcking, B., Lahmer, W., Pfützner, B., (2002): "The Hydrological Modelling System ARC/EGMO", in: Mathematical Models of Large Watershed Hydrology (Eds.: Singh, V.P. and Frevert, D.K.). Water Resources Publications, Littleton/Colorado. 891pp. ISBN 1-887201-34-3, p. 321-384.

Bild der Wissenschaft, (2001): "Deutschland 2050 – Die Klimaprognosen", 10/2001, S. 44-49.

Bronstert, A., Lahmer, W., (2001): "Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel", Antrag an das BMBF zur Förderung eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens im Rahmen des BMBF-Förderprogramms "Forschung für die Umwelt" zum Thema "Flusseinzugsgebietsmanagement". Potsdam, Februar 2001.

Lahmer, W., Becker, A., Müller-Wohlfeil, D.-I., Pfützner, B., (1999a): "A GIS-based Approach for Regional Hydrological Modelling", in: B. Diekkrüger, M.J. Kirkby, U. Schröder (Eds.): Regionalization in Hydrology. IAHS publication no. 254, ISSN 0144-7815, 33-43.

Lahmer, W., Klöcking, B., Pfützner, B., (1999b): "Meteorological Input Variables in Meso and Macroscale Hydrological Modelling", in: Extended abstracts of the International Conference on Quality, Management and Availability of Data for Hydrology and Water Resources Management, Koblenz, 22-26 March, 1999, p. 165-168.

Lahmer, W., Becker, A., (2000): "Mögliche Auswirkungen von Klimaveränderungen am Beispiel einer Untersuchung für das Land Brandenburg", in: Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Wasserwirtschaft. KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 2000 (47), Nr. 2, 170-175.

Lahmer, W., Pfützner, B., Becker, A., (2000a): "Data-related Uncertainties in Meso- and Macroscale Hydrological Modelling", in: Heuvelink, G.B.M. and Lemmens, M.J.P.M (Eds.). Accuracy 2000. Proceedings of the 4th international symposium on spatial accuracy assessment in natural resources and environmental sciences. Amsterdam, July 2000, pp. 389-396.

Lahmer, W., Pfützner, B., Becker, A., (2000b): "Influences of Environmental Changes on Regional Flood Events", in: Bronstert, A., Bismuth, C. and Menzel, L. (Edts.). European Conference on Advances in Flood Research. PIK-Report No. 65, p. 238-254. Potsdam Institute for Climate Impact Research, November 2000.

Lahmer, W., (2001): "Klimaänderungen und Wasserhaushalt: Beispiel Brandenburg. Landschaftswasserhaushalt: Wo bleibt das Wasser?", Dokumentation einer Veranstaltung "Treffpunkt Landtag" der SPD-Landtagsfraktion Brandenburg (Hrsg.), Kai Weber Medienproduktionen, Oktober 2001, S. 27-37.

Lahmer, W., Pfützner, B., (2001): "Orts- und zeitdiskrete Ermittlung der Sickerwassermenge im Land Brandenburg", Studie im Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Juli 2001.

Lahmer, W., Pfützner, B., Becker, A., (2001a): "Assessment of Land Use and Climate Change Impacts on the Mesoscale", *Phys. Chem. Earth* (B). Vol. **26**, No. 7-8, pp. 565-575, 2001 Elsevier Science Ltd.

Lahmer, W., Pfützner, B., Ströbl, B., (2001b): "Possible Impacts of Climate and Land Use Changes on the Water Balance of Semi-arid German River Basins", 19th European Regional ICID Conference Sustainable Use of Land and Water, Brno and Prague, Czech Republic, 4-8 June 2001 (CD-ROM).

Lahmer, W., Steidl, J., Dannowski, R., Pfützner, B., Schenk, R., (2001c): "Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg", Landesumweltamt Brandenburg (Hrsg.). Studien und Tagungsberichte, Band 27, ISSN 0948-0838, Eigenverlag, Potsdam, Dezember 2000.

Lahmer, W., (2002a): "Überblick über den Stand der regionalen Klimafolgenforschung", Beitrag zum Forschungsvorhaben KLIMOSTAT - Programmsytem zum Erkennen von Inhomogenitäten und zur Generierung von stationären Zeitreihen wasserwirtschaftlich relevanter Klima- und Wasserhaushaltsgrößen. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Februar 2002.

Lahmer, W., (2002b): "Hydrologische Auswirkungen von Klimaänderungen", in: Klimaszenarien und Derivate - Vorsorge für Regionen und Unternehmen. Beitrag des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung zur Umweltwoche des Bundespräsidenten "Treffpunkt Zukunft - Innovation für den Umweltschutz" vom 3. - 7. Juni 2002.

Lahmer, W., (2002c): "Trend and Climate Change Impact Analyses on the Mesoscale", in: Holko, L., Miklanek, P. and Kostka, Z. (Eds.): Interdisciplinary Approaches in Small Catchment Hydrology - Monitoring and Research. International conference convened by the European Network of Experimental and Representative Basins (ERB) and UNESCO IHP Northern European FRIEND Project 5. Demanovska dolina, Slovakia, 25-28 September 2002. Bratislava, 2002, ISBN 80-968480-6-2, 127-131.

Lahmer, W., (2002d): "Flusseinzugsgebietsmanagement im Einzugsgebiet der Havel", in: Geller, W., Puncochar, P., Guhr, H., v. Tümpling, W., Medek, J., Smrtak, J., Feldmann, H., Uhlmann, O. (Hrsg.): "Die Elbe - neue Horizonte des Flussgebietsmanagements". 10. Magdeburger Gewässerschutzseminar, 21.-26. Oktober 2002, Spindleruv (Spindlermühle), Tschechische Republik. Teubner, ISBN 3-519-00420-8, 137-140.

Lahmer, W., (2002e): "GIS-basiertes Szenarienanalyse- und Bewertungstool für die Havel", 6. Workshop zur großskaligen Modellierung in der Hydrologie, Schwerpunkt "Flussgebietsmanagement". UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Magdeburg, 28.-29. November 2002.

Lahmer, W., Bronstert, A., (2002): Erster Zwischenbericht zum BMBF-Projekt "Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel", Förderkennzeichen: 0330012, Berichtszeitraum: 01.10.2001 bis 31.03.2002. Univ. Potsdam, März 2002, unveröffentlicht.

Müller-Wohlfeil, D.-I., Bürger, G., Lahmer, W., (2000): "Response of a River Catchment to Climatic Change in Northern Germany", *Climatic Change*, **47,** 61-89.

Pfützner, B., (2002): "ARC/EGMO", in: Barben, M., Hodel, H.-P., Kleeberg, H.-B., Spreafico, M. und Weingartner, R. (Hrsg.). Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen - Erfahrungen aus den Rheinanliegerstaaten. Bericht Nr. I-19 der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes-KHR, p. 151-154. ISBN 90-36954-11-8.

Die Sorge um die Überbeanspruchung der Wasserressourcen und deren Auswirkungen auf Natur und Gesellschaft hat vor dem Hintergrund eines sich abzeichnenden Klimawandels längst auch unsere Breiten erfasst. Die im vorliegenden Kapitel dargestellten Analysen verdeutlichen, wie angespannt die hydrologische Situation im Land Brandenburg bereits ist und wie der Wasserhaushalt auf zusätzliche, durch Klimaänderungen hervorgerufene "Störungen" reagieren könnte.

Untersuchungen für den Beobachtungszeitraum 1961 bis 1998 zeigen, dass

- *die mittlere Tagestemperatur statistisch signifikant um knapp 1 °C gestiegen ist, wobei der Anstieg im Winterhalbjahr mit +1.6 °C erheblich deutlicher ausfällt als im Sommerhalbjahr (+0.6 °C)*
- *für den Niederschlag eine Verschiebung vom Sommer (-12.8 mm) in den Winter (+10.4 mm) festzustellen ist*
- *die Sickerwassermenge auf etwa 75% der Gesamtfläche Brandenburgs insbesondere in Niederungsgebieten um bis zu 100 mm/Jahr abgenommen hat*
- *wesentliche Ursachen für diesen Trend abnehmende Niederschläge und zunehmende Temperaturen sind, insbesondere in den 90er Jahren mit ihren "Jahrhundertsommern".*

Legt man den Untersuchungen das eher als "konservativ" einzustufende Klimaszenarium mit einer Temperaturerhöhung von 1.4 K für den Zeitraum 2001-2055 zu Grunde, so zeigt sich, dass

- *bereits relativ geringe Änderungen von Temperatur und Niederschlag zu dramatischen Änderungen verschiedener Wasserhaushaltsgrößen führen können*
- *die Temperaturzunahme insbesondere die Verdunstung im Winter erhöht mit den entsprechenden Auswirkungen auf den innerjährlichen Wasserausgleich*
- *die Sickerwassermenge als gegenüber Klimaänderungen empfindlichste Wasserhaushaltskomponente flächendeckend und im langjährigen Mittel um mehr als die Hälfte gegenüber heute abnimmt*
- *ein weiterer Rückgang der Niederschläge bei gleichzeitig zunehmender Verdunstung insbesondere im Sommer zu drastischen Folgen wie einem weiteren Absinken des Grundwasserspiegels, sinkenden Wasserständen in den Flüssen und Problemen bei der Wasserverfügbarkeit und Wasserqualität führen würde*
- *in Folge einer solchen klimatischen Änderung die in Brandenburg noch häufig anzutreffenden ausgedehnten Niederungen, Moore und Luchgebiete in ihrer vielfältigen Funktion verloren gehen könnten.*

Um vor dem Hintergrund der bereits angespannten hydrologischen Situation im Land Brandenburg auch in Zukunft einen intakten Wasserhaushalt und eine nachhaltige Trinkwasserversorgung sicherzustellen, ergeben sich daraus folgende Schlussfolgerungen:

- *Die Klimaverhältnisse können in Untersuchungen zum regionalen Wasserhaushalt nicht länger als unveränderlich betrachtet werden.*
- *Die Auswirkungen klimatischer Änderungen sollten bei hydrologisch relevanten, mittel- bis langfristigen politischen Entscheidungsfindungen nicht länger außer Acht gelassen werden.*
- *Zur Ableitung geeigneter Vorsorge-, Anpassungs- und Managementstrategien sind insbesondere solche Projekte zu fördern, die auf disziplinübergreifenden, ganzheitlichen Ansätzen aufbauen.*
- *Die Umsetzungsrelevanz wasserwirtschaftlicher Projekte, die in der Vergangenheit unter anderen klimatischen und volkswirtschaftlichen Bedingungen geplant wurden, ist zu überprüfen.*

3 BRANDENBURGS WÄLDER

3.1 Problemstellung

Wälder sind der wichtigste Kohlenstoffspeicher in der terrestrischen Biosphäre. Dies ist auf den großen Flächenanteil der Wälder an der vegetationsbedeckten Erdoberfläche zurückzuführen. Darüber hinaus ist auch die Kohlenstoffspeicherung pro Flächeneinheit in Wäldern hoch, da hohe Vorräte in der lebenden holzigen Biomasse vorliegen und oft große Bodenkohlenstoffvorräte unter Wäldern akkumuliert werden. Die Kohlenstoffspeicher im Wald ändern sich mit der Assimilation von atmosphärischem CO_2 durch den Prozess der Photosynthese, der Freisetzung von Kohlenstoff durch Respirationsprozesse im Ökosystem, dem Austrag mit dem Versickerungswasser und der Entnahme durch Holzernte, Streunutzung und Nutzung weiterer pflanzlicher und tierischer Produkte des Waldes. Die biologischen Prozesse der Photosynthese und Respiration variieren als Funktion des Wetters bzw. Klimas, der atmosphärischen CO_2-Konzentration, der Nährstoffdeposition und -verfügbarkeit im Boden, der Schadstoffimmission und der Bewirtschaftungsmaßnahmen.

Die hier vorgestellten Untersuchungen sind eine Fortsetzung und Erweiterung der Wirkungsanalysen von Klimaänderungen auf Wälder in Brandenburg *(Bugmann, 1996; Lindner et al., 1997; Lasch et al., 1999)*. Wälder bedecken fast ein Drittel der Fläche von Brandenburg (ca. 1 Million ha) und beeinflussen die regionale Wasserbilanz Brandenburgs erheblich. Die Kohlenstoffspeicherfunktion der Wälder gewinnt im Zuge der Maßnahmen nach dem Kyoto-Protokoll zunehmend an Bedeutung. Die wirtschaftliche Nutzung der Brandenburger Wälder stellt zusammen mit der Bedeutung für den Tourismus einen wichtigen ökonomischen Faktor dar.

Brandenburg hat ein relativ trockenes Klima, das Auswirkungen auf das Wachstum und die Vitalität der Wälder hat und sich sowohl in der Wasser- als auch in der Kohlenstoffbilanz niederschlägt. Klimaänderungen, vor allem solche, die mit Niederschlagsreduktionen verbunden sind, können diese Bilanzen negativ beeinflussen.

3.2 Methode

Um die Folgen möglicher Klimaänderungen einzuschätzen, werden Simulationsmodelle eingesetzt, die die Waldentwicklung unter Klimaeinfluss beschreiben.

Die Untersuchungen von möglichen Auswirkungen von Klimaänderungen waren lange beschränkt auf Modellanwendungen an einzelnen Standorten oder entlang klimatischer Gradienten *(Lindner et al., 1996)*. Ein verbessertes Wissen über die Auswirkungen von Klimaänderungen auf Wälder im regionalen Maßstab wird jedoch benötigt, um der Forstwirtschaft Informationen über Wachstumstrends und Konkurrenzverhältnisse als Basis für die Planung und die Bewertung von Bewirtschaftungsstrategien zur Verfügung zu stellen. Aus diesem Grund wurde das im folgenden Abschnitt vorgestellte Waldwachstumsmodell 4C entwickelt, das innerhalb dieser Studie auf einem Raster-Netz von Punkten angewendet wird (s. Datengrundlage Kapitel 3.2.2) und damit Aussagen für die Region Brandenburg erlaubt.

3.2.1 Modell 4C

Das Simulationsmodell 4C (FORESEE - FORESt Ecosystems in a changing Environment) ist ein physiologisch basiertes Waldsukzessionsmodell, das die Etablierung, das Wachstum und die Mortalität von Baumkohorten beschreibt *(Bugmann et al., 1997; Schaber et al., 1999; Suckow et al., 2001)*. Der Anfangszustand wird entweder durch eine Forstinventur definiert oder auf der Basis natürlicher Regeneration simuliert.

Die Baumindividuen einer jeden Art sind in Kohorten gleichen Alters und gleicher Baumdimensionen zusammengefasst. Produktion und Wachstum werden für jede Kohorte berechnet. Die Konkurrenz der Kohorten um Licht, Wasser und Nährstoffe beeinflusst ihr Wachstum, ihre Mortalität und die Verjüngung im Bestand. Für jede Kohorte wird horizontale Homogenität angenommen, d.h. die Position des einzelnen Baumes wird nicht berücksichtigt. Es werden keine Unterschiede in den Wachstumsbedingungen einzelner Individuen derselben Kohorte berücksichtigt. Die Kohorten werden dann entsprechend der gemessenen Verteilungen von Brusthöhendurchmesser und soweit gemessen Baumhöhe und Kronenansatzhöhe definiert.

Das Wasser- und Nährstoffangebot wird in Abhängigkeit von Boden, Bestand und Wetter bilanziert *(Grote et al., 1999)*. Dazu wird der Wassergehalt des Bodens nach Abzug der Transpiration und der Bodenevaporation mit Hilfe eines Versickerungsmodells berechnet *(Glugla, 1969; Koitzsch, 1977)*, auf dessen Grundlage dann die aktuelle Bodentemperatur bestimmt wird. Beide Größen steuern die Umsatzgeschwindigkeit der Streu und der organischen Bodensubstanz und damit die Nährstoffverfügbarkeit *(Kartschall et al., 1990; Moorhead et al., 1996; Grote and Suckow, 1998)*. Durch die jährliche Bilanzierung des Streufalls und die Zufuhr zum Bodenkompartiment wird der Nährstoffkreislauf im System Pflanze - Boden geschlossen. Zusätzlichen Eintrag erhält das System durch die Deposition, Verluste treten durch Auswaschung auf. Zur Initialisierung des Bodenmodells werden Daten zu Bodenstruktur, sowie Kohlenstoff- und Stickstoffgehalten benötigt.

Abbildung 27 zeigt das prinzipielle Zusammenwirken der Teilmodelle zur Vegetations- und Bodendynamik innerhalb von 4C.

Die Mortalität der Individuen innerhalb der Kohorten kann aus der Kohlenstoffbilanz bestimmt werden (stressbedingte Mortalität) oder nach einer vorgegebenen intrinsischen Mortalitätsrate. Beide Ansätze können auch kombiniert werden. Stressbedingte Mortalität tritt auf, wenn die Kohlenstoffbilanz dauerhaft negativ wird - nach einer baumartenspezifischen Latenzzeit führt fortwährend negative Bilanz zur Verringerung der Individuenzahl der Kohorte bzw. zum vollständigen Absterben der Kohorte. Die intrinsische artenspezifische Mortalität wird über ein maximales Alter der Baumart definiert *(Botkin et al., 1972)*.

Waldbaumaßnahmen können als vorgeschriebene Reduktion der Individuenzahl zu einem bestimmten Zeitpunkt berücksichtigt werden; dazu gehören Durchforstungsmaßnahmen, Erntemethoden und Verjüngung durch Säen und Pflanzen.

Die numerische Simulation berechnet die Flüsse und Änderungen der Zustandsvariablen mit prozessabhängig unterschiedlichen zeitlichen Schrittweiten. Die Wasser- und Wärmeflüsse und die Phänologie werden im Tagestakt berechnet, Bodenkohlenstoff-

und Stickstoffdynamik, sowie die photosynthetische Produktion mit Schrittweiten zwischen wahlweise einem Tag bis zu einer Woche, während Allokation, Wachstum und die demographischen Prozesse im Jahrestakt berechnet werden. Als treibende klimatische Größen werden Tagesmitteltemperatur, Niederschlag, Luftdruck, Luftfeuchte und Strahlung benötigt.

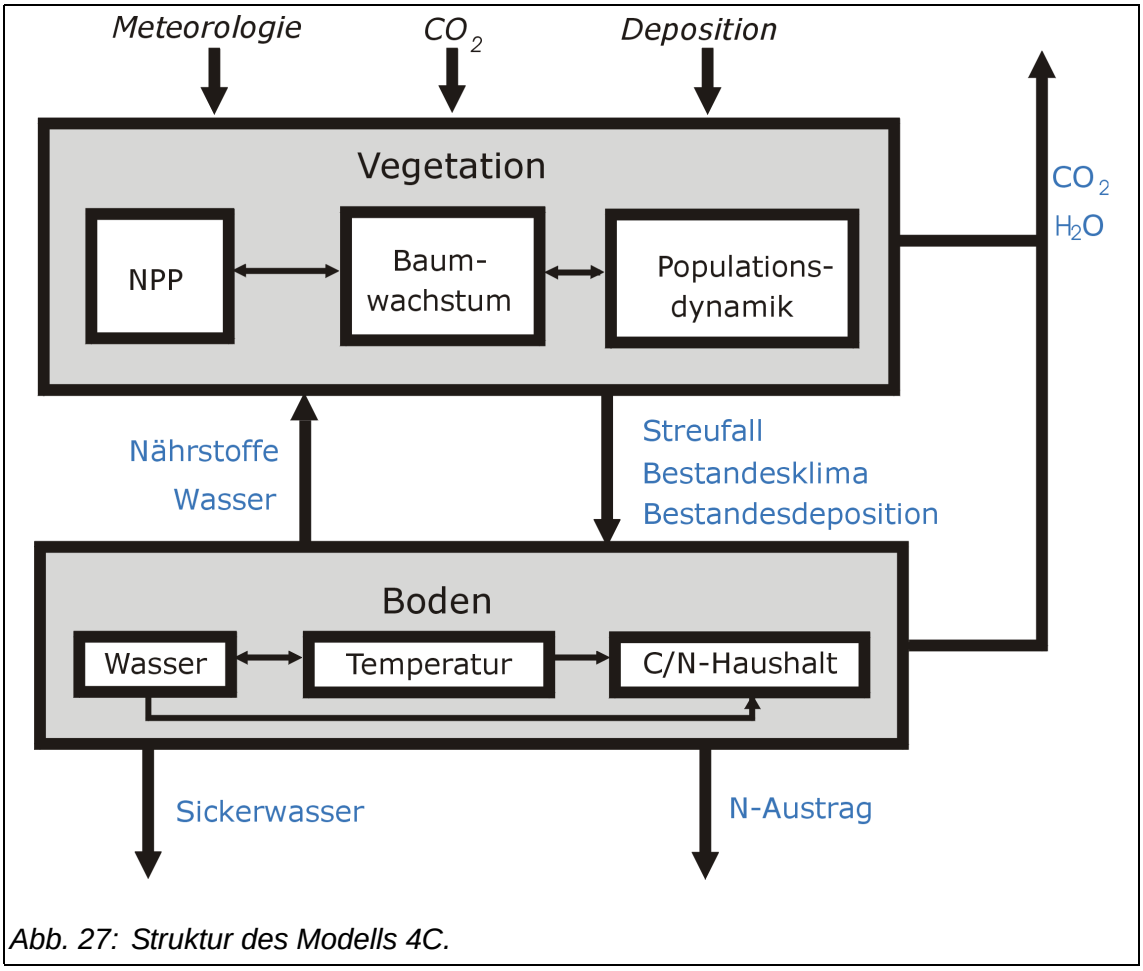


Abb. 27: Struktur des Modells 4C.

Das Modell ist für 5 Baumarten parametrisiert (Buche, Kiefer, Fichte, Eiche, Birke).

3.2.2 Datengrundlage

Ausgehend vom Ist-Zustand startet das Waldwachstumsmodell 4C die Simulation mit definierten Beständen, die durch Anzahl der Bäume, Alter, Höhe und Brusthöhendurchmesser beschrieben sind. Als Datenbasis für Brandenburg wurde das Rasternetz der Ökologischen Waldzustandskontrolle (ÖWK) der DDR gewählt, das mit dem Datenspeicher Waldfonds (DSW), der Forsteinrichtungsdatenbank mit Angaben zu Bestandes- und Standortsverhältnissen, verknüpft wurde. Die Flächen des ÖWK-Netzes sind für ca. 80% der Standortbedingungen in Brandenburg repräsentativ. In diesem Rasternetz wer-

den nur Bestände betrachtet, die älter als 40 Jahre sind, das trifft auf ungefähr 70% der Waldbestände Brandenburgs zu.

Die Untersuchungen wurden in 461 Beständen durchgeführt, für die neben den Bestandesinformationen auch die Bodeninformation (BÜK 1000 der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe BGR, Hannover) und die Zuordnung zu einem der 85 Klimaszenarienstandorte Brandenburgs vorliegen. Als Triebkräfte der Simulation werden Zeitreihen für Temperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte und Globalstrahlung verwendet, die aus einem globalen Szenarium für die einzelnen Klimastationen abgeleitet wurden (vgl. Kapitel 1.2). Das zu Grunde liegende Klimaszenarium, das eine mögliche Klimaentwicklung von 2001 bis 2055 wiedergibt, wird im Kapitel 1.4 beschrieben.

Abbildung 28 zeigt die ausgewählten ÖWK-Flächen und ihren Waldtyp.

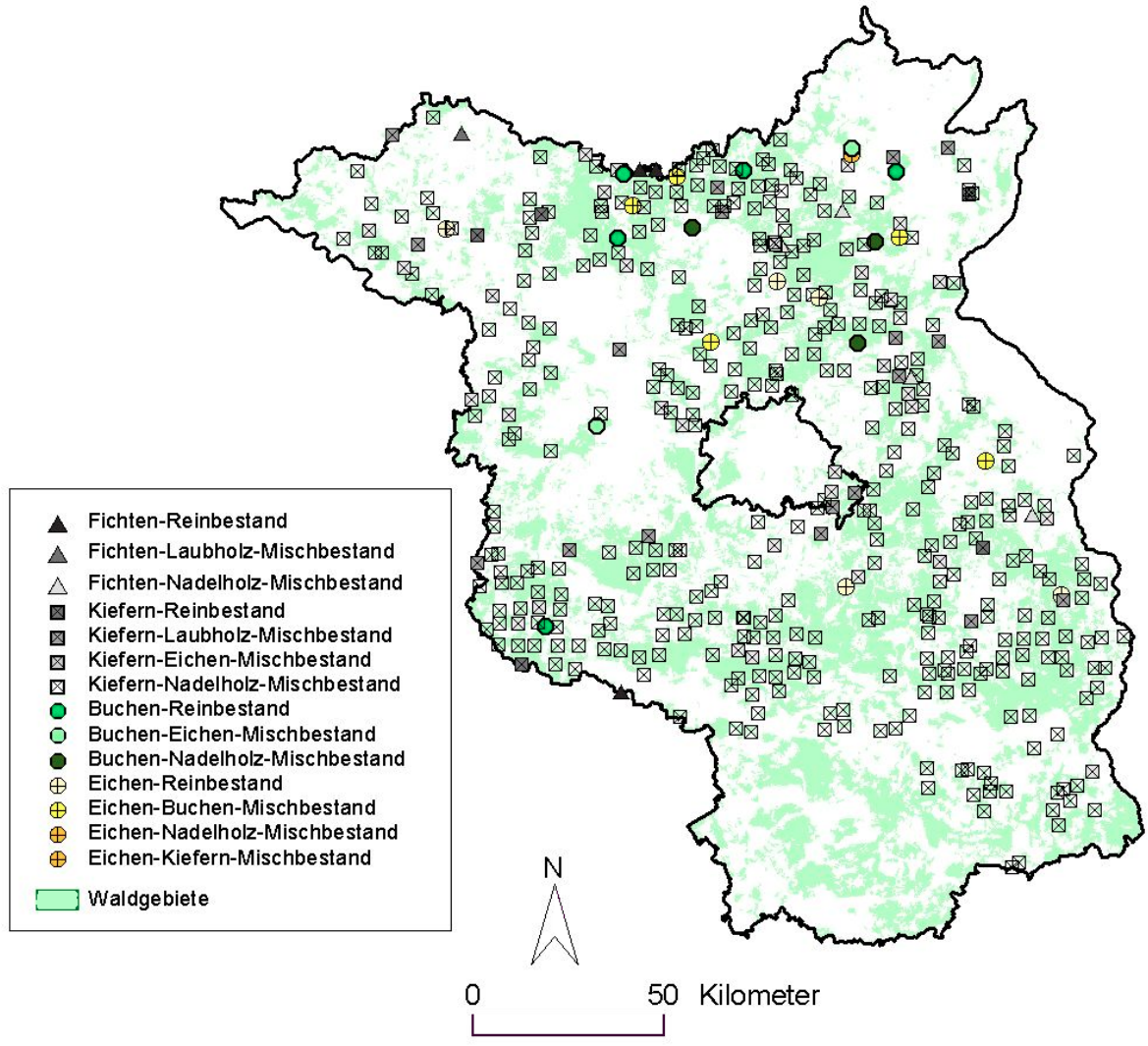


Abb. 28: Karte der verwendeten ÖWK-Punkte (Ökologische Waldzustandskontrolle) in Brandenburg, die in die Untersuchung des Stoffhaushalts eingehen.

3.2.3 Simulationsexperimente

Mit dem Modell 4C wurden an den 461 ÖWK-Punkten zwei Simulationen über jeweils 50 Jahre durchgeführt, sowohl für das Basisszenarium, d.h. mit dem Klima von 1951-2000 als auch für das Klimaänderungsszenarium, d.h. mit dem Klima für 2001-2050. Die Simulationen erfolgten mit einer Bewirtschaftung der Waldbestände in Form von Totholzentnahme. Die Analyse der Ergebnisse wurde anhand charakteristischer Größen des Kohlenstoff- und Wasserhaushalts vorgenommen.

Zur Abschätzung des Kohlenstoffhaushalts der untersuchten Bestände wurden verschiedene C-Speicher berechnet. Die totale C-Speicherung $\mathbf{C_{sum}}$ im Ökosystem zum Ende der Simulationszeit (50 Jahre) wird bilanziert als Summe des C-Speichers im Bestand $\mathbf{C_{bio}}$ (C-Gehalt der Biomasse des Bestandes einschließlich Wurzeln) und des C-Speichers im Boden $\mathbf{C_{bod}}$ (organischer Kohlenstoff in der Auflage und im Mineralboden) des letzten Jahres. Alle durch Totholzentnahme ausgeschiedenen Stämme wurden in C_{mort} bilanziert. Weiterhin wurde die mittlere jährliche Netto-Ökosystemproduktion NEP (gemittelt über den Simulationszeitraum) zur Einschätzung der jährlichen C-Speicherungsraten herangezogen. Diese Größe beschreibt die jährliche Nettospeicherung im Ökosystem (NEP = Assimilation - autotrophe Respiration - heterotrophe Respiration).

Für die Abschätzung der Grundwasserneubildung wurde die jährliche Versickerungsrate herangezogen.

Auf der Grundlage einer Wuchsbezirkskarte Brandenburgs *(Wolff, 2002)* wurden die Ergebnisse der Einzelsimulationen pro Wuchsbezirk aggregiert. Zur Aggregation wurden alle Werte der betreffenden darzustellenden Größen (NEP, C_{sum}, Versickerungsrate) für die ÖWK-Bestände gemittelt, die in dem betreffenden Wuchsbezirk liegen. Daher ist der berechnete Wert nicht repräsentativ für **alle** Waldbestände eines Wuchsgebietes, sondern nur für die Bestände, die durch die ÖWK-Flächen abgebildet werden. Insbesondere Waldbestände, die jünger als 40 Jahre sind, werden damit nicht berücksichtigt.

3.3 Analysen und Ergebnisse

3.3.1 Kohlenstoffspeicherung

Die gesamte Kohlenstoffspeicherung C_{sum} der ÖWK-Bestände steigt in 50 Jahren unter heutigem Klima von 214 t C/ha im Mittel aller Bestände auf 487 t C/ha im Mittel aller Bestände. Dabei findet auf Grund der schwachen Bewirtschaftung (Totholzentnahme) eine relativ große Akkumulation des Kohlenstoffs sowohl in den Beständen als auch im Boden statt. In Tabelle 11 sind die verschiedenen Kohlenstoffspeicher am Beginn und am Ende der Simulationen und die mittlere jährliche NEP dargestellt. Unter dem Klimaszenarium haben die Bestände im Mittel eine geringere Produktivität (NEP) als unter dem Basisszenarium, die zu einer geringeren Kohlenstoffakkumulation führt. Während der Simulationszeit sterben mehr Bäume ab und scheiden aus dem Akkumulationsprozess aus. Ursache dafür ist vor allem die zunehmende Trockenheit auf Grund abnehmender Niederschläge in dem Klimaänderungsszenarium.

	Startjahr	**Basisszenarium nach 50 Jahren**	**Klimaszenarium nach 50 Jahren**
C_{sum} (t C/ha)	214	487	476
C_{bio} (t C/ha)	90	270	258
C_{bod} (t C/ha)	124	217	218
C_{mort} (t C/ha)	-	112	120
NEP (t C/ha/a)	-	7.8	7.7

Tab. 11: Mittelwerte der Kohlenstoffhaushaltgrößen aller ÖWK-Bestände.

In Abbildung 29 ist die räumliche Verteilung der totalen C-Speicherung C_{sum} nach 50 Jahren Simulationszeit unter dem Basisszenarium dargestellt sowie die absolute Änderung des Kohlenstoffspeichers C_{sum} unter dem Klimaszenarium im Verhältnis zum Basisszenarium. Die Abbildungen zeigen, dass die totale C-Speicherung unter dem Klimaszenarium im Norden Brandenburgs überwiegend höher ist als unter dem Basisszenarium. Im Süden Brandenburgs führt das Klimaszenarium größtenteils zu einer geringeren C-Speicherung als unter dem Basisszenarium.

Die relative Änderung der NEP unter dem Klimaszenarium im Verhältnis zum Basisszenarium ist in Abbildung 30 dargestellt. Es wird an dieser Karte ebenfalls deutlich, dass unter dem Klimaszenarium insbesondere im trockeneren Süden Brandenburgs die Kohlenstoffspeicherung etwas zurück geht während im Norden leichte Gewinne zu verzeichnen sind.

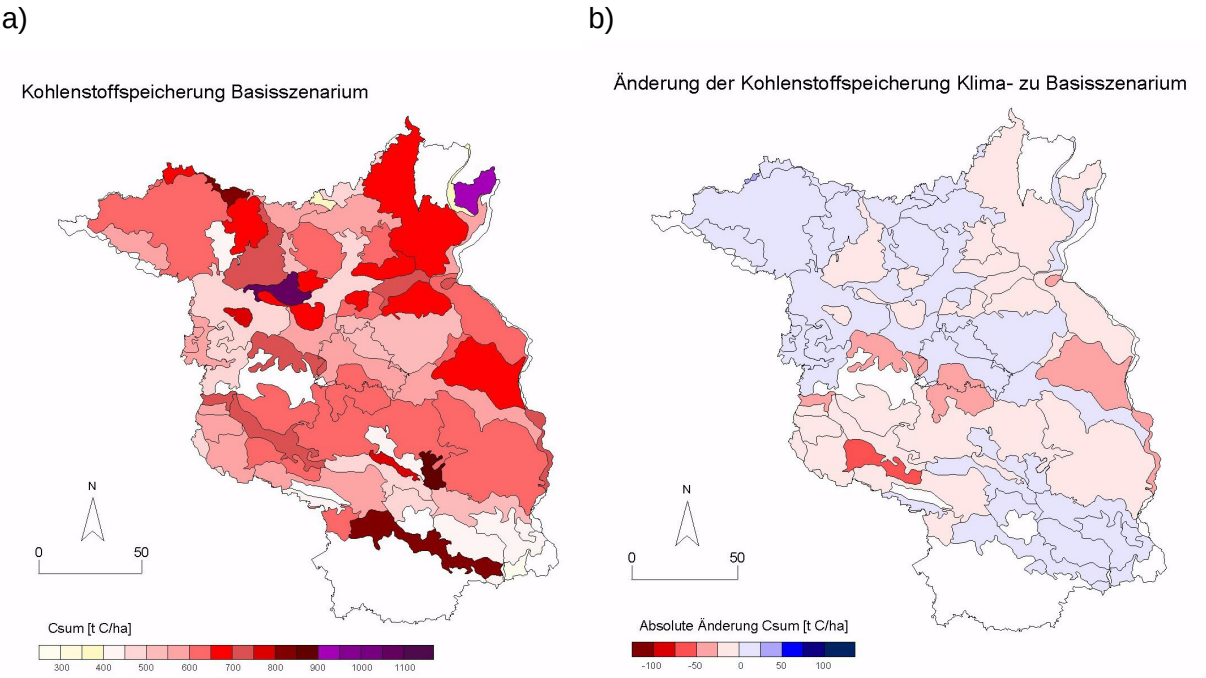


Abb. 29: Darstellung der gesamten Kohlenstoffspeicherung der ÖWK-Flächen in den Wuchsbezirken unter dem Basisszenarium (a) sowie der absoluten Änderung der Kohlenstoffspeicherung unter dem Klimaszenarium verglichen mit dem Basisszenarium (b).

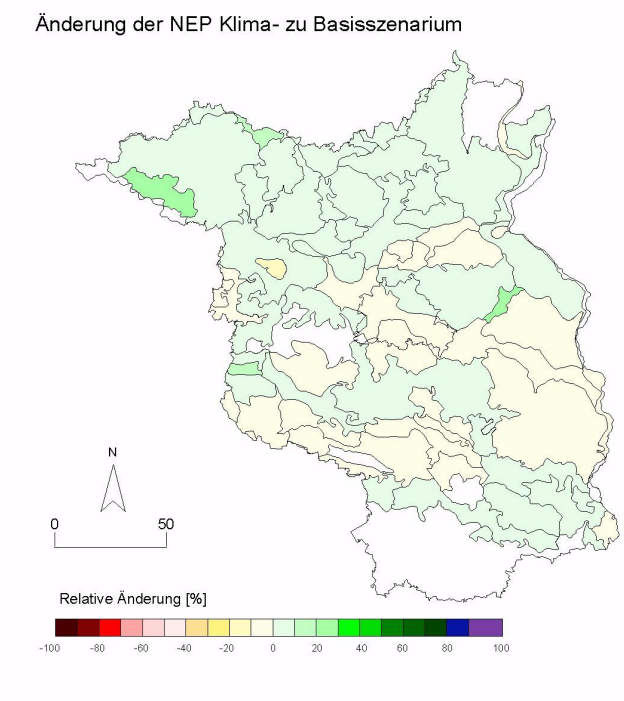


Abb. 30: Karte der relativen Änderung der NEP unter dem Klimaszenarium verglichen mit dem Basisszenarium.

3.3.2 Grundwasserneubildung

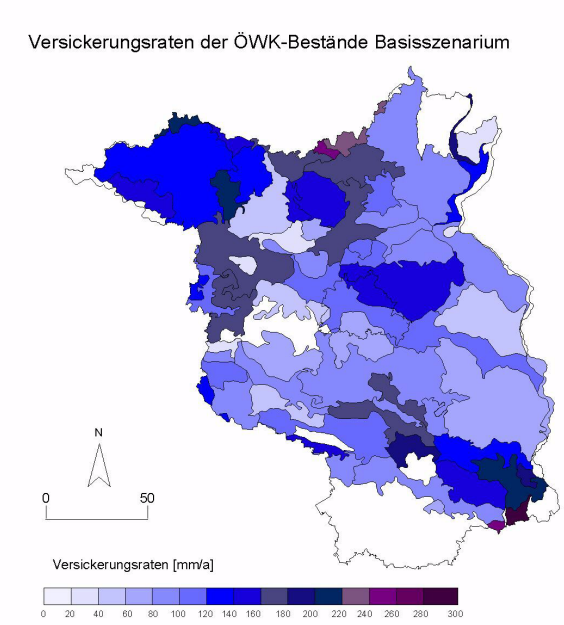
Der Beitrag zur Grundwasserneubildung unter den Brandenburger Wäldern wird durch die angenommene Klimaänderung stark beeinflusst. Eine Übersicht der jährlichen Wasserhaushaltsgrößen der ÖWK-Bestände ist in Tabelle 12 gegeben. Es wird deutlich, dass sich das Klimaszenarium am stärksten auf die Versickerungsrate auswirkt. Die Wälder nutzen das reduzierte Niederschlagsangebot vorrangig zur Befriedigung ihres leicht erhöhten Transpirationsbedarfs und senken dadurch die Versickerung.

	Basisszenarium	**Klimaszenarium**
Niederschlag (mm)	555	508
Versickerung (mm)	118	66
AET (mm)	439	445
Interzeption (mm)	147	143

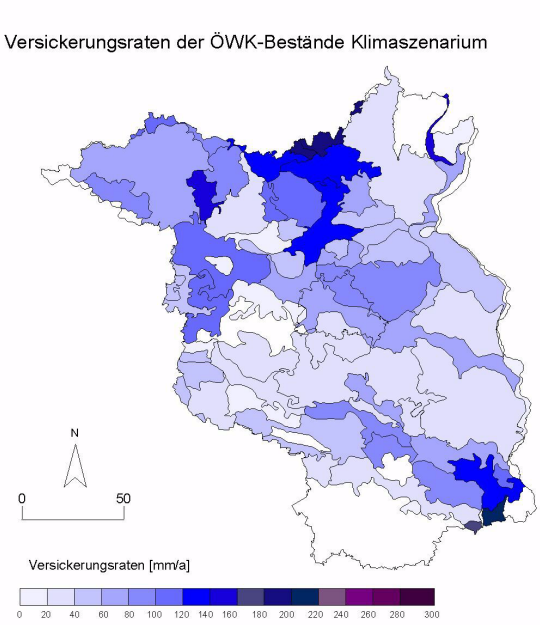
Tab. 12: 50-jährige Mittelwerte der jährlichen Wasserhaushaltsgrößen aller ÖWK-Bestände (AET – Aktuelle Evapotranspiration).

Die regionale Differenzierung der Versickerungsrate in den Wuchsbezirken ist in Abbildung 31 dargestellt. Hier wird besonders deutlich, dass sich die Bedingungen für die Grundwasserneubildung auf Grund der starken Abnahme der Versickerungsraten insbesondere im Süden stark verschlechtern.

a)



b)



c)

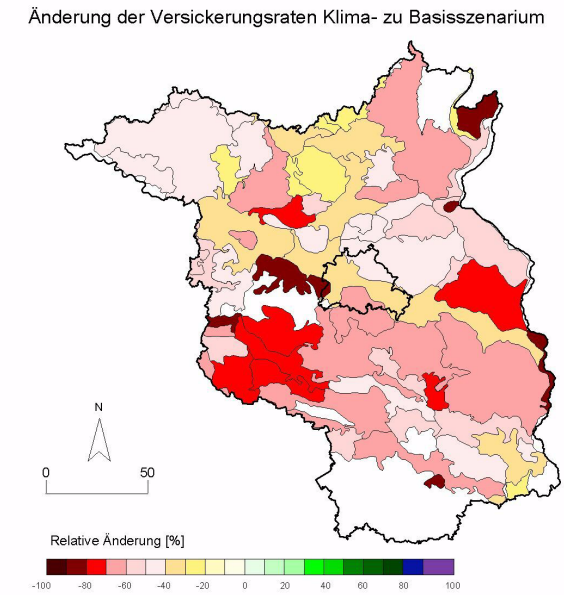


Abb. 31: Darstellung der jährlichen Versickerungsraten der ÖWK-Bestände, gemittelt für Wuchsbezirke, unter dem Basisszenarium (a) und dem Klimaszenarium (b) sowie der relativen Änderung der Versickerungsraten unter dem Klimaszenarium im Vergleich zum Basisszenarium (c).

3.4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Mit dem Modell 4C zur Beschreibung der Waldwachstumsdynamik unter Umwelteinflüssen wurden mögliche Auswirkungen einer angenommenen Klimaänderung auf die Produktivität und ausgewählte Funktionen von Waldökosystemen in Brandenburg untersucht. Die Simulationen mit dem Modell zeigen einen Zusammenhang zwischen der klimatischen Änderung und der Produktivität der Waldbestände sowie ihrer Funktion im regionalen Wasserhaushalt.

Das ausgewählte Klimaszenarium, das von einer moderaten globalen Klimaänderung ausgeht, ist charakterisiert durch eine Temperaturerhöhung um 1.4 K, verbunden mit einem mittleren Niederschlagsrückgang von ca. 10% für die ÖWK-Flächen. Es zeigt eine der möglichen Entwicklungen des Klimas in Brandenburg, das aus einer Reihe möglicher Szenarien ausgewählt wurde.

Nach 50 Jahren Simulationszeit sind die Auswirkungen dieser Klimaänderung auf den Wasserhaushalt gravierender als auf die Kohlenstoffspeicherung, d.h. auf die Produktivität der Bestände. Die moderaten Änderungen von Temperatur und Niederschlag dieses Klimaszenariums im Laufe der 50 Jahre Simulationszeit führen nicht zu drastischen Veränderungen des Wachstumsverhaltens der Waldbestände. Wie stark die Auswirkungen ausfallen und in welche Richtung die Produktivitätsveränderungen gehen, ist vor allem vom Niederschlag (Höhe und saisonale Verteilung) und zum anderen von der Bestandeszusammensetzung abhängig.

Die Anwendung von Klimaszenarien, die andere Ausprägungen der Klimaänderung realiseren, können zu deutlich anderen Ergebnissen bezüglich der Produktivität führen, insbesondere wenn es zu stärkerer Abnahme im Niederschlag kommt. Mit Sicherheit führt eine Abnahme im Niederschlag zu einem Rückgang der Versickerung.

Die Modellsimulationen gehen von der momentanen Situation der Wälder in Brandenburg aus, die immer noch von einer starken Dominanz der Kiefernmonokulturen geprägt ist. Der geplante und begonnene Waldumbau hin zu stabileren und naturnäheren Mischbeständen geht in die vorgestellten Simulationen noch nicht ein. Laubwälder gewährleisten einen höheren Grundwassereintrag als Nadelwälder auf Grund geringerer Interzeptions- und Transpirationsverluste außerhalb der Vegetationsperiode. In einem Klima mit verringerten Niederschlägen würden Laubmischwälder für eine günstigere Bilanz des Wasserhaushalts zu Gunsten der Grundwasserneubildung sorgen.

In Brandenburg ist ein Gradient von maritim beeinflusstem Klima im Norden zu kontinental beeinflusstem Klima im Süden Brandenburgs zu erkennen. Der Süden ist auf Grund der schlechteren Ausgangslage von einer Klimaänderung mit Niederschlagsrückgang stärker betroffen.

Die modellgestützte Abschätzung der Kohlenstoffspeicherung in Wäldern Brandenburgs soll in weitergehenden Untersuchungen durch die Berücksichtigung der Alterstruktur der Bestände in den Wuchsbezirken verbessert werden. Dabei werden auch die Wirkungen der Bewirtschaftung (z.B. Waldumbau, verschiedene Umtriebszeiten, Durchforstungsstärken- und formen) und Landnutzungsänderung (z.B. Aufforstungen) analysiert. Des-

weiteren ist geplant, die Klimaänderungsszenarien mit den entsprechenden CO_2-Szenarien zu koppeln.

Wie die vorgestellten Ergebnisse zeigen, ist das physiologisch-basierte Waldwachstumsmodell 4C ein geeignetes Mittel zur Analyse der Wirkung von Klimaänderungen auf die Kohlenstoffspeicherung und den Wasserhaushalt von Wald-Ökosystemen. Durch die Simulation von Bewirtschaftungsmaßnahmen können verschiedene Strategien als Reaktion auf mögliche Klimaänderungen untersucht werden. Damit kann das Waldwachstumsmodell 4C auch unterstützend als Entscheidungshilfe eingesetzt werden.

Die Modellanwendungen erfolgten beispielhaft an den ÖWK-Flächen, deren Daten freundlicherweise von der Landesforstanstalt Eberswalde zur Verfügung gestellt wurden, und sind erweiterbar auf alle Bestände des Datenspeicher Waldfonds in Brandenburg.

Für die Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf die Wälder in Brandenburg sind Aussagen über die nächsten 50 Jahre hinaus von großem Interesse, da die Lebensdauer von Waldbeständen deutlich über diesem Zeitraum liegt. Es ist zu erwarten, dass sich negative Auswirkungen des Klimaszenariums auf Grundwasserneubildung und Kohlenstoffspeicherung über einen längeren Zeitraum noch deutlicher ausprägen.

Es besteht die Notwendigkeit, in zukünftige Untersuchungen die Auswirkungen extremer Ereignisse wie Stürme, Hochwasser oder extreme Trockenperioden einzubeziehen, um der Forstwirtschaft die Möglichkeit zur modellgestützten Vorbereitung zu geben. Aktuelle Ereignisse des Jahres 2002 (Sturmtief Ziska am 10.7.2002), die zu einem erhöhten Schadholzvolumen in Brandenburg führten, unterstreichen dies.

3.5 Literatur

Botkin, D.B., Janak, J., Wallis, J., (1972): "Some ecological consequences of a computer model of forest growth", *J. Ecol.*, **60**, 849-872.

Bugmann, H., (1996): "A simplified forest model to study species composition along climate gradients", *Ecology*, **77**, (in press).

Bugmann, H., Grote, R., Lasch, P., Lindner, M., Suckow, F., (1997): "A new forest gap model to study the effects of environmental change on forest structure and functioning", in: G.M.J. Mohren, K. Kramer and S. Sabate (Eds.), Impacts of Global Change of Tree Physiology and Forest Ecosystem. Proceedings of the International Conference on Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems, held 26-29 November 1996, Wageningen. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, pp.

Glugla, G., (1969): "Berechnungsverfahren zur Ermittlung des aktuellen Wassergehaltes und Gravitationswasserabflusses im Boden", Albrecht-Thaer-Archiv, 13, 371-376.

Grote, R., Suckow, F., (1998): "Integrating dynamic morphological properties into forest growth modeling. I. Effects on water balance and gas exchange", *Forest Ecology and Management*, **112**, 101-119.

Grote, R., Suckow, F., Bellmann, K., (1999): "Modelling of carbon-, nitrogen-, and water balances in pine stands under changing air pollution and deposition", in: R.F. Hüttl and K. Bellmann (Eds.), Changes of Atmospheric Chemistry and Effects on Forest Ecosystems. A Roof Experiment Without Roof. Kluwer, Dordrecht, pp. 251-281.

Kartschall, T., Döring, P., Suckow, F., (1990): "Simulation of Nitrogen, Water and Temperature Dynamics in Soil", *Syst. Anal. Model. Simul.*, **7**, 33-40.

Koitzsch, R., (1977): "Schätzung der Bodenfeuchte aus meteorologischen Daten, Boden- und Pflanzenparametern mit einem Mehrschichtmodell", *Z. f. Meteor.*, **27**, 302-306.

Lasch, P., Lindner, M., Ebert, B., Flechsig, M., Gerstengarbe, F.-W., Suckow, F., Werner, P.C., (1999): "Regional impact analysis of climate change on natural and managed forests in the Federal state of Brandenburg, Germany", *Environmental Modeling and Assessment*, **4**, 273-286.

Lindner, M., Bugmann, H., Lasch, P., Suckow, F., (1997): "Wie sind Ergebnisse der Klimawirkungsforschung zu interpretieren?", *AFZ / Der Wald*, **11**, 587-589.

Lindner, M., Lasch, P., Cramer, W., (1996): "Application of a forest succession model to a continentality gradient through Central Europe", *Climatic Change*, **34**, 191-199.

Moorhead, D.L., Sinsabuagh, R.L., Linkins, A.E., Reynolds, J.F., (1996): "Decomposition processes: modelling approaches and applications", *The Science of the Total Environment*, **183**, 137-149.

Schaber, J., Badeck, F.-W., Lasch, P., (1999): "Ein Modell der Sukzessionsdynamik europäischer Wälder - Forest Ecosystems in a changing Environment (4C)", in: D.R. Pelz, O. Rau and J. Saborowski (Eds.), Deutscher Verband forstlicher Versuchsanstalten - Sektion forstliche Biometrie und Informatik. 11. Jahrestagung und Internationale biometrische Gesellschaft. Deutsche Region. Arbeitsgruppe Ökologie, Herbstkolloquium. Freiburg, pp. 212-217.

Suckow, F., Badeck, F.-W., Lasch, P., Schaber, J., (2001): "Nutzung von Level-II-Beobachtungen für Test und Anwendungen des Sukzessionsmodells FORESEE", *Beitr. Forstwirtsch. u. Landsch.ökol.*, **35**, 84-87.

Wolff, B., (2002): "Processing forest inventory data to establish a nationwide database for the estimation of the impacts of climate change on german forest and forestry", *Forstwiss. Centralblatt*, in prep.

Die Simulation repräsentativer Waldstandorte in Brandenburg mit dem Waldsukzessionsmodell 4C zeigen, dass die Auswirkungen des für Brandenburg wahrscheinlichsten Klimaänderungsszenariums zu einem drastischen Rückgang des Grundwassereintrags der Wälder führt. Die Auswirkungen auf das Wachstum und damit auf die Kohlenstoffspeicherung fallen in den angenommen 50 Jahren moderat aus. Die von der Forstwirtschaft betrachteten längeren Zeithorizonte und Aspekte der Waldbewirtschaftung müssen in zukünftigen Studien mit einbezogen werden.

4 AUSWIRKUNGEN VON MÖGLICHEN KLIMAÄNDERUNGEN IN DER PERIODE 2040-2050 AUF WASSERHAUSHALT UND ERTRÄGE IN DER LANDWIRTSCHAFT IN BRANDENBURG

4.1 Problemstellung

Die landwirtschaftliche Produktion in Brandenburg ist während der Frühlings- und Sommermonate sehr stark wasserlimitiert. Eine regionale Erwärmung wird diese Limitierung verstärken, wenn sie nicht verbunden ist mit einem Anstieg der regionalen Niederschläge. Ertragsrückgänge bei einer Vielzahl landwirtschaftlicher Kulturen sind die Folge.

Klimaänderungen müssen dabei nicht unbedingt mit Ertragsverlusten und Kostenanstiegen einhergehen. Die Länge der Wachstumsperiode ist vor allem temperaturlimitiert, so dass Temperaturerhöhungen bei ausgewählten Kulturen sogar zu einer Ertragserhöhung führen können. Hinzu kommt, dass der die Klimaänderung gegenwärtig antreibende Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration direkte Folgen auf das Pflanzenwachstum hat, die eher positiv sind. Erhöhtes CO_2 stimuliert die Photosynthese und erhöht die Wassernutzungseffizienz der Pflanzen.

In den letzten Jahren hat es in Brandenburg einen Trend zu abnehmenden Sommerniederschlägen bei leicht zunehmenden Winterniederschlägen gegeben. Die Anfälligkeit der Landwirtschaft gegenüber jahresbedingten Witterungsschwankungen hat sich dadurch verstärkt. Dem kann teilweise durch Rückstau von Überschusswasser und dessen Nutzung zur Zusatzberegnung begegnet werden.

Es bedeutet jedoch, dass sich die Kosten für die landwirtschaftliche Produktion in Brandenburg erhöhen. Dies kann, wenn es nicht durch andere Maßnahmen zur Kostensenkung oder durch Änderungen in den Märkten selbst ausgeglichen wird, zu einer abnehmenden Wettbewerbsfähigkeit Brandenburger Agrarproduzenten führen. Die geschilderten Trends sind möglicherweise Teil eines längerfristigen Klimawandels, sie können aber auch eine kurzfristige Fluktuation des Klimas darstellen. In jedem Fall gilt, dass Brandenburgs Landwirtschaft sehr sensitiv auf Änderungen in den hydrologischen Verhältnissen reagiert. Regionalisierte Klimaszenarien bieten die Möglichkeit, Umfang und Struktur dieser Reaktion zu untersuchen.

Die Wirkungen eines möglichen Klimawandels auf ausgewählte Aspekte des Brandenburger Wasserhaushaltes und auf den Ertrag der Kulturen Winterweizen, Wintergerste und Mais werden im Folgenden durch vergleichende Simulationen illustriert. Dabei werden Simulationsergebnisse für ein Klimaszenarium für den Zeitraum 2040-2050 mit denen verglichen, die für beobachtete klimatische Verhältnissen während der Referenzperiode 1980-1990 erhalten wurden.

Das Klimaszenarium geht für den Zeitraum 2040-2050 von einem Anstieg der mittleren Jahrestemperaturen gegenüber dem Vergleichszeitraum 1980-1990 von 1.7 K aus (entspricht dem 1.4 K-Klimaänderungsszenarium, das einen Temperaturanstieg von 1.4 K zwischen 2001 und 2055 annimmt). Der mittlere Jahresniederschlag verringert sich dabei von 552 mm auf 478 mm.

4.2 Modellierungsansatz

Durch das Modell SWIM (Soil and Water Integrated Model, *Krysanova et al., 1998*) (Abbildung 32) werden die Folgen von Klimaänderungen auf den Gebietswasserhaushalt und das Wachstum landwirtschaftlicher und sonstiger Vegetation simultan behandelt. SWIM enthält als Kern ein kontinuierlich arbeitendes, räumlich gegliedertes Modell, welches in integrierter Form die hydrologischen, die Vegetations-, die Nährstoff- (Stickstoff N und Phosphor P) sowie die Sedimenttransportprozesse in Flussgebieten beschreibt. Es enthält drei wesentliche miteinander wechselwirkende Teilmodelle: das hydrologische, das Stickstoff-, das Phosphor- und das Sedimenttransportmodell.

Das System hat eine Schnittstelle zum GIS GRASS, mit dem die Geländehöhe, die Landnutzung, die Bodentypen, das Gewässernetz im Untersuchungsgebiet u.a. räumlich differenziert erfasst werden können. Das Modell SWIM kann zur integrierten Modellierung in mesoskaligen Flussgebieten eingesetzt werden (Fläche bis max. 100.000 km^2), sowie nach seiner Validierung für beliebige regionale Impactanalysen. Hierfür sind jedoch verschiedene Vereinfachungen in der Betrachtungsweise nötig.

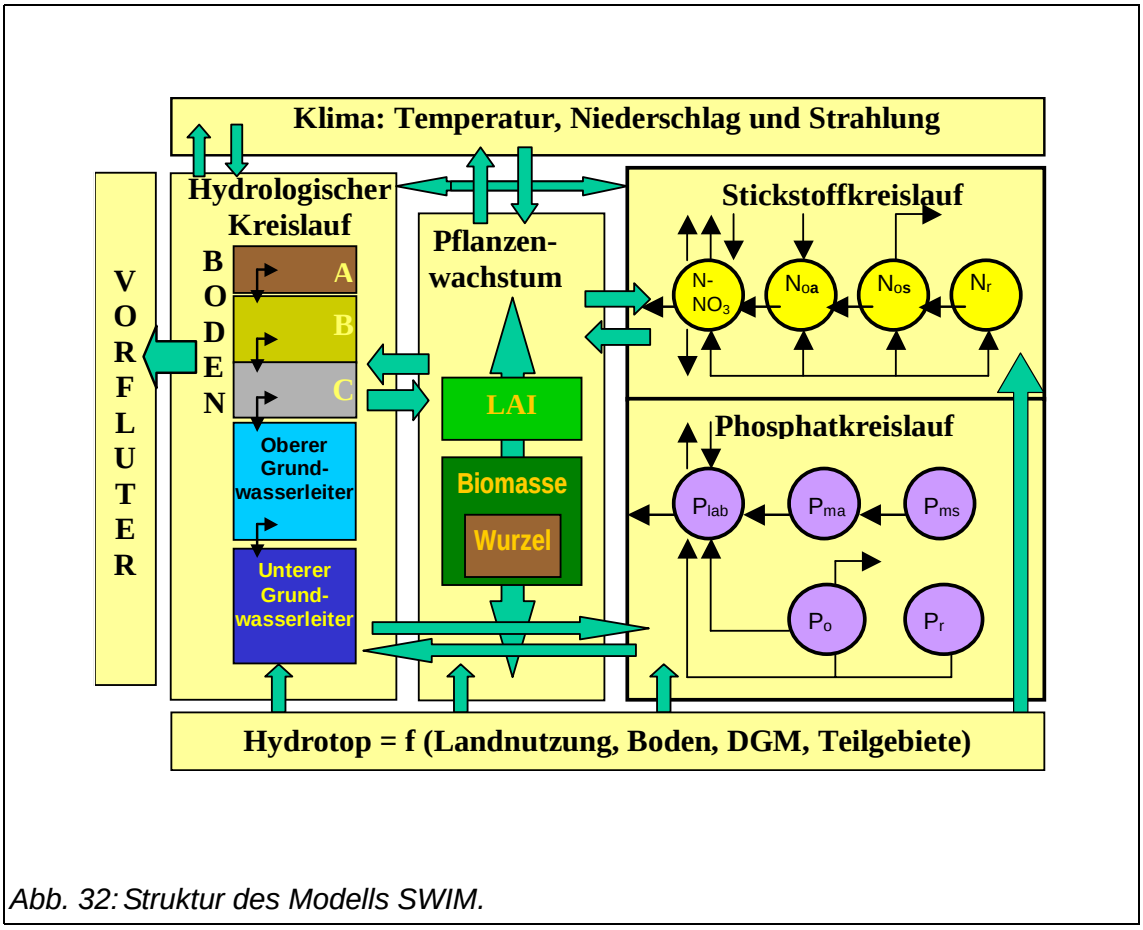


Abb. 32: Struktur des Modells SWIM.

Das gesamte Gebiet Brandenburgs wird unterteilt in hydrologische Regionen. Innerhalb der Regionen wird noch einmal eine Typisierung der Flächen vorgenommen unter besonderer Berücksichtigung von Vegetation, Boden und Klima. Für die verschiedenen

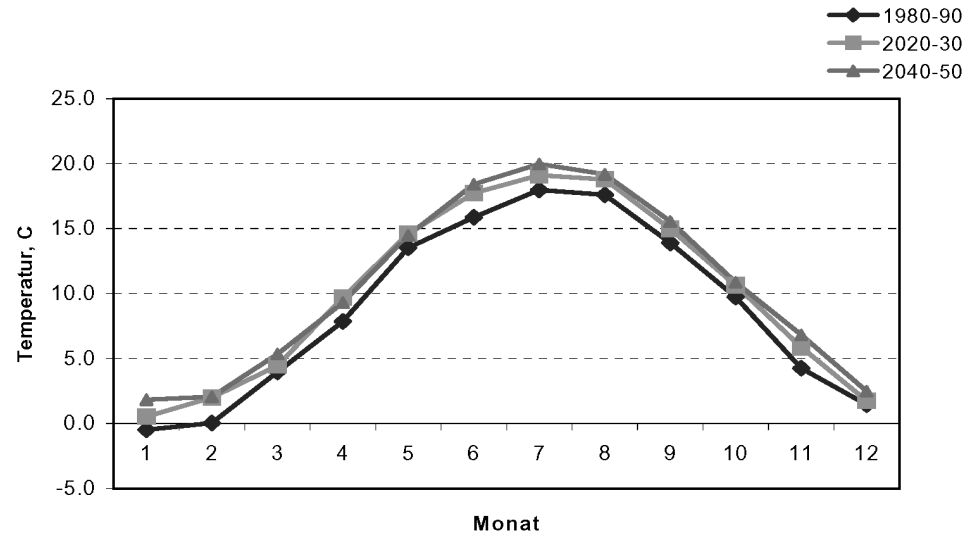
Flächentypen, die auch als Hydrotope bezeichnet werden, wird der Verbrauch des Niederschlagswassers für Evapotranspiration, ober- und unterirdischen Abfluss sowie die Grundwasserneubildung bestimmt. Dabei ändert sich der Status von Boden und Vegetation in den Hydrotopen dynamisch.

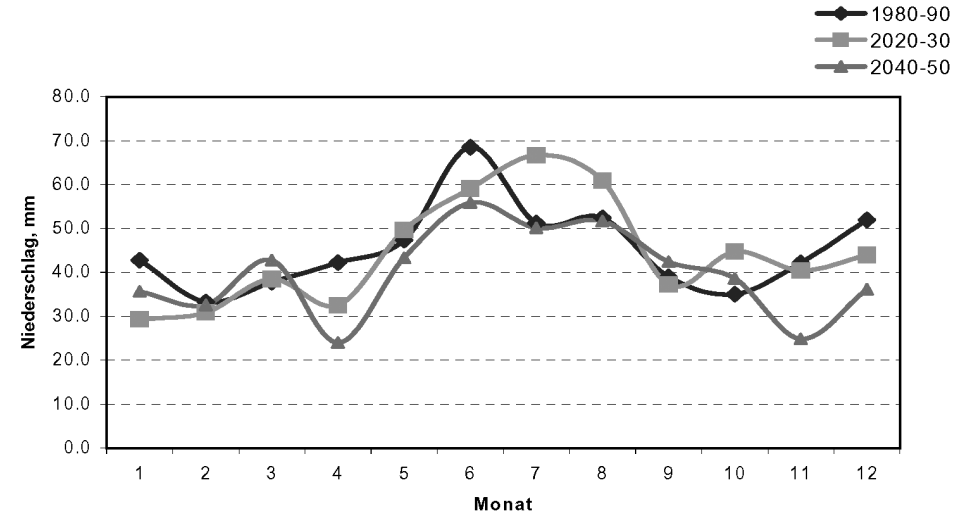
Diese Statusänderungen vollziehen sich in Abhängigkeit von der Witterung und den hydrologischen Verhältnissen und wirken auf die hydrologischen Verhältnisse z. B. über die Bodenbedeckung, Blattfläche und die Wurzeltiefe zurück. Auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen wird die Dynamik der Vegetation mit Modellen ermittelt, die nicht nur summarisch Wachstum und Entwicklung der Vegetation beschreiben, sondern auch die Entstehung eines Ertrages an Körnern, Knollen oder vegetativer Biomasse.

4.3 Klimaszenarium

In Abbildung 33 wird das Szenarium im Vergleich zu den aktuellen Klimabedingungen noch einmal etwas detaillierter charakterisiert. Dieses Szenarium wurde von der Abteilung Klimasystem des PIK bereitgestellt (F.-W. Gerstengarbe und P. C. Werner). Betrachtet wurden drei Zeiträume: 1980-1990 (Bezugsperiode A), 2020-2030 (Periode B) und 2040-2050 (Periode C). Die atmosphärische CO_2-Konzentration für die drei Perioden wurde zu 346, 406 und 436 ppm angesetzt.

Temperatur und Strahlung steigen relativ gleichmäßig über das Jahr verteilt an. Hervorzuheben sind die Temperaturanstiege in November, Januar und Februar, welche tendenziell zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode beitragen. Im Gegensatz zu Temperatur und Strahlung verändert sich der Niederschlag ungleichmäßig über das Jahr. Die Niederschläge in 2040-50 gehen besonders stark in den Monaten April-Juni sowie in den Wintermonaten November und Dezember zurück.





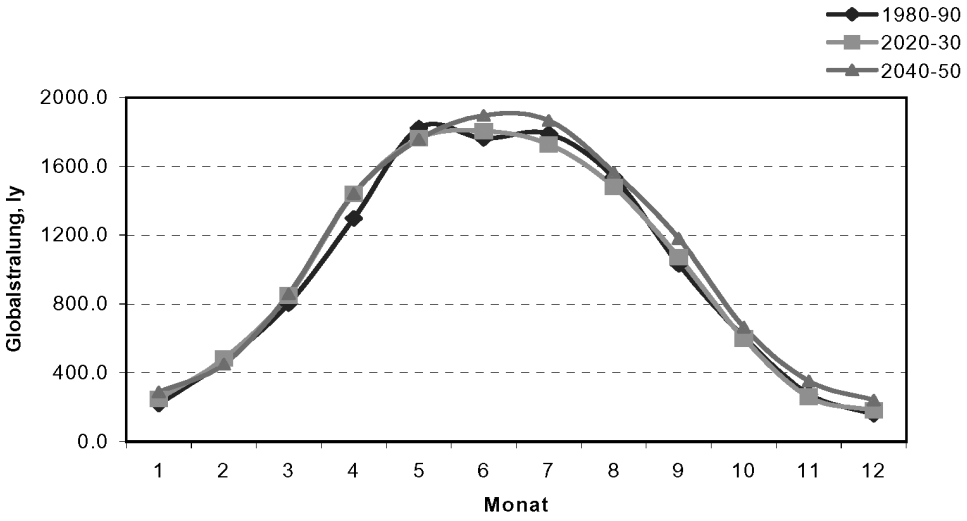


Abb. 33: Klimacharakteristiken für das Referenzklima (1980-1990) und das Klimaszenarium.

4.4 Ergebnisse und Diskussion

Die angenommenen Klimaänderungen führen in den Monaten Mai bis Juli zu einem Rückgang der Evapotranspiration um 23 mm oder 13%. Am stärksten wirkt die Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung, die besonders deutlich in den Wintermonaten zurückgeht (Abbildung 34 und Abbildung 35).

Die Grundwasserneubildung nimmt stark ab, und zwar bis -42% in Periode C. Analog der Grundwasserneubildung ist demgegenüber in Periode C eine deutliche Abnahme des Abflusses zu erwarten, und zwar bis -24%. Damit verbunden ergibt sich zumindest in einigen Jahreszeiten ein höheres Risiko für das Auftreten von Trockenperioden.



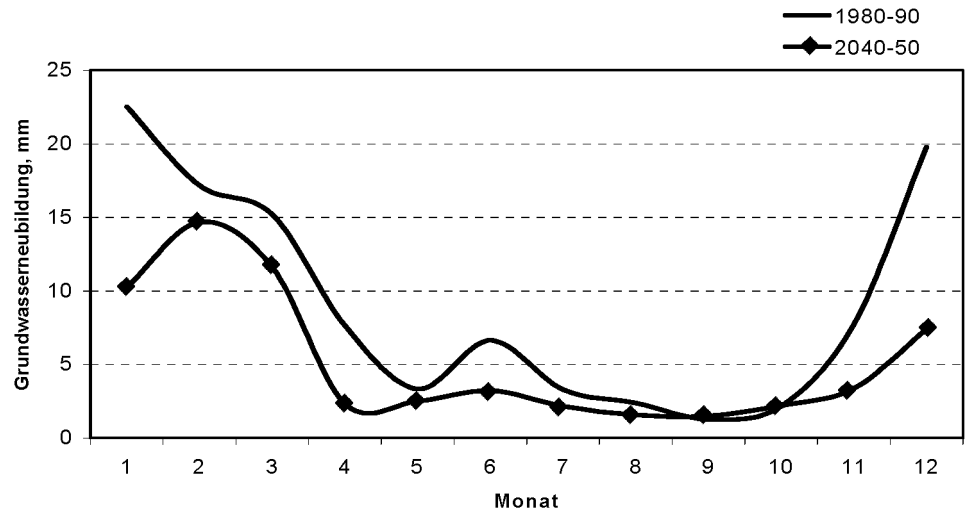




Abb. 34: Die simulierten hydrologischen Folgen von Referenzklima und Klimaszenarium.

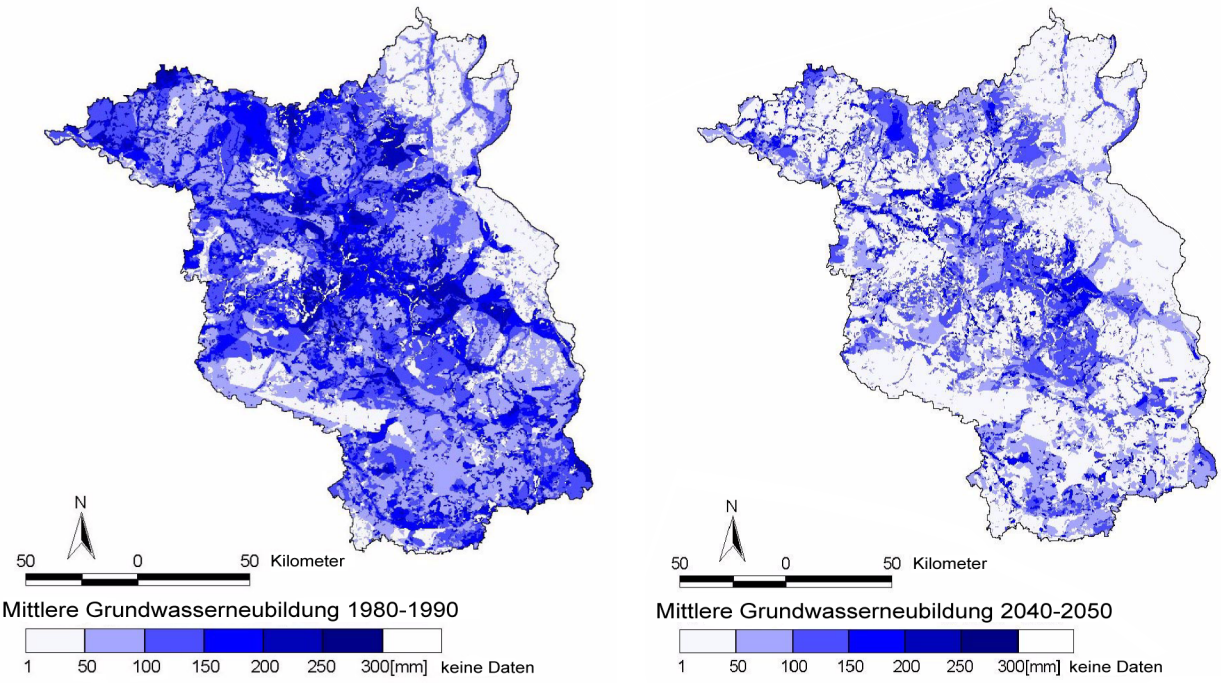


Abb. 35: Änderung der Grundwasserneubildung in 2040-2050 im Vergleich zur Referenzsituation.

Mit dem Rückgang der Evapotranspiration aufgrund des verminderten Bodenwasservorrates verringern sich die mittleren Erträge von Winterweizen um 17% in Brandenburg (Abbildung 36a). Der Maisertrag steigt leicht an (+2%) (Abbildung 36b), was auf die verlängerte Vegetationsperiode zurückzuführen ist. Berücksichtigt man die Photosynthese-Stimulierung des sich abzeichnenden Anstiegs der atmosphärischen CO_2-Konzentration von 346 ppm im Mittel der Achtziger Jahre auf 436 ppm im Mittel der Periode 2040-2050, verringern sich die klimabedingten Ertragsverluste beim Weizen auf 10%. Bei Anbau von Gerste und Mais können leichte Ertragsgewinne realisiert werden (Gerste: +7%, Mais: +8%).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die unmittelbare Betroffenheit der Brandenburger Landwirtschaft durch das untersuchte Klimaszenarium eher gering ist. Mittelbar kann es aber zu Einschränkungen in der Produktion kommen, da der Trend zur Grundwasserabsenkung sich nach diesem Szenarium fortsetzen wird, was die künftigen Möglichkeiten zur Nutzung von Grundwasser für Beregnung insbesondere von landwirtschaftlichen Intensivkulturen einschränkt.

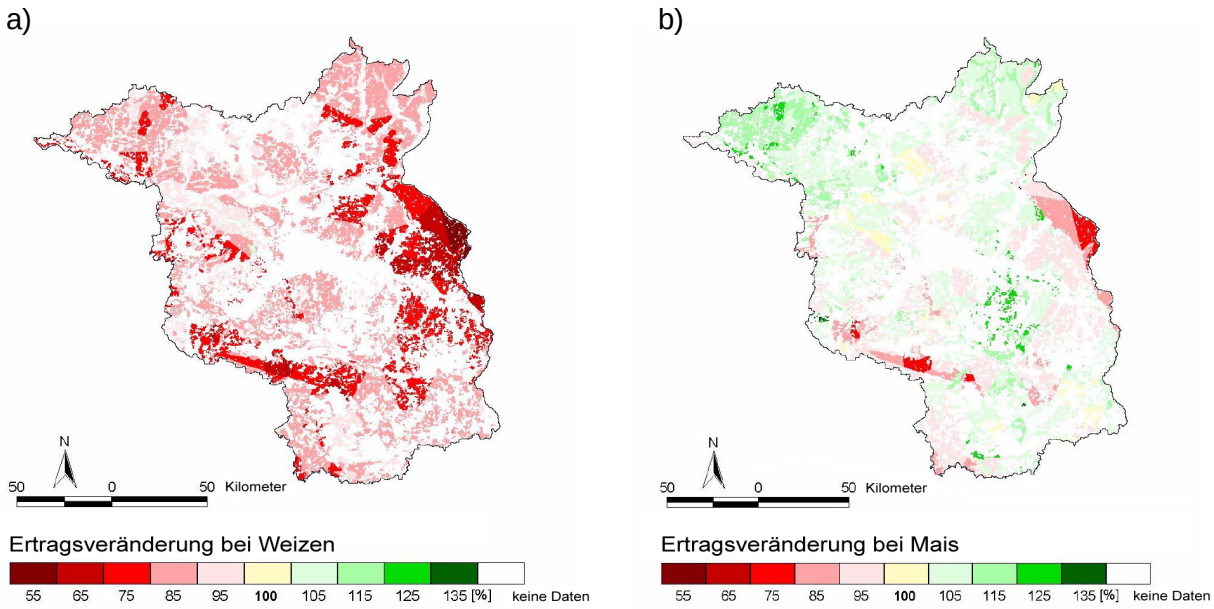


Abb. 36: Relative Änderungen der durchschnittlichen potentiellen Erträge von Weizen und Mais in der Periode 2040-2050 gegenüber der Referenzperiode 1980-1990 ohne Berücksichtigung des CO_2-Effektes auf die Photosynthese.

4.5 Ausblick

In dieser Studie werden die Auswirkungen einer moderaten globalen Klimaänderung auf den Landschaftswasserhaushalt und die landwirtschaftlichen Erträge in Brandenburg dargestellt. Die Ergebnisse sind unter der Annahme einer mittleren Klimaentwicklung erstellt worden. Nicht eingegangen sind extreme Ereignisse wie Starkniederschläge und lange Trockenperioden. Da sich aber im Rahmen der zu erwartenden Klimaänderungen die extremen Ereignisse in ihrer Häufigkeit und Intensität verstärken werden, soll in Zukunft die Erforschung der Auswirkungen von extremen Wetterlagen stärker in den Mittelpunkt gestellt werden.

4.6 Literatur

Haberlandt, U., Krysanova, V., Bardossy, A., (2002): "Assessment of nitrogen leaching from arable land in large river basins. Part II. Regionalzation using fuzzy rule based modelling", *Ecological Modelling*, **150**, (3), 277-294.

Hattermann, F., Krysanova, V., Wechsung, F., Wattenbach, M., (2002): "Multiscale and multicriterial hydrological validation of the ecohydrological model SWIM", in: A.E. Rizzoli, A.J. Jakeman (eds.), Integrated assessment and decision support. Proc. of the 1st biennial meeting of the Int. Env. Modelling and Software Society, vol. 1, 281-286.

Hattermann, F., Krysanova, V., Wechsung, F., Wattenbach, M., (2002): "Hydrological validation of the ecohydrological model SWIM in a macroscale river basin: from the meso- to the macroscale approach", *Hydrological Proceses* (submitted).

Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D. I., Becker, A., (1998): "Development and test of a spatially distributed hydrological / water quality model for mesoscale watersheds", *Ecological Modelling,* **106** (1-2), 261-289.

Krysanova, V., Becker, A., Klöcking, B., (1998): "The linkage between hydrological processes and sediment transport at the river basin scale", in: Summer, W., Klaghover, E., Zhang, W. (eds.), Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes. IAHS Publications, no. 249, p. 13-20.

Krysanova, V., Bronstert, A., Mueller-Wohlfeil, D. I., (1999): "Modelling river discharge for large drainage basins: from lumped to distributed approach", *Hydrological Science Journal*, **44** (2), 313-331.

Krysanova, V., Wechsung, F., Becker, A., Poschenrieder, W., Graefe, J., (1999): "Mesoscale ecohydrological modelling to analyse regional effects of climate change", *Environmental Modelling and Assessment*, **4**, 259-271.

Krysanova, V., Gerten, D., Klöcking, B., Becker, A., (1999): "Factors affecting nitrogen export from diffuse sources: a modelling study in the Elbe basin", in: L. Heathwaite (editor) Impact of Land-Use Change on Nutrient Loads from Diffuse Sources, IAHS Publications, no. 257, p. 201-212.

Krysanova, V., Becker, A., (1999): "Integrated Modelling of Hydrological Processes and Nutrient Dynamics at the River Basins Scale", *Hydrobiologia*, **410**, 131-138.

Krysanova, V., Haberlandt, U., Österle, H., Hattermann, F., (2001): "Effects of natural and anthropogenic factors on nitrogen fluxes in agricultural soils: a modelling study in the Saale River basin (central Europe)", in: Impact of Human Activity on Groundwater Dynamics*,* IAHS Publication, no. 269, 331-338.

Krysanova, V., Haberlandt, U., (2002): "Assessment of nitrogen leaching from arable land in large river basins. Part I: Simulation experiments using a process-based model", *Ecological Modelling*, **150**, (3), 255-275.

Krysanova, V., Hattermann, F., Wechsung, F., (2002): "Process-based ecohydrological modelling at the river basin scale and options for regionalisation", in: A.E. Rizzoli, A.J. Jakeman (eds.), Integrated assessment and decision support. Proc. of the 1st biennial meeting of the Int. Env. Modelling and Software Society, Vol. 1, 393-399.

Krysanova, V., Wechsung, F., (2002): "Impact of Climate Change and higher CO2 on hydrological processes and crop productivity in the state of Brandenburg, Germany", in: M. Beniston (ed.) *Advances in Global Change Research* , **10**, 271-300.

Krysanova, V., Wechsung, F., (2001): "Recent Climate Impact Assessment Studies in Europe: Intercomparison and Methodological Issues", in: Ennuste, U., Wilder, L. (eds.) Factors of Convergence: A collection for the Analysis of Estonian Socio-Economic and Institutional Evolution, Estonian Institute of Economics at Tallinn Technical University, 265-291.

Wechsung, F., Krysanova, V., Flechsig, M., Schaphoff, S., (2000): "May land use change reduce the water deficiency problem caused by reduced brown coal mining in the state of Brandenburg?", *Landscape and Urban Planning*, **51** /2-4, 105-117.

Der Landschaftswasserhauhalt in Brandenburg ist geprägt durch niedrige jährliche Niederschlagssummen (weniger als 600 mm im Landesdurchschnitt), so dass das geringe Wasserdargebot während des Sommerhalbjahres der limitierende Faktor für das Wachstum der natürlichen Vegetation und der landwirtschaftlichen Nutzpflanzen ist. Gleichzeitig ist der Wasserverbrauch durch Industrie, Haushalte, Tourismus und Landwirtschaft gemessen am Wasserdargebot sehr hoch, so dass es zu Nutzungskonflikten z.B. zwischen Wasserwirtschaft und Naturschutz kommt.

Betrachtet man die in dieser Studie untersuchten Auswirkungen eines eher als "konservativ" zu bezeichnenden Klimaänderungsszenariums, so wird deutlich, dass sich diese Konflikte zukünftig noch verstärken können. Für den Zeitraum 2040-2050 ändert sich bedingt durch niedrigere Niederschläge und höhere Temperaturen

- *die Evapotranspiration um -13%,*
- *die Grundwasserneubildung um -42%*
- *und der Gesamtabfluss um -24% gegenüber den jetzigen Werten.*

Dies hat Auswirkungen auf die landwirtschaftlichen Erträge in Brandenburg, und zwar werden sich unter den Szenarienbedingungen

- *die Winterweizenerträge für den Szenarienzeitraum 2040-2050 um -17% gegenüber den heutigen Erträgen ändern,*
- *während die Maiserträge um +2% für den Szenarienzeitraum 2040-2050 steigen werden.*

Berücksichtigt man die Photosynthese-Stimulierung des Anstiegs der atmosphärischen CO_2-Konzentration,

- *werden sich die Winterweizenerträge für den Szenarienzeitraum 2040-2050 um -7% ändern, und*
- *bei Anbau von Mais werden Ertragsgewinne um +8% realisiert.*

Die Landschaft in Brandenburg wird geprägt durch ihre naturnahen Wälder, Seen und Feuchtgebiete auf der einen Seite und durch die menschliche Nutzung, z.B. durch die Landwirtschaft, auf der anderen. Um zukünftig Wassernutzungsprobleme zu vermeiden und die Landschaft in ihrer Vielfalt zu erhalten, ist es darum wichtig, Nutzugskonzepte zu erstellen, die allen Wassernutzern einschließlich der wenig durch den Menschen beeinflussten naturnahen Regionen gerecht wird.

5 PERSPEKTIVEN FÜR BRANDENBURG IM KLIMAWANDEL

Die Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis zum Jahr 2055 wagt mit Hilfe innovativer wissenschaftlicher Methoden eine Vorschau in die Zukunft. Gegenüber dem klassischen Orakel von Delphi bewegt man sich dabei zwar auf wissenschaftlich weitgehend abgesichertem Terrain, konfrontiert den Nutzer der komplexen Aussagen aber gleichfalls mit konkreten Deutungsproblemen. Im Folgenden soll eine Interpretationshilfe skizziert werden, die dem Nutzer entsprechend seinem Tätigkeitsbereich die für ihn relevanten Perspektiven aufzeigt.

5.1 Wen betrifft die Studie und was erfährt man über die Zukunft?

In den Industrienationen hängen bereits heute 5 bis 10% des Bruttosozialprodukts direkt oder indirekt vom Wettergeschehen ab. Mit einem verstärkenden Trend durch die globale Erwärmung ist zu rechnen, da eine Zunahme unvorhergesehener Witterungsbedingungen zu erwarten ist. Betroffene Nutzer, die anhand unserer Studie Maßnahmen zur Optimierung von Marktanpassungen und zur Verringerung bestehender Verwundbarkeiten treffen können, kommen aus nahezu allen Wirtschafts- und Infrastrukturbereichen. Anpassungsmaßnahmen empfehlen sich z.B. für Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft, Naturschutz, Elektrizitäts- und Energiewirtschaft, Bauwirtschaft, Tourismus, Raumordnung, Verkehrswege- und Landnutzungsplanung.

5.1.1 Brandenburg muss sich auf die globale Erwärmung einstellen

Eine wichtige Botschaft der Studie ist, dass der Klimawandel nicht nur ferne Archipele betrifft, sondern konkret auch Brandenburg. Viele der bereits heute getroffenen und zu treffenden Entscheidungen von langfristiger Bedeutung müssen - anders als bisher - die projizierte Klimaveränderung unbedingt berücksichtigen um effektiv wirken zu können.

Die der Studie als Szenarium zugrunde gelegte Veränderung ist als sehr viel wahrscheinlicher anzusehen, als die bisher implizit zugrundegelegte Annahme alles bliebe beim Alten. Demgegenüber könnte man auch erwarten, dass sich einiges stärker verändert als von uns angegeben. Das Szenarium ist keinesfalls die schlimmste anzunehmende Entwicklung, sondern eine von hoher Wahrscheinlichkeit, die bereits heute feststellbare Trends in die Zukunft hinein bis 2055 weiterverfolgt. Der globalen Erwärmung von 1.8 K bis 2055 entspricht in diesem Zeitraum in der Region ein Anstieg um 1.4 K beim langjährigen Mittelwert der Jahrestemperatur.

5.1.2 Trends und Extremwerte

Die sich abzeichnenden Entwicklungen hinsichtlich der langfristigen Trends der Mittelwerte von Temperatur, Niederschlag und anderen Klimaparametern ergeben bereits teilweise gravierende Auswirkungen. Diese Aussagen sind als sehr viel gesicherter anzusehen, als Angaben und Folgerungen hinsichtlich der Schwankungen und Extremwerte. Wegen ihrer Bedeutung für zu erwartende Auswirkungen darf man sie aber nicht außer Acht lassen, muss die Aussagen aber mit Vorsicht betrachten und hierzu mit zukünftig weiter entwickelten Methoden Nachjustierungen und Korrekturen anbringen.

Hinsichtlich der Entwicklung bei Extremwetterereignissen beobachtet man in den letzten dreißig Jahren bei einigen ursächlich damit verbundenen Großwetterlagen signifikante Veränderungen, die mit dem Klimawandel in Zusammenhang gebracht werden. Daraus lassen sich Hinweise zum zukünftigen Auftreten von Extremwettersituationen herleiten. Man kann beispielsweise erwarten, dass Winterstürme zunehmen und heftige Starkregenereignisse im Sommer zunehmen.

Ein Beispiel: Die Grundaussage beim Niederschlag ist, dass er zukünftig im Jahresmittel abnimmt und in der Folge die Grundwasserneubildung stark zurückgeht – Brandenburg wird trockener und bekommt Probleme beim Wasser. Überlagert ist diesem Trend eine Verschiebung in der jahreszeitlichen Verteilung und der Art des Niederschlags. Im Winter steht zwar das Wasser auf den Feldern und täuscht einen Überfluss vor. Tatsächlich aber fehlt das Wasser dann zur Wachstumszeit der Vegetation. Dauerhafter Niederschlag, der zur Grundwasserneubildung nötig ist, geht zurück und wird vermehrt durch heftige Starkregenereignisse ersetzt, die rasch Bäche und Flüsse füllen, zum Grundwasser wenig, dagegen viel zur Hochwassergefahr beitragen. Das heißt: Brandenburg wird mit hoher Wahrscheinlichkeit trockener, muss sich vermutlich gleichwohl auf kritischer werdende Hochwassersituationen einrichten.

5.1.3 Wahlmöglichkeit zwischen verschiedenen Zukünften

Die Zukunft für Brandenburg ist kein vorbestimmter Pfad, den es nur noch durch wissenschaftliche Kundschafter vorherzusagen gilt. Vor uns liegt vielmehr ein Labyrinth von Pfaden und jede Verzweigung wird beeinflusst durch Entscheidungen (oder ihre Unterlassung) von diesen oder jenen Akteuren. Dies ist ein wesentlicher Grund, warum nicht Prognosen, sondern Szenarien die Zukunft beschreiben. Szenarien sagen aus, was nach heutigem Stand der Wissenschaft zu erwarten ist, wenn diese oder jene Entscheidungslage besteht. Das heißt, sie sehen bei anderen Entscheidungen anders aus. Szenarien enthalten damit prinzipiell das Element der Zukunftssteuerung und zwar um so mehr, je näher man von den globalen Ursachen zu den regionalen und konkreten Auswirkungen kommt.

Ein Beispiel: Für Brandenburgs Wälder errechnet sich aus dem Szenarium der Klimaänderung bis 2050 ein um bis zu 30% höheres Waldbrandrisiko als heute, was als sehr kritisch einzustufen ist (ausführliche Ausführungen dazu in der Anlage 1). Neben Entscheidungen für oder gegen CO_2-Minderungsmaßnahmen auf globaler Ebene spielt die Waldstruktur eine wesentliche Rolle bei dieser Projektion. Ersteres kann Brandenburg nur geringfügig und mit zeitlicher Verzögerung beeinflussen, letzteres dagegen entscheidend und bereits heute. Die Projektion geht von einem Weiterbestehen der derzeit verbreiteten Waldstruktur mit Kiefern-Monokulturen aus. Treibt man dagegen den Waldumbau hin zu naturnahen Mischwäldern voran, so wirkt dies dieser problematischen Gefährdungslage entgegen. Das Szenarium kann somit bewirken, dass seine negativen Auswirkungen vermieden werden können. Es ist glücklicherweise keine Prognose, sondern "self destroying prophesy".

5.2 Die Perspektiven der Studie für verschiedene Bereiche

5.2.1 Direkte Auswirkungen der Klimaänderung

Brandenburg liegt im Bereich des gemäßigten, kontinentalen Klimas und gehört zu den trockensten Regionen Deutschlands. Dabei nehmen in der Summe die Sommerniederschläge zur Zeit deutlich ab, die Winterniederschläge leicht zu.

Innerhalb der nächsten 50 Jahre sind folgende Klimaänderungen im Vergleich zur aktuellen Situation zu erwarten:

- moderater Temperaturanstieg von 1.4 K im Jahresmittel, wobei in der Regel die Winter milder werden, extreme Winter zwar seltener auftreten, aber nicht verschwinden,
- Zunahme der Sonnenscheindauer und damit verbunden eine Abnahme der Bewölkung und der Anzahl trüber Tage,
- Deutlicher und örtlich differenziert auftretender Rückgang des Niederschlags, was kombiniert mit mehr Sonnenschein die Grundwasserneubildung stört.

Aus den Ergebnissen der Studie lassen sich wertvolle Hinweise für die Perspektiven verschiedener Wirtschaftsbereiche ableiten, wie der Bauwirtschaft und der Energieversorgung. Gebäude- und Versorgungssysteme, z. B. zum Heiz- und Kühlbedarf, sollten sich den veränderten Bedingungen anpassen, damit die Investitionen effektiv bleiben.

5.2.2 Wasserwirtschaft und Wasserverkehrswege

Sorge machen die Perspektiven für die Wasserressourcen und damit verbundene Auswirkungen auf Natur und Gesellschaft. Die Analysen verdeutlichen, wie angespannt die hydrologische Situation im Land Brandenburg bereits ist und wie der Wasserhaushalt auf zusätzliche, durch Klimaänderungen hervorgerufene "Störungen" reagiert.

Untersuchungen für den Beobachtungszeitraum 1961 bis 1998 zeigen, dass für den Niederschlag eine Verschiebung vom Sommer in den Winter festzustellen ist und die Sickerwassermenge auf etwa 75% der Gesamtfläche Brandenburgs insbesondere in Niederungsgebieten um bis zu 100 mm/Jahr abgenommen hat.

Legt man das eher moderate Klimaszenarium mit einer Temperaturerhöhung von 1.4 K für den Zeitraum 2001-2055 zu Grunde, so zeigt sich, dass ein weiterer Rückgang der Niederschläge bei gleichzeitig zunehmender Verdunstung insbesondere im Sommer zu drastischen Folgen wie einem weiteren Absinken des Grundwasserspiegels, sinkenden Wasserständen in den Flüssen und Problemen bei der Wasserverfügbarkeit und Wasserqualität führt. Diese Tendenz wurde mit drei verschiedenen Modellen aufgezeigt.

Als Folge der klimatischen Änderung könnten die in Brandenburg noch häufig anzutreffenden ausgedehnten Niederungen, Moore und Luchgebiete in ihrer vielfältigen Funktion verloren gehen. Dies könnte zusätzliche negative Rückwirkungen auf die Grundwasserressourcen und die Attraktivität der Landschaft mit sich bringen.

Um vor diesem Hintergrund auch in Zukunft einen intakten Wasserhaushalt, eine nachhaltige Trinkwasserversorgung und einen wirtschaftlichen Betrieb der Wasserverkehrswege sicherzustellen, ergeben sich folgende Empfehlungen:

- Die Auswirkungen klimatischer Änderungen sollten bei hydrologisch relevanten, mittel- bis langfristigen Entscheidungen nicht länger außer Acht gelassen werden.
- Die Umsetzung wasserwirtschaftlicher und verkehrspolitischer Projekte, die in der Vergangenheit unter anderen klimatischen und volkswirtschaftlichen Bedingungen geplant wurden, ist zu überprüfen.
- Zur Ableitung geeigneter Vorsorge-, Anpassungs- und Managementstrategien sind Projekte mit disziplinübergreifenden, ganzheitlichen Ansätzen zu fördern.

5.2.3 Forst- und Landwirtschaft

Die Simulation repräsentativer Waldstandorte in Brandenburg mit einem Waldsukzessionsmodell zeigen, dass die Auswirkungen des für Brandenburg wahrscheinlichsten Klimaänderungsszenariums zu einem drastischen Rückgang des Grundwassereintrags der Wälder führt. Dies bestätigt die Ergebnisse der anderen Modellsimulationen. Die Auswirkungen auf das Wachstum und damit auf die Kohlenstoffspeicherung fallen zwar in den angenommen 50 Jahren moderat aus. Die von der Forstwirtschaft betrachteten längeren Zeithorizonte und Aspekte der Waldbewirtschaftung müssen in zukünftigen Studien mit einbezogen werden, da die Klimaänderung danach noch ganz andere, dramatischere Entwicklungen zeigen kann.

Als wichtigste Maßnahme wird empfohlen, den Aspekt der Klimaänderung beim Waldumbauprogramm im Zusammenhang mit der Diskussion verschiedener Alternativen der Wald- und Landnutzungs- und Bewirtschaftung zu berücksichtigen. Dadurch kann man möglichen negativen Entwicklungen beim Wasserhaushalt und Risiken durch Waldbrand oder Schädlingsbefall begegnen.

Insgesamt ist das geringe Wasserdargebot während des Sommerhalbjahres der limitierende Faktor für das Wachstum der natürlichen Vegetation, der bewirtschafteten Wälder und der landwirtschaftlichen Nutzpflanzen. Gleichzeitig ist der Wasserverbrauch durch Industrie, Haushalte, Tourismus und Landwirtschaft gemessen am Wasserdargebot sehr hoch, so dass es zu Nutzungskonflikten z. B. zwischen Wasserwirtschaft und Naturschutz kommt.

Betrachtet man die in dieser Studie untersuchten Auswirkungen der Klimaänderung, so wird deutlich, dass sich diese Konflikte zukünftig noch verstärken können.

Die Abnahme der Grundwasserressourcen hat Auswirkungen auf die landwirtschaftlichen Erträge in Brandenburg. Trotz eines über den Szenarienzeitraum steigenden CO_2-Düngeeffektes auf die Pflanzen werden sich unter den Szenarienbedingungen die Winterweizenerträge für den Zeitraum 2040-2050 um -17% gegenüber den heutigen Erträgen ändern, während die Maiserträge um +2% für den Szenarienzeitraum steigen werden (ohne Berücksichtigung von Photosynthese-Stimulierung).

Die Landschaft in Brandenburg wird geprägt durch ihre naturnahen Wälder, Seen und Feuchtgebiete auf der einen Seite und durch die menschliche Nutzung, z. B. durch Land- und Forstwirtschaft, auf der anderen. Um zukünftig Wassernutzungsprobleme zu vermeiden und die Landschaft in ihrer Vielfalt zu erhalten, ist es darum wichtig, integrierte Nutzungskonzepte zu erstellen, die allen Wassernutzern einschließlich der wenig durch den Menschen beeinflussten naturnahen Regionen gerecht wird.

5.3 Resümee

In dieser Brandenburgstudie II werden die Auswirkungen einer moderaten globalen Klimaänderung auf den Landschaftswasserhaushalt, die naturnahen Ökosysteme, bewirtschaftete Wälder, die landwirtschaftlichen Erträge und andere wirtschaftliche Aspekte dargestellt. Die Ergebnisse sind unter der Annahme einer mittleren Klimaentwicklung erstellt worden. Nicht eingegangen sind extreme Ereignisse wie Starkniederschläge und lange Trockenperioden. Da sich aber im Rahmen der zu erwartenden Klimaänderungen die extremen Ereignisse in ihrer Häufigkeit und Intensität verstärken werden, soll in Zukunft die Erforschung der Auswirkungen von extremen Wetterlagen stärker in den Mittelpunkt gestellt werden.

Anlage 1

Waldbrandentwicklung im Land Brandenburg
F.-W. Gerstengarbe, P. C. Werner
Der Wald, 7, 392-394 (1997)

Szenarien zur Abschätzung bis zum Jahr 2050

Waldbrandentwicklung im Land Brandenburg

Von Friedrich-Wilhelm Gerstengarbe und Peter C. Werner, Potsdam

Im folgenden wird unter Anwendung einer Szenarienbildung abgeschätzt, welche Waldbrandentwicklung im Land Brandenburg bis zum Jahr 2050 unter bestimmten Ausgangsbedingungen (z.B. Änderung des Temperatur- und Niederschlagsregimes bei Beibehaltung der derzeitigen Waldstruktur) zu erwarten ist. Brandenburg wurde ausgewählt, weil diese Region zu den in dieser Hinsicht extrem stark gefährdeten Gebieten Deutschlands gehört [6]. Da es einen engen Zusammenhang zwischen dem Witterungsgeschehen und der Waldbrandgefährdung gibt [4], ist zu erwarten, daß sich das Waldbrandrisiko im Fall einer Klimaänderung ebenfalls verändern wird.

Klimaprognosen

Eine der zur Zeit intensiv diskutierten Fragen ist die nach der zukünftigen Klimaentwicklung. Dabei wird eine eindeutige Antwort jetzt und in naher Zukunft nicht möglich sein, da das Klimasystem der Erde ein hochgradig nichtlineares System ist, dessen Entwicklung nicht oder nur in sehr beschränktem Maß vorhersagbar ist [5]. Um trotzdem zu Aussagen über mögliche Klimaentwicklungen bzw. deren Auswirkungen zu kommen, geht man den Weg über die Szenarienentwicklung. Unter einem Szenarium versteht man dabei die Beschreibung eines zukünftigen Klimas, wenn bestimmte Annahmen zur Änderung von Einflußgrößen auf das Klima gemacht werden. Werkzeuge zur Szenarienerstellung sind sowohl Klimamodelle als auch statistische Methoden, die auch gekoppelt angewendet werden können.

Werden globale Klimaänderungen erwartet, sind in erster Linie deren regionale Ausprägungen und die damit verbundenen Auswirkungen von besonderem Interesse. So sind z.B. für das Land Brandenburg die Änderungen von Temperatur und Niederschlag im Zusammenhang mit der Waldbrandgefährdung von Bedeutung. Da globale Klimamodelle zur Zeit und in absehbarer Zukunft nicht in der Lage sind, für eine Region verwendbare Modellergebnisse meteorologischer Parameter zu liefern [3], muß zur Abschätzung von Klimaentwicklungen in solchen Gebieten auf andere Möglichkeiten der Datenbereitstellung zurückgegriffen werden. Dabei darf die Konsistenz sowohl räumlich, zeitlich als auch zwischen den meteorologischen Größen nicht verletzt werden.

Aus diesem Grund wurde eine Methode zur Erstellung von Szenarien entwickelt, bei der die genannten Bedingungen erfüllt werden. Die Methode geht davon aus, daß die von einem Klimamodell angegebenen Änderungen für bestimmte meteorologische Größen (z.B. Temperatur) in einer Region im Mittel als richtig anzusehen sind. Auf der Basis einer solchen Annahme werden langjährige Beobachtungsreihen mit statistischen Methoden so aufbereitet, daß sie diese Änderungen in Form eines Szenariums wiedergeben. Konkret heißt dies, daß mit langjährigen Beobachtungsdaten neue meteorologische Reihen erstellt werden, die den vorgegebenen Trend widerspiegeln, wobei die bisher beobachteten statistischen Eigenschaften erhalten bleiben. Dies läßt sich nur mit Hilfe multivariater statistischer Verfahren (z.B. Cluster-Analyse) durchführen. Ein weiterer Vorteil der Methode besteht darin, daß die vorhandenen Klimamodellfehler bei der Szenarienbildung auf ein Minimum reduziert werden [2].

Datengrundlage und Szenarientypen

Zur Berechnung der Szenarien standen die Daten von neun meteorologischen Stationen für die Untersuchungsregion zur Verfügung (Angermünde, Cottbus, Doberlug-Kirchhain, Lindenberg, Marnitz, Müncheberg, Potsdam, Wittenberg, Zehdenick). Dabei handelte es sich um Tageswerte aller wichtigen meteorologischen Größen für den Zeitraum 1951 bis 1990 (Potsdam bis 1995), im folgenden als Basisszenarium (BASZ) bezeichnet.

Auf dieser Basis wurden drei Szenarientypen unter folgenden Annahmen aufgestellt:

- **Szenarium 1:** Klimatische Ausgangssituation 1975 bis 1990 (BASZ); dient der Überprüfung der Genauigkeit der Methode,
- **Szenarium 2:** linearer Temperaturanstieg um 1,5 K zwischen 1996 und 2050 (ST15); Szenarium mit dem nach Modellrechnungen als am wahrscheinlichsten anzusehenden Temperaturanstieg für Mitteleuropa,
- **Szenarium 3:** linearer Temperaturanstieg um 3,0 K zwischen 1996 und 2050 (ST30); Szenarium mit dem nach Modellrechnungen maximal zu erwartenden Temperaturanstieg für Mitteleuropa.

Bei den Temperaturangaben wurde vom IPCC-Bericht [3] ausgegangen. Dabei repräsentieren die Trends ein Fortschreiben („business as usual") der derzeitigen Treibhausgasemissionen. Außerdem wurden zusätzlich für die Szenarien 2 und 3 jeweils ein Gleichgewichtsszenarium (SG15, SG30), das den Endzustand im Jahre 2050 darstellt, berechnet.

Zur Charakterisierung des Waldbrandgeschehens standen zum einen die Anzahl der Waldbrände und die geschädigten Flächen pro Jahr für den Zeitraum 1975 bis 1995 für das Land Brandenburg als Ganzes zur Verfügung, zum anderen aufgeschlüsselt auf die Oberförstereien.[1)]

Vorgehensweise

In einem ersten Schritt wurde untersucht, ob und in welchem Zusammenhang die Anzahl der Waldbrände bzw. die geschädigten Flächen mit der klimatologischen Entwicklung stehen. Dazu wurde der Waldbrandindex WBI [1], der definiert ist als der Koeffizient aus der Anzahl der Sommertage (Tagesmaximum der Lufttemperatur $\geq$ 25°C), dividiert durch die Niederschlagssumme bezogen auf die Vegetationsperiode (April bis September), verglichen mit der Anzahl der Waldbrände bzw. der geschädigten Flächen. Der WBI wurde in diesem Fall berechnet aus den Daten der Station Potsdam (1975 bis 1995) und verglichen mit dem Brandgeschehen in ganz Brandenburg. Abb. 1 zeigt einen sehr engen Zusammenhang

Dr. F.-W. Gerstengarbe ist stellv. Leiter, Dr. P.C. Werner Mitarbeiter in der Abteilung Klimaforschung des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung

1) Die Daten wurden von Prof. Dr. C. Majunke von der Abteilung Waldschutz der Forstlichen Forschungsanstalt Eberswalde zur Verfügung gestellt. Die forstwirtschaftliche Beratung erfolgte durch Dipl.-Forstw. M. Lindner.

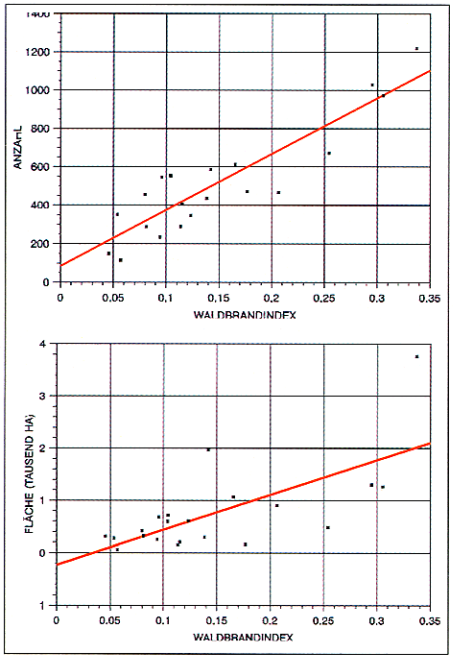


Abb. 1: Vergleich des Waldbrandindexes an der Station Potsdam im Land Brandenburg, 1975 bis 1995; a) mit der Anzahl der Waldbrände, b) mit der von Waldbränden geschädigten Fläche

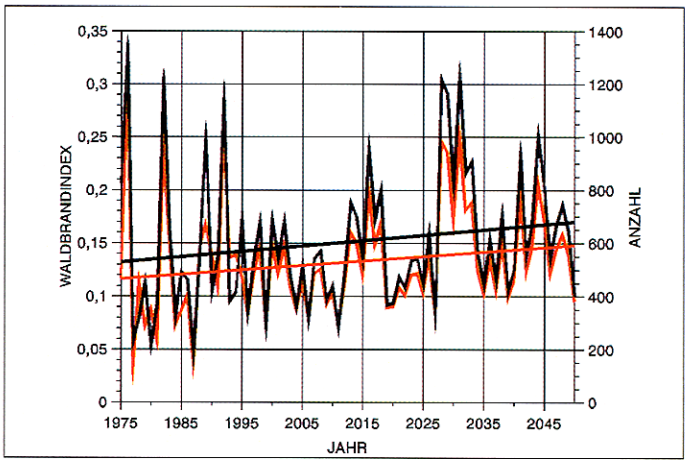


Abb. 2: Waldbrandindex an der Station Potsdam (schwarz) und Anzahl der Waldbrände im Land Brandenburg (rot), 1975 bis 2050 (1975 bis 1995 beobachtet, 1996 bis 2050 simuliert mit Szenarium ST15)

zwischen dem WBI und der Anzahl der Waldbrände (Korrelationskoeffizienten r = 0.89). Dagegen ist der Zusammenhang mit der geschädigten Fläche schwächer ausgeprägt (r = 0.68). Aus diesem Grund wird sich in den weiteren Untersuchungen nur noch auf den erstgenannten Zusammenhang bezogen.

Im zweiten Schritt wurde für die Station Potsdam der WBI für die Szenarien 2 und 3 und den Zeitraum 1996 bis 2050 berechnet. Mit Hilfe des WBI's und den linearen Regressionskoeffizienten läßt sich dann die Anzahl der Waldbrände für jedes Jahr zwischen 1996 und 2050 bestimmen. (Dazu wurden die linearen Regressionskoeffizienten aus den Daten des Beobachtungszeitraumes bestimmt.) Die Ergebnisse für das Szenarium 2 (Abb. 2) verdeutlichen die gute Übereinstimmung zwischen WBI und Anzahl der Brände (was zu erwarten war) sowie einen positiven Trend der Anzahl der Waldbrände im Szenarienzeitraum.

Damit ist es aufgrund des hier nachgewiesenen Zusammenhanges möglich, auf der Basis von Szenarien eine Abschätzung der Waldbrandentwicklung für das Land Brandenburg durchzuführen. Da sowohl die Klimaszenarien als auch das Waldbrandgeschehen in der Untersuchungsregion räumlich deutlich strukturiert sind, muß dies für die weiteren Berechnungen berücksichtigt werden. Dies geschieht, indem im folgenden die Region durch die oben angeführten Stationen in Gebiete einheitlicher Klimacharakteristik eingeteilt werden und diesen wiederum die entsprechenden Waldbrandanzahlen (auf der Basis der zugehörigen Oberförstereien) zugeordnet werden. Dabei werden ähnlich gute Korrelationen, wie sie in Abbildung 1a dargestellt sind, erreicht (r = 0.74 bis 0.91).

Die Qualität des Verfahrens läßt sich für ganz Brandenburg überprüfen, indem man mit den Klimadaten des Zeitraums 1975 bis 1990 (BASZ) die Anzahl der Waldbrände simuliert und das Ergebnis mit den tatsächlich eingetretenen Waldbränden vergleicht. Da im Ergebnis Simulation und Basisszenarium sehr gut übereinstimmen, das heißt, die Abweichungen innerhalb der geforderten Genauigkeit liegen, sind in Abb. 3 nur die beobachteten Waldbrände in ihrer mittleren Verteilung für das Land Brandenburg dargestellt.

Unter Zuhilfenahme der Gleichgewichtsszenarien für das Jahr 2050 konnten nun die Änderungen zwischen dem Ausgangszeitraum (1975 bis 1990) und dem Endzeitraum bestimmt werden.

Ergebnisse

Für alle Ergebnisse der zwei vorgegebenen Szenarien (SG15, SG30; Abb. 4 und 5) gilt, daß sie nur die mittleren großräumigen Verhältnisse widerspiegeln und lo-

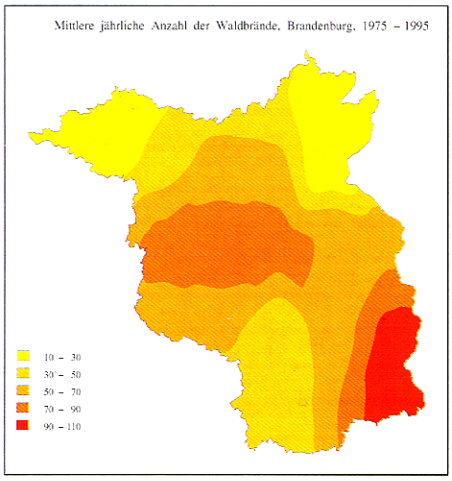


Abb. 3: Mittlere jährliche Anzahl der Waldbrände, Brandenburg, 1975 bis 1990 (bzw. BASZ)

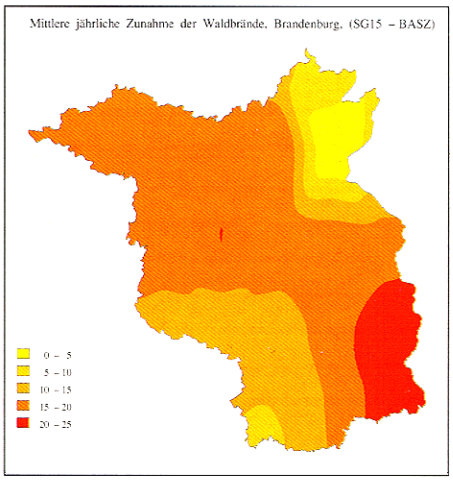


Abb. 4: Mittlere jährliche Zunahme der Waldbrände, Brandenburg, (SG15 - BASZ)

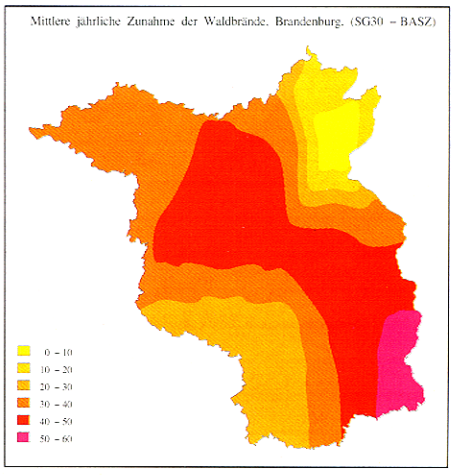


Abb. 5: Mittlere jährliche Zunahme der Waldbrände, Brandenburg, (SG30 - BASZ)

kal begrenzte Besonderheiten (wie z.B. der Spreewald) nicht erfaßt wurden.

Man erkennt, daß die Ausgangszahl der Waldbrände (Abb. 3) nur eine untergeordnete Rolle bezüglich der Entwicklung in den Szenarien spielt. Daraus läßt sich schließen, daß im wesentlichen die räumlich differenzierte Entwicklung der meteorologischen Größen Temperatur und Niederschlag die entscheidende Rolle spielen. Die Änderungen in den beiden Szenarien sind deutlich ausgeprägt. Nimmt man zum Beispiel das für die zukünftige Klimaentwicklung zur Zeit am wahrscheinlichsten anzusehende Szenarium SG15 als Grundlage, muß auf dieser Basis mit einer Zunahme der Waldbrände von bis zu 25 pro Jahr für den Südosten Brandenburgs gerechnet werden. Dagegen ist die relativ geringe Zunahme an Waldbränden im Nordosten auf einen relativ hohen Anstieg der Niederschlagssumme (im Mittel von 480 bis 500 mm auf 510 bis 540 mm) zurückzuführen.

Das Szenarium SG30 zeigt im wesentlichen die gleichen räumlichen Tendenzen wie bereits diskutiert, bei einem gleichzeitig noch höheren Anstieg der Anzahl der Waldbrände.

Folgerungen

Mit dem vorgestellten Verfahren konnte gezeigt werden, daß bei den angenommenen Temperaturerhöhungen und Niederschlagsänderungen im Land Brandenburg bis zum Jahr 2050 mit einer zum Teil markanten Zunahme der Waldbrände zu rechnen ist. Dabei fällt der Anstieg der Brände räumlich deutlich differenziert aus. Die Aussagen beruhen aber auf einer Konstanz der Waldstruktur (und einiger anderer Parameter wie z.B. Bodenart und -struktur) bis 2050. Da unterschiedliche Waldlandschaften unterschiedlich stark brandgefährdet sind (Gefahrenklassen nach [7]), könnte mit einem „Umbau" der Wälder der Waldbrandtendenz entgegengesteuert werden. Da bei vielen der bisher üblichen Untersuchungen zur Wechselwirkung Klima - Wald der Faktor Waldbrand nicht berücksichtigt wird, bietet das vorgeschlagene Vorgehen eine Möglichkeit, diesen in zukünftige Überlegungen mit einzubeziehen.

Literaturhinweise:

[1] BRUSCHEK, G. J. (1994): „Waldbrandgebiete und Waldbrandgeschehen in Brandenburg im Trockensommer 1992", in: Extremer Nordsommer 1992. PIK Reports, No. 2, Vol. 1, Potsdam. **[2]** GERSTENGARBE, F.-W.; WERNER, P.C. (1996): „The development of climate scenarios", PIK-Report No. 26, Potsdam. **[3]** IPCC (1995): „Climate change 1995", Summary for policy makers, Cambridge University Press, Cambridge UK. **[4]** Käse, H. (1969): „Ein Vorschlag für eine Methode zur Bestimmung und Vorhersage der Waldbrandgefährdung mit Hilfe komplexer Kennziffern", Abh. Meteorol. Dienst d. DDR, 94 (Band XII), Akademie-Verlag, Berlin. **[5]** LORENZ, E.N. (1963): „Deterministic Nonperiodic Flow", J. Atm. Sciences, 20. **[6]** MISSBACH, K. (1961): „Die Waldbrandgefährdung der Staatlichen Forstwirtschaftsbetriebe der DDR", Forst und Jagd, II(5). **[7]** WECK, J. (1950): „Waldbrand, seine Vorbeugung und Bekämpfung", W. Kohlhammer Verlag, Stuttgart u. Köln.

PIK Report-Reference:

No. 1 3. Deutsche Klimatagung, Potsdam 11.-14. April 1994
Tagungsband der Vorträge und Poster (April 1994)

No. 2 Extremer Nordsommer '92
Meteorologische Ausprägung, Wirkungen auf naturnahe und vom Menschen beeinflußte Ökosysteme, gesellschaftliche Perzeption und situationsbezogene politisch-administrative bzw. individuelle Maßnahmen (Vol. 1 - Vol. 4)
H.-J. Schellnhuber, W. Enke, M. Flechsig (Mai 1994)

No. 3 Using Plant Functional Types in a Global Vegetation Model
W. Cramer (September 1994)

No. 4 Interannual variability of Central European climate parameters and their relation to the large-scale circulation
P. C. Werner (Oktober 1994)

No. 5 Coupling Global Models of Vegetation Structure and Ecosystem Processes - An Example from Arctic and Boreal Ecosystems
M. Plöchl, W. Cramer (Oktober 1994)

No. 6 The use of a European forest model in North America: A study of ecosystem response to climate gradients
H. Bugmann, A. Solomon (Mai 1995)

No. 7 A comparison of forest gap models: Model structure and behaviour
H. Bugmann, Y. Xiaodong, M. T. Sykes, Ph. Martin, M. Lindner, P. V. Desanker, S. G. Cumming (Mai 1995)

No. 8 Simulating forest dynamics in complex topography using gridded climatic data
H. Bugmann, A. Fischlin (Mai 1995)

No. 9 Application of two forest succession models at sites in Northeast Germany
P. Lasch, M. Lindner (Juni 1995)

No. 10 Application of a forest succession model to a continentality gradient through Central Europe
M. Lindner, P. Lasch, W. Cramer (Juni 1995)

No. 11 Possible Impacts of global warming on tundra and boreal forest ecosystems - Comparison of some biogeochemical models
M. Plöchl, W. Cramer (Juni 1995)

No. 12 Wirkung von Klimaveränderungen auf Waldökosysteme
P. Lasch, M. Lindner (August 1995)

No. 13 MOSES - Modellierung und Simulation ökologischer Systeme - Eine Sprachbeschreibung mit Anwendungsbeispielen
V. Wenzel, M. Kücken, M. Flechsig (Dezember 1995)

No. 14 TOYS - Materials to the Brandenburg biosphere model / GAIA
Part 1 - Simple models of the "Climate + Biosphere" system
Yu. Svirezhev (ed.), A. Block, W. v. Bloh, V. Brovkin, A. Ganopolski, V. Petoukhov, V. Razzhevaikin (Januar 1996)

No. 15 Änderung von Hochwassercharakteristiken im Zusammenhang mit Klimaänderungen - Stand der Forschung
A. Bronstert (April 1996)

No. 16 Entwicklung eines Instruments zur Unterstützung der klimapolitischen Entscheidungsfindung
M. Leimbach (Mai 1996)

No. 17 Hochwasser in Deutschland unter Aspekten globaler Veränderungen - Bericht über das DFG-Rundgespräch am 9. Oktober 1995 in Potsdam
A. Bronstert (ed.) (Juni 1996)

No. 18 Integrated modelling of hydrology and water quality in mesoscale watersheds
V. Krysanova, D.-I. Müller-Wohlfeil, A. Becker (Juli 1996)

No. 19 Identification of vulnerable subregions in the Elbe drainage basin under global change impact
V. Krysanova, D.-I. Müller-Wohlfeil, W. Cramer, A. Becker (Juli 1996)

No. 20 Simulation of soil moisture patterns using a topography-based model at different scales
D.-I. Müller-Wohlfeil, W. Lahmer, W. Cramer, V. Krysanova (Juli 1996)

No. 21 International relations and global climate change
D. Sprinz, U. Luterbacher (1st ed. July, 2n ed. December 1996)

No. 22 Modelling the possible impact of climate change on broad-scale vegetation structure - examples from Northern Europe
W. Cramer (August 1996)

No. 23 A methode to estimate the statistical security for cluster separation
F.-W. Gerstengarbe, P.C. Werner (Oktober 1996)

No. 24 Improving the behaviour of forest gap models along drought gradients
H. Bugmann, W. Cramer (Januar 1997)

No. 25 The development of climate scenarios
P.C. Werner, F.-W. Gerstengarbe (Januar 1997)

No. 26 On the Influence of Southern Hemisphere Winds on North Atlantic Deep Water Flow
S. Rahmstorf, M. H. England (Januar 1977)

No. 27 Integrated systems analysis at PIK: A brief epistemology
A. Bronstert, V. Brovkin, M. Krol, M. Lüdeke, G. Petschel-Held, Yu. Svirezhev, V. Wenzel (März 1997)

No. 28 Implementing carbon mitigation measures in the forestry sector - A review
M. Lindner (Mai 1997)

No. 29 Implementation of a Parallel Version of a Regional Climate Model
M. Kücken, U. Schättler (Oktober 1997)

No. 30 Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results
W. Cramer, D. W. Kicklighter, A. Bondeau, B. Moore III, G. Churkina, A. Ruimy, A. Schloss, participants of "Potsdam '95" (Oktober 1997)

No. 31 Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Analysis of the seasonal behaviour of NPP, LAI, FPAR along climatic gradients across ecotones
A. Bondeau, J. Kaduk, D. W. Kicklighter, participants of "Potsdam '95" (Oktober 1997)

No. 32 Evaluation of the physiologically-based forest growth model FORSANA
R. Grote, M. Erhard, F. Suckow (November 1997)

No. 33 Modelling the Global Carbon Cycle for the Past and Future Evolution of the Earth System
S. Franck, K. Kossacki, Ch. Bounama (Dezember 1997)

No. 34 Simulation of the global bio-geophysical interactions during the Last Glacial Maximum
C. Kubatzki, M. Claussen (Januar 1998)

No. 35 CLIMBER-2: A climate system model of intermediate complexity. Part I: Model description and performance for present climate
V. Petoukhov, A. Ganopolski, V. Brovkin, M. Claussen, A. Eliseev, C. Kubatzki, S. Rahmstorf (Februar 1998)

No. 36 Geocybernetics: Controlling a rather complex dynamical system under uncertainty
H.-J. Schellnhuber, J. Kropp (Februar 1998)

No. 37 Untersuchung der Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO_2-Konzentrationen auf Weizenbestände des Free-Air Carbondioxid Enrichment (FACE) - Experimentes Maricopa (USA)
Th. Kartschall, S. Grossman, P. Michaelis, F. Wechsung, J. Gräfe, K. Waloszczyk, G. Wechsung, E. Blum, M. Blum (Februar 1998)

No. 38 Die Berücksichtigung natürlicher Störungen in der Vegetationsdynamik verschiedener Klimagebiete
K. Thonicke (Februar 1998)

No. 39 Decadal Variability of the Thermohaline Ocean Circulation
S. Rahmstorf (März 1998)

No. 40 SANA-Project results and PIK contributions
K. Bellmann, M. Erhard, M. Flechsig, R. Grote, F. Suckow (März 1998)

No. 41 Umwelt und Sicherheit: Die Rolle von Umweltschwellenwerten in der empirisch-quantitativen Modellierung
D. F. Sprinz (März 1998)

No. 42 Reversing Course: Germany's Response to the Challenge of Transboundary Air Pollution
D. F. Sprinz, A. Wahl (März 1998)

No. 43 Modellierung des Wasser- und Stofftransportes in großen Einzugsgebieten. Zusammenstellung der Beiträge des Workshops am 15. Dezember 1997 in Potsdam
A. Bronstert, V. Krysanova, A. Schröder, A. Becker, H.-R. Bork (eds.) (April 1998)

No. 44 Capabilities and Limitations of Physically Based Hydrological Modelling on the Hillslope Scale
A. Bronstert (April 1998)

No. 45 Sensitivity Analysis of a Forest Gap Model Concerning Current and Future Climate Variability
P. Lasch, F. Suckow, G. Bürger, M. Lindner (Juli 1998)

No. 46 Wirkung von Klimaveränderungen in mitteleuropäischen Wirtschaftswäldern
M. Lindner (Juli 1998)

No. 47 SPRINT-S: A Parallelization Tool for Experiments with Simulation Models
M. Flechsig (Juli 1998)

No. 48 The Odra/Oder Flood in Summer 1997: Proceedings of the European Expert Meeting in Potsdam, 18 May 1998
A. Bronstert, A. Ghazi, J. Hladny, Z. Kundzewicz, L. Menzel (eds.) (September 1998)

No. 49 Struktur, Aufbau und statistische Programmbibliothek der meteorologischen Datenbank am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
H. Österle, J. Glauer, M. Denhard (Januar 1999)

No. 50 The complete non-hierarchical cluster analysis
F.-W. Gerstengarbe, P. C. Werner (Januar 1999)

No. 51 Struktur der Amplitudengleichung des Klimas
A. Hauschild (April 1999)

No. 52 Measuring the Effectiveness of International Environmental Regimes
C. Helm, D. F. Sprinz (Mai 1999)

No. 53 Untersuchung der Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO_2-Konzentrationen innerhalb des Free-Air Carbon Dioxide Enrichment-Experimentes: Ableitung allgemeiner Modellösungen
Th. Kartschall, J. Gräfe, P. Michaelis, K. Waloszczyk, S. Grossman-Clarke (Juni 1999)

No. 54 Flächenhafte Modellierung der Evapotranspiration mit TRAIN
L. Menzel (August 1999)

No. 55 Dry atmosphere asymptotics
N. Botta, R. Klein, A. Almgren (September 1999)

No. 56 Wachstum von Kiefern-Ökosystemen in Abhängigkeit von Klima und Stoffeintrag - Eine regionale Fallstudie auf Landschaftsebene
M. Erhard (Dezember 1999)

No. 57 Response of a River Catchment to Climatic Change: Application of Expanded Downscaling to Northern Germany
D.-I. Müller-Wohlfeil, G. Bürger, W. Lahmer (Januar 2000)

No. 58 Der "Index of Sustainable Economic Welfare" und die Neuen Bundesländer in der Übergangsphase
V. Wenzel, N. Herrmann (Februar 2000)

No. 59 Weather Impacts on Natural, Social and Economic Systems (WISE, ENV4-CT97-0448) German report
M. Flechsig, K. Gerlinger, N. Herrmann, R. J. T. Klein, M. Schneider, H. Sterr, H.-J. Schellnhuber (Mai 2000)

No. 60 The Need for De-Aliasing in a Chebyshev Pseudo-Spectral Method
M. Uhlmann (Juni 2000)

No. 61 National and Regional Climate Change Impact Assessments in the Forestry Sector - Workshop Summary and Abstracts of Oral and Poster Presentations
M. Lindner (ed.) (Juli 2000)

No. 62 Bewertung ausgewählter Waldfunktionen unter Klimaänderung in Brandenburg
A. Wenzel (August 2000)

No. 63 Eine Methode zur Validierung von Klimamodellen für die Klimawirkungsforschung hinsichtlich der Wiedergabe extremer Ereignisse
U. Böhm (September 2000)

No. 64 Die Wirkung von erhöhten atmosphärischen CO_2-Konzentrationen auf die Transpiration eines Weizenbestandes unter Berücksichtigung von Wasser- und Stickstofflimitierung
S. Grossman-Clarke (September 2000)

No. 65 European Conference on Advances in Flood Research, Proceedings, (Vol. 1 - Vol. 2)
A. Bronstert, Ch. Bismuth, L. Menzel (eds.) (November 2000)

No. 66 The Rising Tide of Green Unilateralism in World Trade Law - Options for Reconciling the Emerging North-South Conflict
F. Biermann (Dezember 2000)

No. 67 Coupling Distributed Fortran Applications Using C++ Wrappers and the CORBA Sequence Type
Th. Slawig (Dezember 2000)

No. 68 A Parallel Algorithm for the Discrete Orthogonal Wavelet Transform
M. Uhlmann (Dezember 2000)

No. 69 SWIM (Soil and Water Integrated Model), User Manual
V. Krysanova, F. Wechsung, J. Arnold, R. Srinivasan, J. Williams (Dezember 2000)

No. 70 Stakeholder Successes in Global Environmental Management, Report of Workshop, Potsdam, 8 December 2000
M. Welp (ed.) (April 2001)

No. 71 GIS-gestützte Analyse globaler Muster anthropogener Waldschädigung - Eine sektorale Anwendung des Syndromkonzepts
M. Cassel-Gintz (Juni 2001)

No. 72 Wavelets Based on Legendre Polynomials
J. Fröhlich, M. Uhlmann (Juli 2001)

No. 73 Der Einfluß der Landnutzung auf Verdunstung und Grundwasserneubildung - Modellierungen und Folgerungen für das Einzugsgebiet des Glan
D. Reichert (Juli 2001)

No. 74 Weltumweltpolitik - Global Change als Herausforderung für die deutsche Politikwissenschaft
F. Biermann, K. Dingwerth (Dezember 2001)

No. 75 Angewandte Statistik - PIK-Weiterbildungsseminar 2000/2001
F.-W. Gerstengarbe (Hrsg.) (März 2002)

No. 76 Zur Klimatologie der Station Jena
B. Orlowsky (September 2002)

No. 77 Large-Scale Hydrological Modelling in the Semi-Arid North-East of Brazil
A. Güntner (September 2002)

No. 78 Phenology in Germany in the 20th Century: Methods, Analyses and Models
J. Schaber (November 2002)

No. 79 Modelling of Global Vegetation Diversity Pattern
I. Venevskaia, S. Venevsky (Dezember 2002)

No. 80 Proceedings of the 2001 Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change “Global Environmental Change and the Nation State”
F. Biermann, R. Brohm, K. Dingwerth (eds.) (Dezember 2002)

No. 81 POTSDAM - A Set of Atmosphere Statistical-Dynamical Models: Theoretical Background
V. Petoukhov, A. Ganopolski, M. Claussen (März 2003)

No. 82 Simulation der Siedlungsflächenentwicklung als Teil des Globalen Wandels und ihr Einfluß auf den Wasserhaushalt im Großraum Berlin
B. Ströbl, V. Wenzel, B. Pfützner (April 2003)

No. 83 Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven
F.-W. Gerstengarbe, F. Badeck, F. Hattermann, V. Krysanova, W. Lahmer, P. Lasch, M. Stock, F. Suckow, F. Wechsung, P. C. Werner (Juni 2003)