

Texte

**06**  
**06**

ISSN  
0722-186X

**UBA-Workshop:**

**Klimaänderungen -  
Herausforderungen für den  
Bodenschutz**

**am 28. und 29. September 2005**

**Umwelt  
Bundes  
Amt**



**Für Mensch und Umwelt**



**UBA-Workshop:**

**Klimaänderungen –  
Herausforderungen für  
den Bodenschutz**

**am 28. und 29. September 2005**

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter  
<http://www.umweltbundesamt.de>  
verfügbar.

Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten  
und Meinungen müssen nicht mit denen des  
Herausgebers übereinstimmen.

**Herausgeber:** Umweltbundesamt  
Postfach 14 06  
06813 Dessau  
Tel.: 0340/2103-0  
Telefax: 0340/2103 2285  
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

**Redaktion:** Fachgebiet II 4.2  
Jeannette Mathews  
Stephan Marahrens  
Simone Schmidt

Dessau, Februar 2006

## Vorwort

Aus Sicht des Umweltbundesamtes muss der Blick für bestehende und künftige Risiken der regionalen Klimaentwicklung weiter geschärft werden. Wir dürfen unsere Anstrengungen nicht nur darauf konzentrieren, unsere Treibhausgasemissionen zu reduzieren und das Ausmaß des Klimawandels wirkungsvoll zu begrenzen. Dringend erforderlich ist eine nationale Anpassungsstrategie, um die aus dem Klimawandel resultierenden Schäden wirkungsvoll und nachhaltig zu mindern.

Deutschland geht mit der Ratifizierung der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) eine völkerrechtliche Verpflichtung ein, Maßnahmenprogramme umzusetzen, die eine systematische Anpassung an zu erwartende Klimaänderungen und deren Folgen ermöglichen. Mit dem am 13. Juli 2005 vom Bundeskabinett verabschiedeten Nationalen Klimaschutzprogramm greift die Bundesregierung diese Herausforderungen auf und stellt die Weichen, um das anspruchsvolle Klimaschutzziel Deutschlands zu erreichen. Das Programm verweist auf den bestehenden Handlungsbedarf und beschließt die Entwicklung und Umsetzung erforderlicher Konzepte zur Anpassung an Klimaänderungen in Deutschland.

Auf Grundlage der vorliegenden Klimaprognosen ergeben sich für den Bodenschutz neue Herausforderungen für eine nachhaltige Ressourcennutzung und für die Erarbeitung und Umsetzung geeigneter Maßnahmen- und Anpassungsstrategien. Im Hinblick auf die zu erwartenden Veränderungen des Niederschlags- und Verdunstungsregimes muss beispielsweise mit Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt und den oberirdischen Abfluss gerechnet werden. Gebraucht werden Strategien und Maßnahmen welche die negativen Wirkungen der Klimaänderungen auf die Ressource Boden so gering wie möglich halten. Für landwirtschaftlich genutzte Flächen sind eine geeignete Sortenwahl, technische Maßnahmen wie Bewässerung und Drainage, die bodenschonende und standortangepasste Bewirtschaftung mögliche Schritte, diesen Veränderungen Rechnung zu tragen.

Weiterhin gilt es die Rolle des Bodens, als wesentliche Einflussgröße auf das Klimageschehen, stärker in die Öffentlichkeit zu transportieren und in der zukünftigen Klimadiskussion bewusst zu machen.

Vor diesem Hintergrund hat die Abteilung Boden des Umweltbundesamtes für den 28. -29. September 2005 zum Workshop: „Klimaänderungen- Herausforderungen für den Bodenschutz“ eingeladen.

Im Mittelpunkt der zweitägigen Veranstaltung stand der Boden als Nutzungs- und Bewirtschaftungssystem. Durch die Erarbeitung und Diskussion fachlicher Grundlagen wurde die Bedeutung des Bodens für die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung nicht nur unterstrichen, sondern mit aktuellen Forschungsergebnissen fachlich untermauert. Darüber hinaus standen eine Sachstandserhebung zu Auswirkungen der Klimaänderungen auf den Boden, sowie die Ableitung konkreter Maßnahmenkonzepte und Handlungsstrategien zur Reduktion und Verlangsamung der Klimaänderung aus Bodenschutzsicht im Vordergrund.

Über 100 Interessenten aus Bundes- und Landesbehörden, Forschungseinrichtungen und Institutionen aus den Bereichen Bodenschutz, Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft nahmen am Workshop teil.

Die Vortragsskripte bzw. Präsentationsfolien haben wir im vorliegenden Band in unkommentierter Form zusammengestellt.

Wir möchten uns an dieser Stelle noch einmal herzlich bei den zahlreichen Referenten für die qualitativ anspruchsvollen Vorträge und den Teilnehmern für eine offene diskussionsfreudige Atmosphäre bedanken.

# UBA Workshop: Klimaänderungen - Herausforderungen für den Bodenschutz

Mittwoch 28. September 2005

## I. Einleitung

Moderation: Herr Dr. V. Franzius

10.00 Uhr Begrüßung und Eröffnung  
Herr Prof. Dr. A. Troge, Präsident des UBA, Dessau

10.40 Uhr Klimaänderungen und Maßnahmen in der Fläche -  
eine Betrachtung im gesellschaftspolitischen Kontext  
Herr Prof. Dr. H.-R. Bork, Ökologie-Zentrum der Christian-  
Albrechts-Universität zu Kiel

11.20 Uhr Kaffeepause

## II. Folgen der prognostizierten Klimaänderungen

Moderation: Herr Dr. F. Glante

11.50 Uhr Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf  
Land-, Forst-, und Wasserwirtschaft, Naturschutz und  
Tourismus in Deutschland  
Herr Dr. F. Badeck, PIK Potsdam

12.10 Uhr Ergebnisse aus dem Vorhaben KLARA  
(Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung) für  
Baden-Württemberg  
Herr W. Franke, LfU Baden-Württemberg

12.30 Uhr Diskussion und Mittagspause

13.50 Uhr Auswirkungen von Klimaänderungen im Land  
Brandenburg auf Wasserhaushalt, Forst- und  
Landwirtschaft  
Herr Dr. W. Lahmer, Berlin

14.10 Uhr Wirkungen des globalen Wandels auf den  
Wasserhaushalt des Spreewaldes  
Herr Dr. O. Dietrich, ZALF, Inst. für Landschaftswasserhaushalt,  
Müncheberg

14.30 Uhr Diskussion

Moderation: Herr Prof. Dr. H. J. Weigel

14.45 Uhr Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die  
Vegetationsentwicklung  
Herr Dr. F.-M. Chmielewski, Humboldt-Universität zu Berlin  
Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Inst. für  
Pflanzenbauwissenschaften

15.05 Uhr Klimafolgenforschung anhand von Pflanzenwurzeln  
Forschungsergebnisse des Forstbotanischen Gartens  
Eberswalde  
Herr Dr. Götze, Frau U. Krakau, Forstbotanischer Garten  
Eberswalde

15.25 Uhr Diskussion

15.40 Uhr AquaTerra: Ein integriertes EU Projekt zum Verhalten  
von Schadstoffen im System Boden-Grundwasser im  
Kontext des Klimawandels  
Herr Prof. Dr. P. Grathwohl, Universität Tübingen, Inst. für  
Geowissenschaften, Mitglied der KBU

16.00 Uhr Quantifizierung des Einflusses von potenziellen  
Klimaänderungen auf die Sickerwasserbildung unter  
land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen durch  
Einsatz von neu entwickelten Lysimetern  
Herr Prof. Dr. Meißner, UFZ Halle Sektion Bodenforschung,  
Falkenberg

16.10 Uhr Diskussion und Kaffeepause

## III. Maßnahmenkonzepte für den Boden

Moderation: Herr Prof. Dr. H.-R. Bork

16.50 Uhr Entwicklung und Erprobung standortangepasster  
Anbausysteme für Sachsen unter besonderer  
Berücksichtigung der Klimaänderung  
Herr Dr. C. Röhrich, Sächsische Landesanstalt für  
Landwirtschaft, Leipzig

17.10 Uhr Klima- und Bodenschutz im Konzept zur Entwicklung  
und Bestandssicherung der Moore in Mecklenburg-  
Vorpommern - erste Sanierungsergebnisse  
Herr Dr. Lenschow, LUNG, Güstrow

17.30 Uhr Diskussion

## Angebote für das Abendprogramm:

18.15 Uhr Bauhausführung

18.30 Uhr Abendspaziergang mit der Türmerin von St. Marien

18.30 Uhr Spaziergang mit Führung durch das Schloss und  
Park Georgium

## Ab:

19.30 Uhr Gemütliches Beisammensein im Teehäuschen

Donnerstag 29. September 2005

Fortsetzung:

## III. Maßnahmenkonzepte für den Boden

Moderation: Herr Prof. Dr. Hans-Rudolf Bork

9.00 Uhr Ergebnisse aus dem EU- Projekt Carbo-Europe zu  
Fragen der standortgerechten Bodennutzung und des  
Klimaschutzes  
Frau Dr. A. Freibauer, Max Planck Institut für Biochemie, Jena

9.20 Uhr Spurenaustausch zwischen der bodennahen  
Atmosphäre und ackerbaulich genutzten Flächen -  
Erfahrungen im Braunschweiger Kohlenstoff-Projekt  
Herr Prof. Dr. H. J. Weigel, Inst. für Agrarökologie, FAL,  
Braunschweig

9.40 Uhr Diskussion

9.55 Uhr Erntemehrgefahrenversicherung als agrarpolitisches  
Instrument  
Frau B. Engelhard, Münchener Rückversicherungs-  
Gesellschaft, Agrar-Versicherung

10.15 Uhr Diskussion und Kaffeepause

## IV. Wie geht es weiter? Strategien und Konzepte zur Zukunftsvorsorge

Moderation: Herr Dr. F. Glante

11.00 Uhr Aktivitäten des Klima-Bündnis europäischer Städte und  
Gemeinden zur Vermeidung von Treibhausgasen und  
zur Anpassung an Klimawandel  
Herr Dr. A. Kress, Klima-Bündnis Alianza del Clima e.V.,  
Frankfurt am Main

11.20 Uhr Klimaschutzprogramm der Bundesregierung  
Herr F. Schafhausen, Frau A. Harnisch, BMU, Berlin

11.40 Uhr Entwicklung von Strategien zur Anpassung an den  
Klimawandel - Herausforderungen und  
Lösungsvorschläge  
Frau P. Mahrenholz, Frau N. Munz, UBA, Dessau

12.00 Uhr Klimawandel - Adaptation und Mitigation im Bereich  
Land- und Forstwirtschaft aus der Sicht des BMVEL  
Herr Dr. C. Bormuth, BMVEL, Bonn

12.20 Uhr Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor  
Klimawirkungen - Fördermaßnahmen des BMBF  
Herr Dr. P. Bergweiler, Herr Dr. G.-H. Klein, Projektträger im  
DLR BMBF, Bonn

12.40 Uhr Podiumsdiskussion zum Abschluss des Workshops

13.30 Uhr Mittagessen und Schluss der Veranstaltung

(Stand: 13.09.2005)

# UBA-Workshop „Klimaänderungen - Herausforderungen für den Bodenschutz“

1. Foliensätze und Vortragsmanuskripte zu folgenden Themen:	Seite
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Klimaänderungen und Maßnahmen in der Fläche – Eine Betrachtung im gesellschaftspolitischen Kontext</li> </ul>	<p>Ökologiezentrum der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Herr Prof. Dr. R. Bork Herr S. Dreibrodt Herr A. Mieth</p> <p style="text-align: right;">1- 11</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Klimafolgen für Baden-Württemberg</li> </ul>	<p>LfU Baden-Württemberg Herr W. Franke</p> <p style="text-align: right;">12- 30</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auswirkungen von Klimaänderungen im Land Brandenburg auf Wasserhaushalt, Forst- und Landwirtschaft</li> </ul>	<p>Berlin Herr Dr. W. Lahmer</p> <p style="text-align: right;">31- 54</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt des Spreewaldes</li> </ul>	<p>ZALF, Institut für Landschaftswasserhaushalt Herr Dr. O. Dietrich</p> <p style="text-align: right;">55- 68</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Vegetationsentwicklung</li> </ul>	<p>Humboldt Universität zu Berlin Institut für Pflanzenbauwissenschaften Herr Dr. F.–M. Chmielewski</p> <p style="text-align: right;">69- 74</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einfluss einer (ehemals stickstoffinduzierten) Vergrasung mit Sandrohr (<i>Calamagrostis epigejos</i>) auf Wurzelmasse, -struktur und –tiefenverteilung von Kiefernfeinwurzeln sowie auf bodenchemische Parameter</li> </ul>	<p>Forstbotanischer Garten der Fachhochschule Eberswalde und Institut für Ökologie der TU Berlin Frau U. Krakau</p> <p style="text-align: right;">75- 82</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Das Eberswalder Wurzellaboratorium im Forstbotanischen Garten der Fachhochschule Eberswalde - Vergangenheit und Zukunft</li> </ul>	<p>Forstbotanischer Garten der Fachhochschule Eberswalde Herr Dr. B. Götz</p> <p style="text-align: right;">83- 89</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ AquaTerra: An Integrated EU Project about the Behavior of Pollutants in the Soil-Groundwater-System in the Context of Climate Change</li> </ul>	<p>Eberhard Karls Universität Tübingen / Zentrum für Angewandte Geowissenschaften (ZAG) Herr J.A.C. Barth Herr T. Gocht Herr Prof. Dr. P. Grathwohl</p> <p style="text-align: right;">91- 96</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Quantifizierung des Einflusses von potenziellen Klimaänderungen auf die Sickerwasserbildung unter land- und forstwirtschaftlichen genutzten Flächen durch Einsatz von neu entwickelten Lysimetern</li> </ul>	<p>UFZ Halle, Sektion Bodenforschung Herr Prof. Dr. R. Meißner</p> <p style="text-align: right;">97-116</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Prüfung standortangepasster Anbausysteme unter Berücksichtigung des Klimawandels</li> </ul>	<p>Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Leipzig Herr Dr. habil C. Röhricht Herr A. Müller Herr A. Schmidt</p> <p style="text-align: right;">117-121</p>

<b>Foliensätze und Vortragsmanuskripte zu folgenden Themen:</b>		<b>Seite</b>
▪ Klima- und Bodenschutz im Konzept der Entwicklung und Bestandssicherung der Moore in Mecklenburg-Vorpommern	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern Herr Dr. U. Lenschow	123-136
▪ Ergebnisse aus dem EU-Projekt CarboEurope zu Fragen der standortgerechten Bodennutzung und des Klimaschutzes	Max Planck Institut für Geochemie, Jena Frau Dr. A. Freibauer Frau M. Schrupf	137-147
▪ Spurenaustausch zwischen der bodennahen Atmosphäre und ackerbaulich genutzten Flächen: Erfahrungen aus dem Braunschweiger Kohlenstoff-Projekt	Institut für Agrarökologie, FAL, Braunschweig Herr Prof. Dr. H. J. Weigel	149-176
▪ Erntemehrgefahrenversicherung als agrarpolitisches Instrument	Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft Frau B. Engelhard	177-180
▪ Aktivitäten des Klima-Bündnis europäischer Städte und Gemeinden zur Vermeidung von Treibhausgasen und zur Anpassung an den Klimawandel	Klima-Bündnis Alianza del Clima e.V.; Frankfurt am Main Herr Dr. A. Kress	181-202
▪ Klimaschutzprogramm der Bundesregierung	BMU, Berlin Frau A. Harnisch Herr F. Schafhausen	203-217
▪ Entwicklung von Strategien zur Anpassung an den Klimawandel – Herausforderungen und Lösungsvorschläge	UBA, Dessau Frau N. Munz Frau P. Mahrenholz	219-222
▪ Klimawandel – Adaption und Mitigation im Bereich Land- und Forstwirtschaft aus Sicht des BMVEL	BMVEL, Bonn Herr Dr. C. Bormuth	223-240
▪ Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen – Fördermaßnahmen des BMBF	Projekträger im DLR BMBF, Bonn Herr Dr. G.- H. Klein Herr Dr. P. Bergweiler	241 -244
<b>2. Zusammenfassung</b>		<b>245-250</b>
<b>3. Teilnehmerverzeichnis</b>		
<b>4. Synopse</b>		

Klimaänderungen und Maßnahmen in der Fläche  
Eine Betrachtung im gesellschaftspolitischen Kontext

Hans-Rudolf Bork, Stefan Dreibrodt und Andreas Mieth

Ökologie-Zentrum der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Olshausenstr. 75, D-24098 Kiel

hrbork@ecology.uni-kiel.de

### **Zusammenfassung**

Die langfristigen quantitativen Wirkungen des Klimas und der Landnutzung auf die Entwicklung und die Zerstörung von Böden sind weitgehend unbekannt. Dargestellt werden hier von den Verfassern untersuchte und quantifizierte Interaktionen zwischen dem Klima, der Landnutzung, der Landschaftsstruktur, der Bodenentwicklung und der Bodenerosion in China, auf der Osterinsel (Chile), auf der Robinson Crusoe Insel (Chile), im Pazifischen Nordwesten der USA, in Deutschland und im nordwestlichen Sibirien (Russland). Vor dem Beginn von Landnutzung trat während des Holozäns in den untersuchten Räumen selbst während extremer Niederschläge keine Bodenerosion auf, da dichte Vegetation die Böden schützte.

Erst die Zerstörung der Vegetation durch unterschiedliche Formen der Landnutzung ermöglichte Bodenerosion. Extreme Witterungsereignisse rissen tiefe Schluchtensysteme an genutzten Standorten ein. Das Schluchtenreißen führte in vielen Gebieten zum Wüstfallen.

Werden die außerordentlich wirksamen, jedoch sehr seltenen Extremereignisse ausgeschlossen, so zeigt sich in allen landwirtschaftlich genutzten Untersuchungsgebieten ein dramatischer Anstieg der Bodenerosionsraten während des 20. Jahrhunderts infolge der veränderten Landschaftsstruktur, der Einführung neuer Feldfrüchte und neuer Fruchtfolgen, neuer Boden verdichtender Agrartechnik und politischer Entscheidungen. Vergleichbare Veränderungen wurden im Norden des westsibirischen Tieflandes als indirekte Folge der Förderung von Erdöl und Erdgas nachgewiesen.

Die Bodenerosion der vergangenen Jahrhunderte und Jahrtausende reduzierte die Bodenfruchtbarkeit an vielen Standorten drastisch. Die heutige Heterogenität der Bodendecke ist ein Resultat der Landnutzung, der Landschaftsstruktur und von seltenen extremen Witterungsereignissen.

### **Stichworte**

Starkniederschläge, Bodenbildung, Bodenerosion, Landnutzung, Landschaftsgeschichte

## **Abstract**

The long term quantitative consequences of climate and human activities on the development and the destruction of soils are widely unknown. The complex long term climate – land use – landscape structure – soil formation – soil erosion interactions were investigated and quantified in China, on Easter Island (Chile), on Robinson Crusoe Island (Chile), in the Pacific Northwest of the USA, Germany, and in the Northwest of Siberia (Russia).

No soil erosion occurred in the areas under investigation during Holocene before the beginning of farming, intensive grazing, and the exploitation of oil or gas. Dense vegetation protected soils and avoided soil erosion.

Only the destruction of the vegetation in different periods and cultures enabled soil erosion. Extreme precipitation events cut in deep gully systems. Intensive gullying resulted in the abandonment of fields.

Excluding the tremendous effects of rare and extreme events soil erosion rates increased dramatically in all investigation areas that were used agriculturally during the 20<sup>th</sup> century as a result of the reallocation of land (increase of field sizes), of the introduction of new crops and new crop sequences, of new equipment techniques, of the exploitation of natural resources and of political decisions.

Soil fertility was reduced dramatically as a result of past soil erosion. The heterogeneous recent soil cover is namely a result of land use and landscape structure and rare extreme weather events.

## **Key words**

Heavy rainfall, soil formation, soil erosion, land use, landscape history, landscape management

## **1. Einführung**

Mit der ersten Veränderung der Vegetation durch Menschen, insbesondere mit der Etablierung von Acker- und Gartenbau, Grünlandwirtschaft, Waldnutzung und schließlich der Forstwirtschaft wurden die Energie-, Wasser- und Stoffhaushalte sowie zumindest das lokale Klima und damit die Prozesse der Bodenbildung und Bodenzerstörung wesentlich modifiziert. Vor der Einführung der Mineraldüngung führte die Entnahme von Stoffen mit der Ernte zu einer Abnahme der Gehalte an organischer Substanz, der Gehalte an Mineralstoffen und somit zu einer auf die Landnutzung rückwirkenden Verarmung der Böden sowie häufig zu einer Beschleunigung der Versauerung. Nur wenigen der von den Verfassern in Mitteleuropa, Nord-, Ost- und Vorderasien, Nordost- und Südafrika, Nord- und Südamerika sowie auf ostpazifischen Inseln untersuchten Kulturen gelang vor dem 19. Jahrhundert eine dauerhaft ausreichende Kompensation der erntebedingten Stoffverluste durch die Zufuhr organischer Materials sowie von Mineralstoffen und damit eine nachhaltige acker- oder gartenbauliche Landnutzung.

## **2. Beispiele für nachhaltige Bodennutzung**

### **2.1 Nachhaltiger Gartenbau der Rapa Nui im Palmwald der Osterinsel (Chile)**

Polynesische Siedler entwickelten auf der heute chilenischen Osterinsel vor mehr als einem Jahrtausend ein Gartenbausystem, das sie in einem dichten Palmenwald praktizierten (Mieth & Bork 2004). Taro, Yams, Zuckerrohr, Bananen und andere Kulturpflanzen wurden von den Polynesiern erfolgreich zwischen den zahlreichen, vor Bodenerosion und Austrocknung schützenden Palmen angebaut. Für die Bodenbearbeitung wurden Pflanzstöcke eingesetzt; eine Beschädigung der Wurzeln der Palmen wurde so verhindert. Pflanzenreste wurden als organischer Dünger in den Boden eingearbeitet. Ein hoher Humusgehalt resultierte in der mehrere Dezimeter tiefen Pflanzschicht, wie Merkmale der Füllungen von Pflanzlöchern eindrucksvoll belegen. Jahrhunderte später beendeten Brandrodungen des Palmenwaldes die nachhaltige Nutzung. Verbrannte Palmstümpfe und durch den Brand fixierte Palmwurzelröhren bezeugen den über mehrere Jahrhunderte praktizierten Rodungsprozess.

### **2.2 Früher nachhaltiger Gartenbau im zentralen Lößplateau Nordchinas**

Im tief zerschnittenen nordchinesischen Lößplateau rodeten die ersten Gartenbauern vor mehr als sieben Tausend Jahren die Vegetation auf den Hängen und auf den Plateauresten. Eine lange Phase intensiven, permanenten Gartenbaus folgte. Die bis zu 1,5 m mächtigen rotbraunen Böden (Cambisole) wurden auf den steilen Hängen flächenhaft abgetragen. Tiefe Schluchten rissen, ausgehend von den schmalen Trockentälern, Hang aufwärts ein. Gartenland ging hier in erheblichem Umfang dauerhaft verloren.

Vor etwa 4750 Jahren gelang Bauern nördlich von Yan'an die erfolgreiche Etablierung eines Boden schützenden, nachhaltigen Gartenbausystems. Untersucht wurde der Riedel Zhongzuimao, auf dem am unteren Rand verkleinerter Felder, von etwa 2750 v. Chr. bis zum Jahr 1958 n. Chr. allmählich eine Ackerterrasse aufwuchs. Oberhalb erodiertes Substrat sedimentierte hier. Als die Terrasse eine Höhe von 1,8 m und eine Breite von 27 m erreicht hatte, wurde sie von einem Starkniederschlag zerrissen. Die entstandene, 1,5 m tiefe und 2 m breite Schlucht wurde von Bauern rasch mit Material – hauptsächlich kalkhaltigem Löß – aus der näheren Umgebung verfüllt. Bald darauf zerschnitten zwei weitere kleine Schluchten die Ackerterrasse. Beide wurden neuerlich schnell von den Bauern verfüllt. In den folgenden viereinhalb Jahrtausenden verhinderten die Flurstruktur und die Boden schonende Bewirtschaftung linienhafte Bodenerosion auf dem Zhongzuimao vollkommen – ein außergewöhnlich lang anhaltender Erfolg! Schwache flächenhafte Bodenerosion am kurzen Oberhang ließ die Gartenterrasse auf einer Breite von mehr als 80 m maximal 7 m hoch aufwachsen.

Erst eine politisch erzwungene Veränderung der Feldfrüchte, der Fruchtfolgen und der Organisationsstrukturen im Rahmen der Kampagne des „Großen Sprungs nach Vorne“ beendete im Jahr 1958 n. Chr. den nachhaltigen Gartenbau. Um mehr als das Dreißigfache stiegen dadurch die Bodenerosionsraten am Zhongzuimao (Bork & Li 2002).

## **3. Beispiele für nicht nachhaltige Landnutzung und ihre Wirkungen auf die Böden**

### 3.1 Wirkungen von Weidewirtschaft, Garten- und Ackerbau sowie Holzwirtschaft

Erosionssensitive, nicht nachhaltig genutzte Standorte erfuhren besonders starke Veränderungen durch die Etablierung nicht angepasster Landnutzungssysteme.

#### 3.1.1 Die Altmoränenlandschaften im Westen Schleswig-Holsteins

Aufschlüsse in der Dithmarscher Geest im Westen Schleswig-Holsteins belegen häufige und gravierende, auf Nährstoffmangel zurückzuführende Veränderungen der Landnutzung. Der erste Ackerbau endete südlich von Albersdorf im Neolithikum rasch. Einige Starkniederschläge erodierten und transportierten den nährstoffreichen, humosen Pflughorizont auf die Unterhänge und in die kleinen Talauen. Durch die Entfernung der Feldfrüchte bedingte Stoffverluste, die aufgrund fehlender Kenntnis zum Nährstoffkreislauf nicht kompensiert werden konnten, trugen ebenfalls zur Aufgabe des Ackerbaus bei. Auf den Ackerbau folgte eine Phase intensiver Beweidung. Die tonarmen und sandreichen Substrate versauerten in der niederschlagsreichen Region im Verlauf nur wenige Jahrhunderte während intensiver Beweidung derart stark, dass ein Podsol unter Heidevegetation entstand. Dieser Nutzungswandel und die resultierende Bodendegradierung wiederholten sich jeweils während Bronze- und Eisenzeit (Reiß & Bork 2005).

#### 3.1.2 Die Lößlandschaft des Palouse im Pazifischen Nordwesten der USA

Europäischstämmige Einwanderer rodeten – in Unkenntnis der Witterungsextreme (insbesondere der Winterkälte, der Häufigkeit, Intensität und Wirksamkeit von Starkniederschlägen sowie der Wirkungen von Schneeschmelzen) – im Verlauf der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts in der Lößlandschaft des Palouse im Südosten des Staates Washington erstmals Langgrassteppen und Wälder. Trotz der Anspannung zahlreicher Zugtiere vor Pflüge und Erntemaschinen blieb die ackerbauliche Nutzung auf die Auen und die schwach geneigten Unterhänge der fruchtbaren, hügeligen Lößlandschaft beschränkt. Geringe Bodenerosionsraten resultierten auf den Äckern. Die Einführung von Zugmaschinen ermöglichte dann in den 1930-er Jahren die ackerbauliche Nutzung auch sehr steiler Hänge. In einer zweijährigen Fruchtfolge wird seitdem im Wechsel mit einjähriger Schwarzbrache hauptsächlich Sommerweizen angebaut. Reißt ein sommerlicher Starkniederschlag auf den Hängen Erosionsrillen ein, ist der Farmer gezwungen, baldmöglichst zu pflügen oder zu grubbern, um das Einschneiden tiefer Schluchten in den kleinen Rillen während des nächsten Starkniederschlags zu verhindern. So werden nicht nur durch Starkniederschläge Bodenpartikel fortgeführt (auf manchen Hängen werden durch Oberflächenabfluss mehr als 100 Tonnen Boden pro Hektar und Jahr erodiert), auch die Bodenbearbeitung transportiert in erheblichem Umfang Bodenpartikel Hang abwärts. In sieben Jahrzehnten wurden manche Standorte viele Hundert Mal gepflügt. Auf den Kuppen wurden die fruchtbaren degradierten Schwarzerden dadurch nicht selten vollständig fortgepflügt (Geldmacher 2002). Kalkhaltiger Löß steht dann dort an. Wassererosion entfernte auf den steilen Mittelhängen den Boden teilweise; auf den Unterhängen liegen Kolluvien. Sieben Jahrzehnte intensiven Ackerbaus haben damit eine homogene fruchtbare Bodendecke in einen heterogenen Flickenteppich aus kalkhaltigem Löß mit geringem Wasserhaltevermögen, aus unterschiedlich mächtigen Relikten degradiertes Schwarzerde und aus Kolluvien verwandelt. Der Ackerbau ist erschwert,

die Erträge sind reduziert. Einige Standorte haben im Palouse seit den 1930-er Jahren die dort geringmächtige Lößdecke vollkommen verloren. Basalte stehen jetzt an diesen wüst gefallen Standorten an.

### 3.1.3 Im Süden Sichuans (Südwestchina)

Das Volk der Yi nutzte Bergwälder im Süden von Sichuan – von wenigen, durch Konflikte mit den Han ausgelöste Ausnahmen im späten 19. Jahrhundert abgesehen – bis in das Jahr 1958 n. Chr. nachhaltig. In jenem Jahr bewirkte der Energiebedarf durch den „Großen Sprung nach Vorne“ ausgedehnte Rodungen. Aufforstungsversuche durch das Abwerfen von Kiefern Samen aus Flugzeugen schlugen noch 1958 fehl. Im Untersuchungsgebiet Xixi im Südwesten Sichuans wurden die Rodungsflächen zunächst als Weide- und ab 1965 als Ackerland genutzt. Die Yi legten ohne die notwendigen technischen Kenntnisse Ackerterrassen an. Dadurch wurde linienhafte Bodenerosion entscheidend gefördert. Bodenerosionsraten von mehr als 300 Tonnen pro Hektar und Jahr traten auf. Das Ackerterrassensystem wurde zerschlachtet. Im Jahr 1985 wurde das Gebiet mit Kiefern aufgeforstet. Seitdem ist die Bodenerosion unbedeutend.

### 3.1.4 Der Archipel Juan Fernández (Chile)

Auf der im östlichen Pazifik im Archipel Juan Fernández gelegenen, heute chilenischen Robinson Crusoe Insel setzten aus Spanien stammende Siedler im Jahr 1591 Ziegen aus, die sich im 16. und 17. Jahrhundert massenhaft vermehrten. Die Entnahme wertvoller Hölzer (z. B. des Sandelholzes *Santalum fernandezianum*) veränderte die Vegetation der kaum 50 km<sup>2</sup> kleinen Insel vor allem im 18. und 19. Jahrhundert weiter. Anlässlich der Eröffnung des Nationalparks im Jahr 1936 ausgesetzte Kaninchen vermehrten sich drastisch. Die unkontrollierte Holzentnahme, Brände, die Ziegen- und Kaninchenplagen vernichteten die küstennahen Wälder vollständig. Bodenerosion setzte ein. Hauptsächlich im 20. Jahrhundert wurden die Böden flächenhaft auf den Unterhängen erodiert und in den Pazifik gespült. Eine Wiederbesiedlung der Erosionsflächen mit Vegetation ist aufgrund der geringen Infiltrationskapazität der exponierten Gesteine und der häufigen, Oberflächenabfluss erzeugenden Starkniederschläge nicht absehbar.

## 3.2 Wirkungen von Erschließungsmaßnahmen

### 3.2.1 Erdöl- und Erdgasförderregion Ugra im Nordwesten Sibiriens (Russland)

Die kleinen Völker der Khanten, Mansen, Yamalen und Nensen nutzten den Norden der Westsibirischen Tiefebene bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts als Jäger, Sammler, Fischer und Rentierhalter nachhaltig. Gelegentliche Brände veränderten die Vegetation der Tundra und der Taiga. Jedoch entstand nur sehr selten und nur an wenigen Standorten Feststoff verlagernder Oberflächenabfluss.

In den 1950-er Jahren wurden Erdöl und Erdgas in Nordwest-Sibirien entdeckt. Die Zahl der Förderstandorte und die Länge von Bahnstrecken und Straßen nehmen seitdem beständig zu. Straßen und Bahnlinien werden über mehrere Meter hohe

Sanddämme geführt; Siedlungen und Förderstandorte erhalten mächtige Fundamente aus Sand – um die Bodenbewegungen durch Tau- und Gefrierprozesse zu mindern. Die Gewinnung der riesigen benötigten Sandmengen hat inzwischen begonnen, Tundra und Taiga nachhaltig zu verändern.

Östlich Khanty-Mansiysk wird der Sand im Sommer mit Schwimmbaggern am Rand kleiner Flüsse durch Abpumpen gewonnen. Das Fließverhalten der Flüsse ändert sich an den Sandentnahmestandorten und unterhalb; Seiten- und Sohlenerosion wird verstärkt. Der auf verdichteten, betonierten oder asphaltierten Oberflächen während der Schneeschmelzen oder der sommerlichen Starkniederschläge auftretende Oberflächenabfluss spült Sand von den Straßenböschungen in die Auen auf die dortigen Niedermoore. Im Verlauf der erst ein halbes Jahrhundert währenden Phase der Erdölförderung entstanden in den Auen bis zu 5 m hohe Flussterrassen – ein Prozess, der hier an kleinen Flüssen erstmals im Holozän auftritt.

In der Tundra mit dem nur wenige Dezimeter auftauenden Dauerfrostboden werden in Straßennähe anstehende Sande durch flaches Abschieben entnommen – gelegentlich auf einzelnen Flächen, die mehrere Quadratkilometer einnehmen. Die Vegetation der Tundra mit ihrer dichten, den Boden (außer an den wenigen stärker geneigten Hangstandorten mit Solifluktion) vor Verlagerung vorzüglich schützenden Decke aus Flechten, Moosen, Kräutern, niedrigen Sträuchern und Bäumen wird zerstört. Starke Winde transportieren im Sommer Sandkörner von den Entnahmeflächen in die Umgebung. Eine Sandschicht überzieht flächenhaft die dortigen Nieder- und Hochmoore. Dünen entstehen und wandern über Tundra und durch die nördliche Taiga.

Zwar haben die Förderung von Erdöl und Erdgas sowie der resultierende Bau von Straßen, Bahntrassen und Siedlungen erst einen geringen Teil des Nordens der Westsibirischen Tieflandes direkt verändert. Jedoch wurden erstmals im Holozän Prozesse initiiert, die in den kommenden Jahrzehnten und Jahrhunderten aktiv und sichtbar bleiben und ausgedehnte Gebiete indirekt über den Transport von Partikeln erfassen werden. Tundra und Taiga erfahren hier eine von den Gas- und Ölverbrauchern in Europa kaum wahrgenommene dramatische Veränderung.

### 3.2.2 Späte Landnahme auf Floreana (Galápagos, Ekuador)

Auf der kleinen Insel Floreana verhinderten geringe Hangneigungen, ein hohes Wasseraufnahmevermögen der Substrate und eine dichte Vegetation bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts gravierende Oberflächenabflussbildung und Bodenerosion, obwohl im drei- bis zehnjährigem Rhythmus mit den El Niño-Ereignissen immer wieder extreme Starkniederschläge auftraten. Diese vermochten jedoch auf den durchlässigen Substraten in den vergangenen Jahrhunderten stets vollkommen zu versickern. Auch die Nutzung eines kleinen Areals im Hochland der Insel durch eine 1932 eingewanderte deutsche Familie änderte an dieser Situation zunächst nichts. Erst der Umzug der Siedler vom Hochland an die Westküste in den frühen 1950-er Jahren bewirkte die schneisenartige Zerstörung der Vegetation durch Anlage eines Verbindungsweges und die flächenhafte Zerstörung der Vegetation durch Hausbau und Brände in Küstennähe. Seitdem wirkt der in Gefällsrichtung vom Hochland zur Westküste führende Weg als Abflussbahn. Der Abfluss verlässt den verdichteten Weg und reißt tiefe Rillen in die lockere Tephra. Thor Heyerdahl beobachtete hier im El Niño-Jahr 1953 die lokal starke linienhafte Bodenerosion. Im El Niño-Sommer 1982/3 schnitten

sich erneut Rillen ein. Die unsachgemäße Anlage von Weg und Siedlung beendete die jungholozäne geomorphodynamische Stabilitätsphase. (Bork & Mieth 2005)

#### **4. Kombinationswirkungen intensiver Landnutzung und seltener extremer Witterungsereignisse**

##### 4.1 Der Norden Zentraloregons im Pazifischen Nordwesten der USA

In der Umgebung von Monument, im Norden Zentraloregons, begannen Ackerbau und intensive Beweidung durch europäischstämmige Siedler in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Die nachhaltige Nutzung der erosions sensitiven Region durch indigene amerikanische Völker endete abrupt.

Bis in das frühe 20. Jahrhundert wurden auf einigen ackerbaulich genutzten Hängen die geringmächtigen fruchtbaren, wasserdurchlässigen Böden nahezu vollständig flächenhaft erodiert und als Kolluvien auf den Unterhängen sowie als Auensedimente in kleinen Auen abgelagert. Gesteine mit geringer Wasserdurchlässigkeit gelangten auf den Hängen an die Oberfläche. Seitdem tragen diese Standorte bereits während mäßig starker Niederschläge zur Abflussbildung bei. Häufigkeit und Intensität der Hochwasser in den größeren Vorflutern wuchsen.

Wenige Starkniederschläge sorgten in den 1920-er Jahren im Einzugsgebiet des East Fork Cottonwood Creek bei Monument für extrem hohen Oberflächenabfluss auf den vegetations- und bodenfreien Standorten und für das Einreißen bis zu 15 m tiefer Schluchtsysteme zuerst an den Tiefenlinien und bald darauf auf den Unterhängen (Geldmacher 2002). Gleichzeitig wurden an weiteren Standorten landwirtschaftlich nutzbare und genutzte Böden flächenhaft erodiert. Der Ackerbau endete in dieser kurzen und verheerenden Starkniederschlags- und Bodenerosionsphase. Die Intensität der Beweidung wurde reduziert.

Da die häufige Abflussbildung auf den nunmehr exponierten, wenig durchlässigen Substraten bis heute anhält, werden eine Wiederbesiedlung durch Pflanzen und die Bildung wieder landwirtschaftlich nutzbarer Böden in den kommenden Jahrhunderten oder Jahrtausenden verhindert.

##### 4.2. Deutschland

Das Zusammentreffen von intensiver Landnutzung auf ganzen Hängen und außergewöhnlich extremen Starkniederschlägen hatte auch auf die Böden Deutschlands verheerende Wirkungen. So verursachte der 1000-jährige Niederschlag im Juli des Jahres 1342 vom Rhein bis zur Oder, von der Donau bis zur Eider die bei weitem stärkste Bodenerosion, die ein einzelnes Ereignis während des Holozäns in Mitteleuropa außerhalb der Alpen auslöste. Etwa ein Drittel der kumulierten Bodenerosion der vergangenen eineinhalb Jahrtausende wurde hauptsächlich durch dieses sowie ein weiteres, vorausgegangenes Extremereignis in der ersten Hälfte des 14. Jahrhunderts verursacht (Bork et al. 1998). Zwar sind in Deutschland nur wenige hügelige, mit lehmig-sandigen Substraten bedeckte Landschaften wie der Kraichgau, das Untereichsfeld oder die Hallertau stark erosionsgefährdet. Dennoch wurden im Juli 1342 auch andere, intensiv landwirtschaftlich genutzte Räume verheert. Ausgedehnte Gebiete fielen für Jahrhunderte (z. B. in den Jungmoränenlandschaften Nordost-

Deutschlands) oder gar dauerhaft wüst. So verschwanden in den Mittelgebirgen an vielen Hängen die geringmächtigen fruchtbaren Böden vollständig. Seitdem sind dort wieder verbreitet nur langsam verwitternde Festgesteine exponiert.

Träfe das Tausendjährige Ereignis auf intensiv und einheitlich ackerbaulich oder als Grünland genutzte große Schläge mit starken Hangneigungen in erosionssensitiven Räumen, wie dem nordchinesischen Lößplateau oder dem Palouse im Nordwesten der USA, wären für die Bewohner kaum vorstellbar verheerende Schäden die Folge. Innerhalb weniger Stunden würden tiefe Schluchten einreißen. Flächenhaft würde die fruchtbare Krume viele Zentimeter bis mehrere Dezimeter tief erodiert. Mächtige Kolluvien und Schwemmfächer würden sich auf den Unterhängen entwickeln. In kleinen Auen würde ein mächtiges Schluff reiches Auensediment aufwachsen und die dortigen humosen Böden tief verschütten. Die Boden- und die Reliefheterogenität würden weiter zunehmen, der Gehalt der Substrate an organischer Substanz in Oberflächennähe stark abnehmen. Ausgedehnte Flächen würden dauerhaft aus der agrarischen Landnutzung fallen. Das Extremereignis würde kleine Reservoirs vollständig verfüllen und nicht nur deren Nutzphase als Hochwasserrückhaltebecken oder Bewässerungsbecken schlagartig beenden, sondern damit auch neue Gefährdungen durch nachfolgende schwächere Ereignisse für die Unterlieger schaffen. Flüsse würden ihren oftmals von Dämmen übermäßig stark eingegengten Überflutungsraum verlassen und neue Wege suchen, nicht selten auch in Siedlungen und Industriegebieten. Die volkswirtschaftlichen Schäden würden in Anbetracht der in Auen kumulierten, scheinbar geschützten Werte unvorstellbare Ausmaße erreichen.

## 5. Schlussfolgerungen

Die erste gravierende Veränderung der Boden schützenden Vegetation durch Menschen begann in den untersuchten Räumen zu sehr verschiedenen Zeitpunkten:

- im tief zerschnittenen nordchinesischen Lößplateau durch Beweidung, Garten- oder Ackerbau vor mehr als 7000 Jahren,
- in Mitteleuropa ebenfalls durch Beweidung, Garten- oder Ackerbau bereits während des Neolithikums (in Süddeutschland in einigen Regionen mit fruchtbaren Böden bereits vor mehr als 7000 Jahren, in Norddeutschland vor über 5500 Jahren),
- auf der Osterinsel (Chile) durch Gartenbau vor etwa 1300 Jahren,
- auf der Robinson Crusoe Insel im Jahr 1591 durch die Einführung und spätere Massenvermehrung von Ziegen, im 19. Jahrhundert durch Holzentnahme und im 20. Jahrhundert durch die Einführung von Kaninchen,
- im Pazifischen Nordwesten der USA durch Ackerbau in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts,
- im Süden von Sichuan (China) durch Weidewirtschaft im Jahr 1958 und Ackerbau von 1965 bis 1985,
- auf der Insel Floreana (Galápagos-Archipel) in den 1950-er Jahren durch Vegetationszerstörung aufgrund von Siedlungstätigkeit und der Anlage von Verbindungswegen zwischen dem Hochland und der Westküste und

- im nordwestsibirischen Tiefland (Russland) in den 1980-er Jahren durch die Entnahme und Aufschüttung von Sand im Zusammenhang mit der Rohstoffgewinnung und der dazu erforderlichen Landerschließung.

Lediglich auf der Osterinsel führten bereits die ersten polynesischen Gartenbauern vor etwa 1300 Jahren sofort ein Boden schonendes, nachhaltiges Landnutzungssystem ein. An den übrigen Untersuchungsstandorten bedingte die erste Landnutzung durch Tierhalter, Garten- oder Ackerbauern andersartige Bodenbildungsprozesse; Bodenerosion durch Wind oder Oberflächenabfluss war die Folge. Vor den ersten gravierenden Veränderungen von Vegetation und Böden waren einige der untersuchten Standorte über viele Jahrhunderte oder Jahrtausende extensiv und nachhaltig von Jägern, Sammlern, Fischern oder Tierhaltern genutzt worden (Pazifischer Nordwesten der USA, Nordwesten Sibiriens, südliches Sichuan im Südwesten Chinas, Mitteleuropa), andere waren davor unbesiedelt (Isla Robinson Crusoe).

Mit dem Beginn der dauerhaften Besiedlung von Landschaften veränderten Menschen direkt und indirekt an den von Landnutzung betroffenen Standorten

- das lokale Klima,
- den Energiekreislauf,
- den Wasserkreislauf,
- die Stoffkreisläufe,
- die Prozesse der Bodenbildung,
- Bodeneigenschaften wie die Aggregatstabilität sowie
- die Prozesse der Bodenerosion.

Insbesondere die Böden und das Relief entwickelten und entwickeln sich unter dem Einfluss der Landnutzung völlig andersartig als unter von Menschen nicht oder kaum beeinflussten Bedingungen. In einigen Regionen Chinas, Nordamerikas sowie Mittel- und Westeuropas existieren heute keine Standorte mehr, deren Entwicklung ohne bedeutsame anthropogene Einflüsse und Eingriffe ablief. Kulturböden haben natürliche Böden ersetzt, Kulturlandschaften sind an die Stelle von Naturlandschaften getreten. Außerhalb höherer Gebirgslagen ist in Deutschland kein Hangstandort bekannt, der nicht im Verlauf von Urgeschichte, Mittelalter oder Neuzeit genutzt worden wäre.

Zahlreiche Standorte besitzen eine hohe Sensitivität für eine landnutzungsbedingte Veränderung der Boden bildenden Prozesse und für eine Initiierung von Boden zerstörenden Prozessen.

Besonders erosionssensitiv sind steile, lange, breite und leicht konkave Hangabschnitte mit geringem Wasserspeichervermögen auf der Geländeoberfläche, mit Abfluss konzentrierenden Strukturen und einem geringen Wasseraufnahmevermögen an der Geländeoberfläche und einer geringen Stabilität der oberflächennahen Bodenaggregate.

In einem derartigen, stark sensitiven Landschaftsausschnitt können bereits geringfügige Veränderungen der Vegetation und der Bodeneigenschaften durch den wirt-

schaftenden Menschen zu starken Modifikationen der Boden bildenden Prozesse und zur Bodenzerstörung führen.

In wenig sensiblen Landschaftsausschnitten führen erst gravierende Veränderungen der Vegetation und der Bodeneigenschaften durch den wirtschaftenden Menschen zu signifikanten Modifikationen der Boden bildenden Prozesse und zur Bodenzerstörung. Extrem seltene, z. B. 500-jährige oder 1000-jährige Starkniederschläge vermögen auch auf wenig sensiblen Standorten verheerend zu wirken – wenn ein ausreichender Schutz der Oberfläche durch Vegetation nicht gegeben ist.

Die Prozesse der Wasser- und Winderosion wurden auf vegetationsarmen oder – freien Oberflächen immer durch natürliche Ereignisse ausgelöst: durch Oberflächenabfluss während starker Niederschläge oder plötzlich abschmelzende wasserreiche Schneedecken oder durch hohe Windgeschwindigkeiten. Das Ausmaß der Boden-erosion variierte in den untersuchten, genutzten Gebieten zeitlich und räumlich sehr stark.

In den früh besiedelten Regionen Chinas, z. B. am Zhongzuimao im Lößplateau, wurden die Böden bereits in den ersten Jahrhunderten oder ein bis zwei Jahrtausenden des Garten- und Ackerbaus fast vollständig flächenhaft abgetragen und die Unterhänge zerschluchtet. Erst seitdem prägt kalkhaltiger Löß (wieder) die Oberfläche der Landschaften. Der Gartenbau konnte außerhalb der zerrunsten Unterhänge fortgesetzt werden.

Auch einige mitteleuropäische Standorte verloren schon im Verlauf von Neolithikum, Bronze- oder Eisenzeit vollständig ihre damals oft humusreichen, fruchtbaren Böden (Bork 1983). Zumeist vorübergehende Extensivierungen oder Nutzungsaufgaben waren die Folge. In den Mittelgebirgen wurden geringmächtige Böden im Verlauf von Mittelalter und Neuzeit, zu einem erheblichen Teil im 14. Jahrhundert, auf den Ober- und Mittelhängen häufig vollständig erodiert. Im Norden und im Nordosten Deutschlands erodierten zumindest die Oberböden auf den Mittelhängen. In Löß verkleideten Becken wurden die holozänen Böden vollständig auf vielen steilen Mittel- und Oberhängen abgetragen. Das Schluchtenreißen verheerte Lößlandschaften in Mitteleuropa ebenfalls besonders im 14. und im 18. Jahrhundert. Seltene extreme Witterungsereignisse bedingten den weit überwiegenden Teil dieses Bodenverlustes. Die durch Nutzung ermöglichte holozäne Bodenerosion führte an den meisten untersuchten Standorten zu einer Jahrhunderte oder Jahrtausende währenden Minderung der Bodenfruchtbarkeit.

Grundlegende Veränderungen der Landnutzungssysteme und –intensitäten durch Landnahme, Kolonisierung, Expansion, Technisierung und politische Umbrüche führten im 20. Jahrhundert zu einer Vervielfachung der Bodenerosionsraten:

- auf der Poike Halbinsel im Osten der Osterinsel in den 1930-er Jahren durch eine außergewöhnlich hohe Schafsdichte (bis zu 10.000 Schafe auf einer Fläche von nur 900 ha) und jährliche Brände,
- im Einzugsgebiet von Dwight's Creek im Palouse (Washington, USA) im Jahr 1935 mit dem Ersatz der Zugtiere durch Zugmaschinen, die eine ackerbauliche Nutzung auch steilster Lößhänge ermöglichte,
- im Einzugsgebiet des East Fork Cottonwood Creek (Oregon, USA) im frühen 20. Jahrhundert durch die ackerbauliche Nutzung und die intensive Beweidung erosions-sensibler Standorte mit geringmächtigen Böden,
- auf dem Zhongzuimao (Provinz Shaanxi, China) im Jahr 1958 durch veränderte Feldfrüchte, Fruchtfolgen und Eigentumsverhältnisse,

- im Westen von Floreana durch unsachgemäßen Wegebau und Brände in den frühen 1950-er Jahren,
- bei Xixi (Provinz Sichuan, China) im Jahr 1958 durch Waldrodung und im Jahr 1965 durch die unsachgemäße Anlage von Ackerterrassen und den nachfolgenden Ackerbau,
- in Deutschland in den 1950-er, 1960-er, and 1970-er Jahren durch Flurbereinigung bzw. Kollektivierung sowie
- im Nordwesten Sibiriens in Sandabbau- und Sandverwendungsgebieten vor allem seit den 1980-er Jahren.

Der explosionsartige Anstieg der Bodenerosionsraten in den vergangenen Jahrzehnten in verschiedenen Regionen der Erde hat seine Ursache bislang nicht in häufigeren oder intensiveren Starkniederschlägen, Stürmen oder Schneeschmelzen. Alleine von Menschen geschaffene ungünstige Vegetations- und Landschaftsstrukturen, die unsachgemäße Anlage von Infrastruktur, die Intensivierung der Landwirtschaft, technische Entwicklungen, Modifikationen der politischen und sozialen Gegebenheiten sowie das andersartige Verhalten der Bevölkerung im ländlichen Raum bedingten die Veränderungen der Böden.

## 6. Literatur

Bork, H.-R. (1983): Die holozäne Relief- und Bodenentwicklung in Lößgebieten - Beispiele aus dem südöstlichen Niedersachsen. In: H.-R. Bork & W. Ricken, Bodenerosion, holozäne und pleistozäne Bodenentwicklung, Catena Suppl. 3: 1-93; Braunschweig.

Bork, H.-R., H. Bork, C. Dalchow, B. Faust, H.-P. Piorr & T. Schatz (1998): Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa. Klett-Perthes, Gotha.

Bork, H.-R. & Y. Li (2002): 3200 Reliefentwicklung im Lössplateau Nordchinas – Das Fallbeispiel Zhongzuimao. Peterm. Geogr. Mitt. 146 (2): 80-85.

Bork, H.-R. & A. Mieth (2005): Catastrophe on an enchanted island: Floreana, Galápagos, Ecuador. Rapa Nui Journal 19/1: 25-29. Los Osos (Easter Island Foundation).

Geldmacher, K. (2002): Landschaftsentwicklung und Landnutzungswandel im Pazifischen Nordwesten der USA seit 1850. Dissertation. Mathem.-Naturwiss. Fakultät der Universität Potsdam. 139 S. Potsdam (unveröffentlicht).

Mieth, A. & H.-R. Bork (2004): Easter Island - Rapa Nui. Scientific Pathways to Secrets of the Past. Man and Environment 1. 111 S. Kiel (CAU).

Reiß, S. & H.-R. Bork (2005): Landnutzung, Bodenerosion, Boden- und Reliefentwicklung – Ein Beitrag zur Landschaftsgeschichte in der Umgebung von Albersdorf (Dithmarscher Geest). In: R. Kelm (Hrsg.), Frühe Kulturlandschaften in Europa. Albersdorfer Forschungen zur Archäologie und Umweltgeschichte 3: 68-85. Heide (Boyens).

## Klimafolgen für Baden-Württemberg

### 1. Einleitung

Seit Jahren werden auf vielen politischen Ebenen mögliche Folgen von Klimaänderungen diskutiert. Durch die klimabedingte Änderung der Umweltbedingungen werden auch für Baden-Württemberg ökologische, ökonomische, sozio-ökonomische sowie gesundheitliche Fragen aufgeworfen. Die Auswirkungen von Klimaveränderungen in Deutschland sind nach heutigem Kenntnisstand je nach Lage der einzelnen Regionen (Küsten-, Mittelgebirgs-, Hochgebirgsregion) sehr unterschiedlich einzuschätzen. Dies gilt besonders auch im Hinblick auf regionalklimatische Entwicklungen.

Nach dem derzeitigen Stand der Klimaforschung ist davon auszugehen, dass sich durch den anthropogen verursachten „Treibhauseffekt“ in den nächsten ca. 100 Jahren u.a. die mittlere globale Temperatur um 1,4 bis 5,8°C erhöhen wird. Dies ist eine zentrale Aussage im 3. Bericht des zwischenstaatlichen Sachverständigengremiums „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) vom Januar 2001.

Die aus globalen Klimamodellen abgeleiteten Aussagen zu künftigen Klimaveränderungen beziehen sich bisher im Wesentlichen auf großräumige Gebiete wie z.B. Nordeuropa. Belastbare Angaben über Änderungen des Klimas im regionalen Maßstab lagen bisher für Süddeutschland nicht vor. Sie wurden im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA („Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“) der Länder Baden-Württemberg und Bayern sowie dem Deutschen Wetterdienst erarbeitet. Dabei wurden sowohl bisherige Veränderungen im „Langzeitverhalten“ des Klimas und des Wasserhaushaltes an Hand der Messwerte langer „historischer“ Zeitreihen (70 Jahre und länger) als auch künftige Veränderungen an Hand von Szenarienwerten für die Jahre 2021-2050 untersucht. In dem Projekt KLARA (Klimawandel – Auswirkungen, Risiken, Anpassung) wurde die Anfälligkeit Baden-Württembergs gegenüber einer Klimaänderung für Bereiche wie Land- und Forstwirtschaft, Naturschutz, Gesundheit, Tourismus oder Versicherungswesen untersucht.

### 2. Klimaentwicklung der letzten Jahrzehnte

Die KLIWA-Untersuchungen zum Langzeitverhalten von hydrometeorologischen und hydrologischen Größen an Hand langjähriger Messzeitreihen haben im Einzelnen folgende Ergebnisse erbracht:

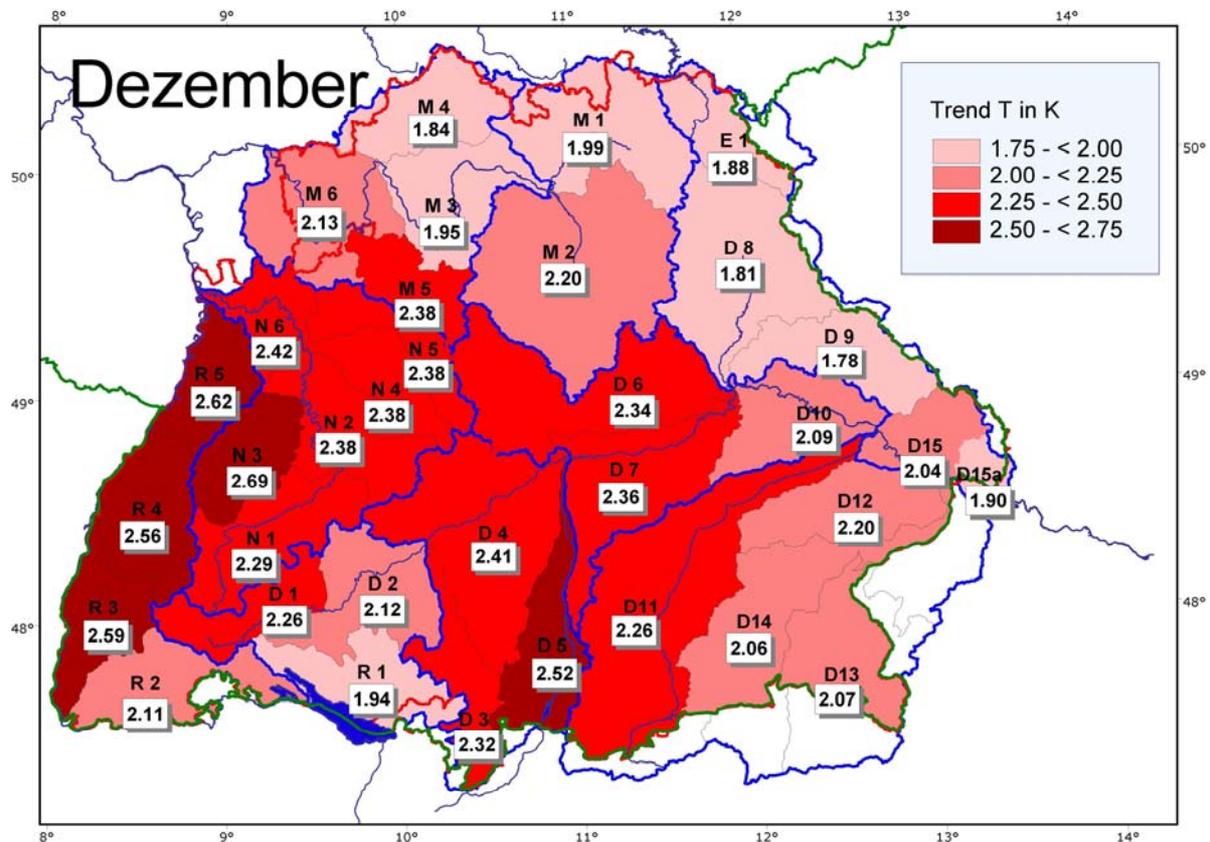
#### Verhalten der Lufttemperatur

- Zunahme der Jahresmitteltemperaturen zwischen 0,5 und 1,2°C
- Anstieg der Monatsmitteltemperaturen im August: zwischen 0,7 und 1,7°C
- Anstieg der Monatsmitteltemperaturen im Dezember zwischen 1,8 und 2,7°C (siehe Bild 1)

Bild1 zeigt die Höhe der Trends der mittleren Lufttemperaturen im Dezember. In der KLIWA-Region N3 (Einzugsgebiet der Enz) beträgt die Temperaturzunahme 2.69 K. Der Untersuchung lag die Jahresreihe 1931-2000 zugrunde.

- Temperaturzunahmen – wenn auch weniger deutlich als im August und Dezember – ergeben sich auch in den Monaten Januar, Februar, März und Oktober.
- Regionalspezifische Besonderheiten: z.B. Schwerpunkt der winterlichen Temperaturzunahmen in den unteren Höhenlagen; stärkere Temperaturzunahmen im Westen von Baden-Württemberg.

**Fazit:** Die mittleren monatlichen Lufttemperaturen haben deutlich zugenommen, vor allem in den 90er Jahren und dabei insbesondere im Winter.

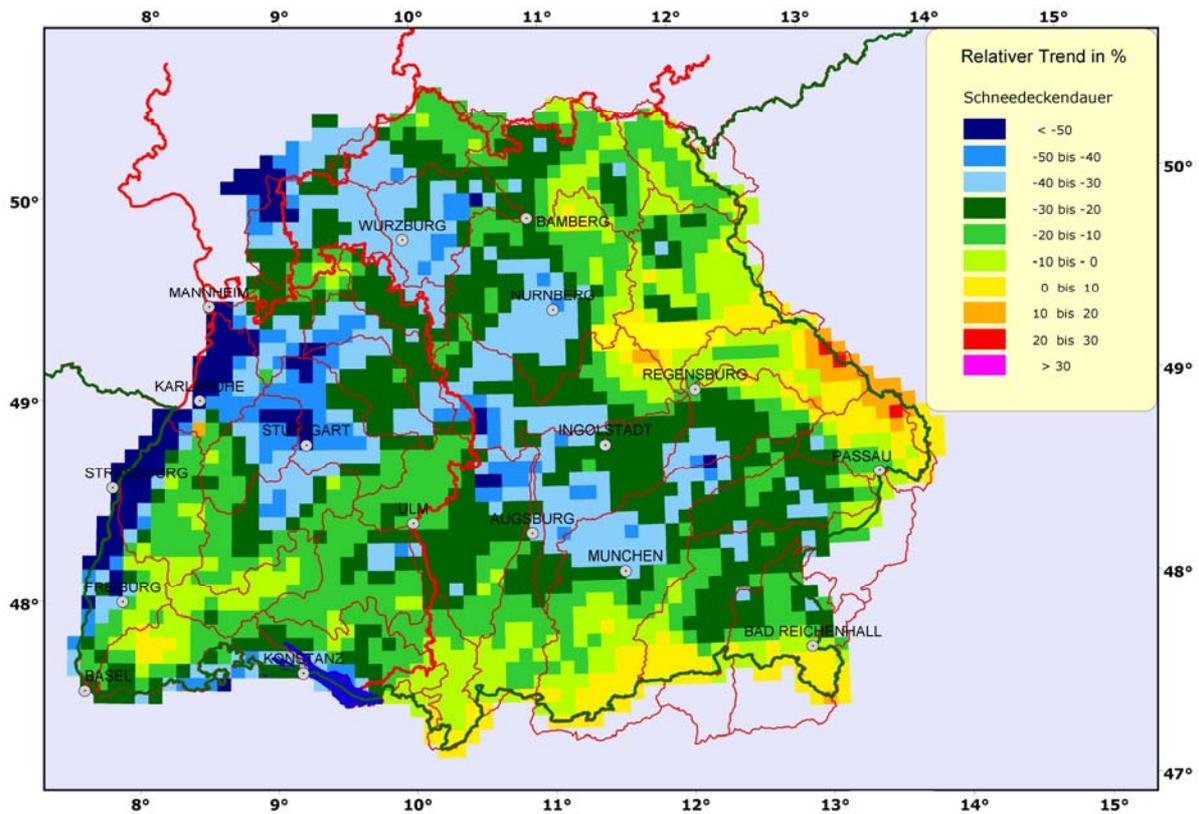


**Bild 1: Trends (in K) der Monatsmitteltemperatur Dezember, Gebietswerte in Baden-Württemberg und Bayern, 1931 bis 2000**

### Verhalten des Schneedeckenregimes

- Rückgang der mittleren Anzahl der Tage mit einer Schneedecke (Schneedeckendauer, siehe Bild 2)
  - um ca. 30 - 40% in tiefer liegenden Gebieten (< ca. 300 m ü. NN),
  - um ca. 10 - 20% in mittleren Höhenlagen (zwischen 300 und 800 m ü. NN),
  - um weniger als 10% in den höher gelegenen Gebieten bzw. teilweise sogar leichte Zunahme in größeren Höhen (> ca. 800 m ü. NN)
- Zunahme der Schneedeckenzeit (Zeitspanne zwischen erstem und letztem Tag eines Winters mit Schneedecke unter Einschluss der schneefreien Tage) in großen Teilen des Untersuchungsgebiets um bis zu 30 Tage

**Fazit:** Die Anzahl der Tage mit Schneedecke hat in tieferen und mittleren Höhenlagen deutlich abgenommen (mildere schneeärmere Winter).



**Bild 2: Relativer Trend der mittleren Anzahl der Tage mit einer Schneedecke (Schneedeckendauer) in Baden-Württemberg und Bayern, 1951/52 bis 1995/96**

#### Verhalten der Gebietsniederschläge

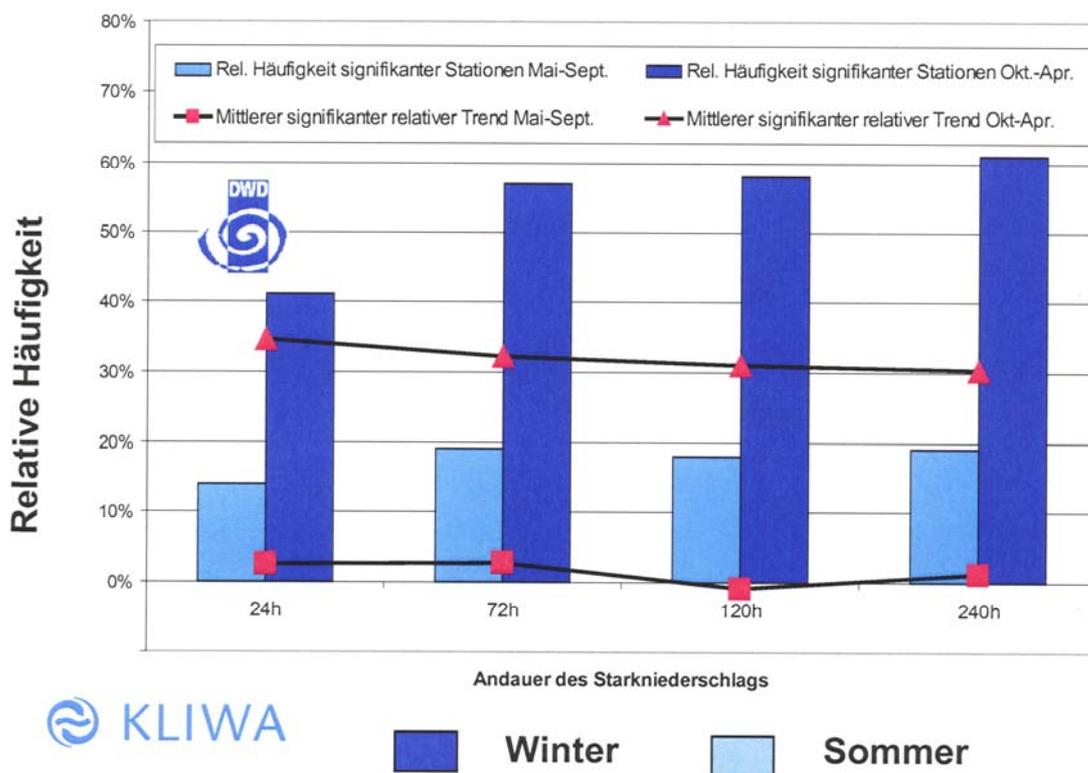
- Geringe Veränderungen der Jahresniederschlagssummen, nur rd. 25% der Gebiete zeigen einen signifikanten Trend
- Deutlich steigende Trends im Frühjahr und Winter, d.h. Umverteilung der Niederschläge im Jahresgang: trockener im Sommer, niederschlagsreicher im Frühjahr und Winter - verursacht insbesondere durch veränderte Wetterlagenhäufigkeit

**Fazit:** Die innerjährliche Niederschlagsverteilung verändert sich bei etwa gleich bleibendem Jahresniederschlag (Winterhalbjahr feuchter, Sommerhalbjahr trockener).

#### Verhalten der Starkniederschläge

- Deutliche Zunahme der Starkniederschläge um 30-35% im Winter; im Sommer dagegen nur geringe bis keine Trendänderungen bei gleichzeitig erheblich reduzierter Anzahl der Stationen mit Trendsignifikanz
- Zunahme der Anzahl der Stationen mit Trendsignifikanz im Winter mit wachsender Dauerstufe (von 1 bis 10 Tagen) der Starkniederschläge (siehe Bild 3)
- Regionale Schwerpunkte für dieses Verhalten u.a. im Schwarzwald und im Nordosten Baden-Württembergs feststellbar

**Fazit:** Die Starkniederschläge haben regional im Winterhalbjahr deutlich zugenommen.



**Bild 3: Häufigkeit (%) von Niederschlagsstationen mit signifikantem Trend ( $S > 90\%$ )**

### Verhalten der Höchstabflüsse

- Bei Betrachtung der letzten 70 bis 150 Jahre weisen die jährlichen Höchstabflüsse und die Höchstabflüsse des Sommer- und Winterhalbjahres beim überwiegenden Teil der Pegel keine signifikanten Veränderungen in der Höhe des Abflusses auf.
- Bei Betrachtung der letzten ca. 30 Jahre zeigen sich bei den Höchstabflüssen für die Mehrzahl der Pegel zunehmende Trends.
- Die Häufigkeit von Winterhochwasser hat in den südlichen Gebieten von BW seit den 70er Jahren zugenommen.
- Die monatlichen Hochwasserabflüsse sind im Winterhalbjahr ab den 70er Jahren höher als in der Zeit davor.

**Fazit:** Die Abflusszeitreihen lassen nur während der letzten 30 bis 40 Jahre regional eine Zunahme bei den Hochwasserabflüssen erkennen.

### Zusammenfassendes Fazit:

Die Untersuchungen zum Langzeitverhalten hydrologischer und hydrometeorologischer Parameter der letzten ca. 100 Jahren zeigen, dass entsprechend des allgemeinen Trends für Mitteleuropa auch in Süddeutschland eine flächendeckende Zunahme der Lufttemperatur stattfand. Die Temperaturzunahme im Winter bedingt eine Abnahme der Schneedeckendauer und eine Änderung im Schneeschmelzverhalten. Gleichzeitig nahm der Niederschlag sowohl im Gebietsmittel als auch in den stationsbezogenen Starkniederschlägen regionalspezifisch im Winter und Frühjahr zu, so dass häufigere und intensivere Niederschläge auftraten. Zusammen mit einem häufigeren Auf- und Abbau der Schneedecke in tieferen und mittleren Höhenlagen wächst das Niederschlagsdargebot (Summe aus Regen und Wasserabgabe aus der Schneedecke) an.

Im Sommer sind die Veränderungen weniger deutlich ausgeprägt; tendenziell zeigen sich trockenere Sommer mit nur einer geringen Zunahme der Lufttemperaturen (Ausnahme: August). Die erwähnten Änderungen der hydrometeorologischen Größen haben Auswirkungen auf das mittlere Verhalten des Gebietswasserhaushalts. Das Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse zeigt jedoch bei der überwiegenden Anzahl der Pegel keine Änderung der Jahreshöchstabflüsse. Lediglich die Häufigkeit kleinerer Hochwasser hat insbesondere im Winterhalbjahr gebietsweise zugenommen.

Die klimatischen Bedingungen in Süddeutschland mit Auswirkungen auf den gesamten Wasserhaushalt haben sich im vergangenen Jahrhundert – insbesondere während der letzten zwei bis drei Jahrzehnte – verändert. Die gefundenen Trends legen den Schluss auf einen Einfluss des Menschen auf das globale und regionale Klima nahe. Wegen der ebenfalls im Langzeitverhalten erkennbaren Änderungen in den zeitlich-statistischen Kennwerten der Zeitreihen, ist eine Aufspaltung in natürliche und menschliche Einflüsse äußerst schwierig.

### **3. Regionale Klimaszenarien bis 2050**

Eine Grundsatzstudie der ETH Zürich zeigte, dass es noch kein optimales Verfahren für die Erstellung regionaler Klimaszenarien gibt. Daher wurden im Rahmen von KLIWA verschiedene Institutionen beauftragt, regionale Klimaszenarien mit drei unterschiedlichen Verfahren („Ensemble-Analyse“) zu erstellen:

- mit einem statistischen Modell (Dr. Gerstengarbe, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK))
- mit einer speziellen statistischen Methode (Dr. Enke, Meteo-Research)
- mit einem regionalen dynamischen Klimamodell (REMO) (Dr. Jacob, Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI))

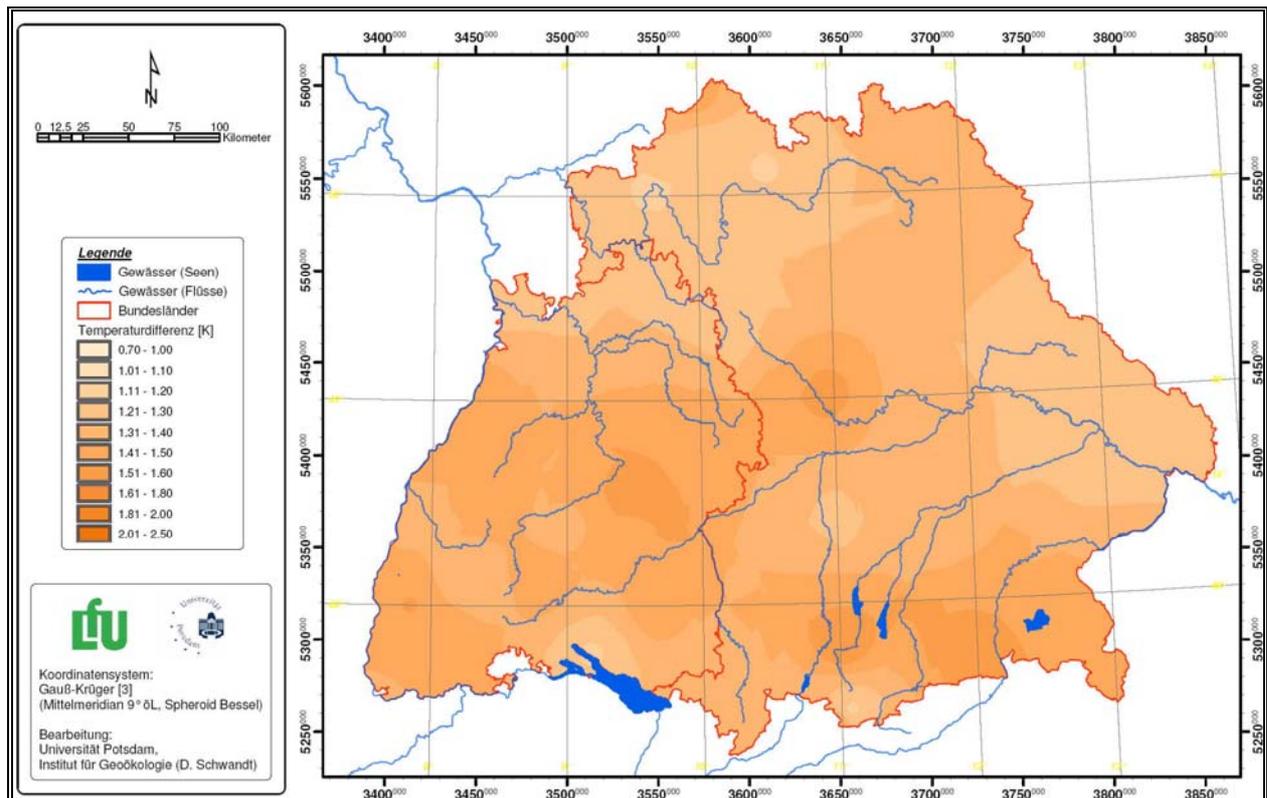
Um vergleichbare Ergebnisse zu bekommen, wurden weitgehend identische Randbedingungen vorgegeben: Messdaten 1951-2000, Verifikationszeitraum 1971-2000, Globalmodell ECHAM 4, IPCC-Emissionsszenario B2, Szenariozeitraum 2021-2050.

Die Ergebnisse aus den drei Verfahren wurden eingehend verglichen und bewertet. Auf der Basis dieser Bewertung wurde beschlossen, den weiteren Auswertungen primär die Ergebnisse der Methode von Meteo-Research zugrunde zu legen.

Die nachfolgenden Aussagen konzentrieren sich auf den Bereich des Landes Baden-Württemberg. Die flächenhaften Darstellungen zeigen wegen der weitgehenden klimatologischen Homogenität das gesamte KLIWA-Gebiet Baden-Württemberg und Bayern.

#### **Lufttemperatur**

Die Lufttemperatur wird in Baden-Württemberg auch in der Zukunft weiter deutlich zunehmen. Im Sommerhalbjahr wird die mittlere Tagestemperatur ca. 15°C betragen, im Winter ca. 4,5°C. Die Zunahmen fallen im hydrologischen Winter mit ca. 2°C stärker aus als im hydrologischen Sommer mit ca. 1,4°C (Bild 4). Der hydrologische Winter dauert von November bis April, der hydrologische Sommer von Mai bis Oktober.



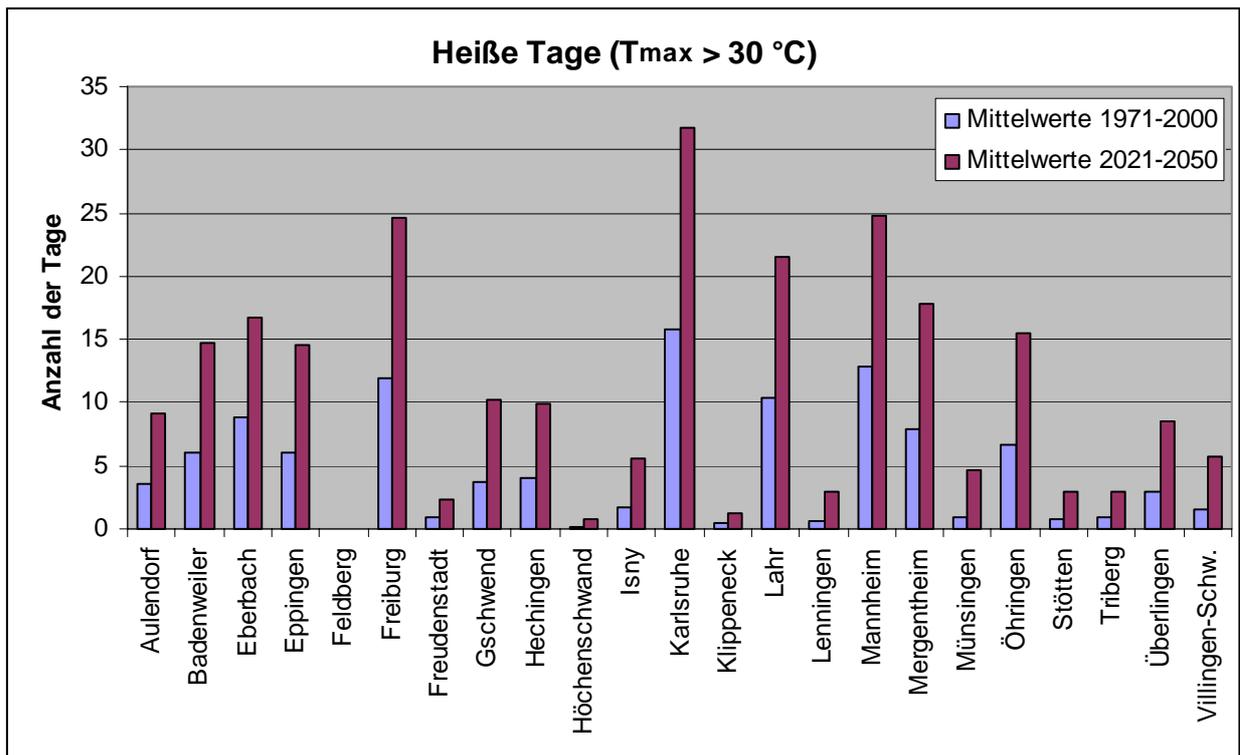
**Bild 4: Änderung der künftigen Lufttemperatur [°C] im Sommer gegenüber heute**

Die Temperaturerhöhung ist auch bei den einzelnen Monaten zu erkennen, und zwar nicht nur bei den mittleren, sondern auch bei den maximalen und minimalen Tagestemperaturen. Sie ist in den Monaten Dezember bis Februar am höchsten.

Die erwartete Temperaturzunahme im Winter ist von besonderer Bedeutung, da die Temperatur großen Einfluss auf die Zwischenspeicherung von Niederschlag als Schnee hat und somit entscheidend für die zukünftig zu erwartenden Abflussverhältnisse sein kann.

### Sommertage und heiße Tage

Die Anzahl der Sommertage (Tage mit  $T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$ ) und der heißen Tage (Tage mit  $T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$ ) wird in Baden-Württemberg deutlich steigen. Dies ist aus Bild 5 ersichtlich; dort ist die Anzahl der heißen Tage an den einzelnen Klimastationen des Landes für die Ist-Zeit (1971-2000) und für die Zukunft (Szenario 2021-2050) dargestellt. Teilweise wird sie um nahezu das Doppelte zunehmen.



**Bild 5: Anzahl der bisherigen und künftigen heißen Tage ( $T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$ ) pro Jahr**

### Frost- und Eistage

Infolge der Klimaerwärmung wird die Zahl der Frosttage (Tage mit  $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ ) und auch die Zahl der Eistage (Tage mit  $T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$ ) wird deutlich abnehmen, letztere größtenteils um mehr als die Hälfte.

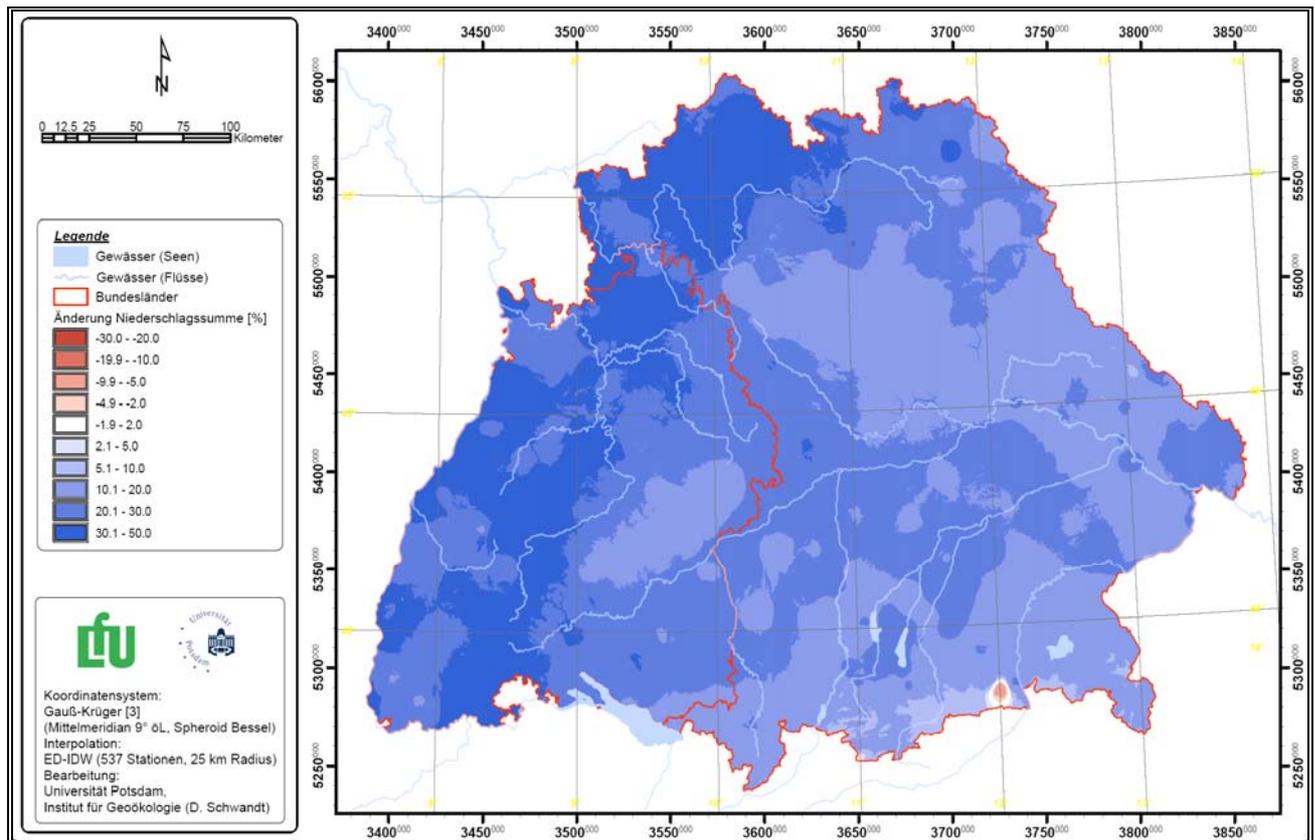
### Spätfröste im Frühjahr

Spätfröste im Frühjahr können je nach Zeitpunkt große Schäden in der Landwirtschaft verursachen. Auf Grund der erwarteten Erwärmung wird der letzte Frost im Frühjahr im Mittel früher auftreten als derzeit, so dass sich für die Landwirtschaft die Gefahr von Frostschäden verringert aber nicht ausgeschlossen ist.

### Niederschlag

Die Niederschläge werden sich im Sommer in Baden-Württemberg wenig verändern (<10%). Die Winterniederschläge jedoch werden deutlich zunehmen. Je nach Region beträgt die unterschiedlich stark ausgeprägte Zunahme bis zu 35% (Bild 6).

Ebenfalls steigen wird die Zahl der Tage mit hohen Niederschlägen (größer 25 mm) im Winter. An der Klimastation Freudenstadt z.B. wird in den Monaten Dezember bis Februar die Zahl der Tage mit  $N > 25$  mm im Mittel um ca. das Doppelte zunehmen.



**Bild 6: Änderung der künftigen Niederschlagssumme [%] im Winter gegenüber heute**

### Trockenperioden

Für die Landwirtschaft ist bedeutsam, dass künftig die Anzahl der Trockenperioden (mindestens 11 aufeinander folgende Tage mit einem Niederschlag von weniger als 1 mm) pro Jahr abnimmt. Ebenso wird die Anzahl der Trockentage (Niederschlag weniger als 1 mm) geringer. Diese Tendenz zur Abnahme wurde für die letzten Jahrzehnte bereits in der Untersuchung des Langzeitverhaltens der Niederschläge festgestellt.

### Wetterlagen

Im Winter werden die Häufigkeit und Dauer der für die Hochwasserbildung bedeutsamen Westwetterlagen, insbesondere die so genannte „Westlage zyklonal (WZ)“, zunehmen. Im Sommer sind keine größeren Änderungen zu erwarten.

**Fazit:** Insgesamt ist bei kritischer Bewertung der Ergebnisse für das Zieljahr 2050 festzuhalten:

- Die Erwärmung geht weiter. Die Lufttemperatur wird insbesondere im Winter weiter zunehmen.
- Die Niederschläge werden im Winterhalbjahr zunehmen.
- Von diesen Veränderungen ist auch der Wasserkreislauf, insbesondere der Abfluss in den Gewässern, betroffen.
- Auch bei der Dauer und Häufigkeit von Westwetterlagen ist im Winter mit einer Zunahme zu rechnen.

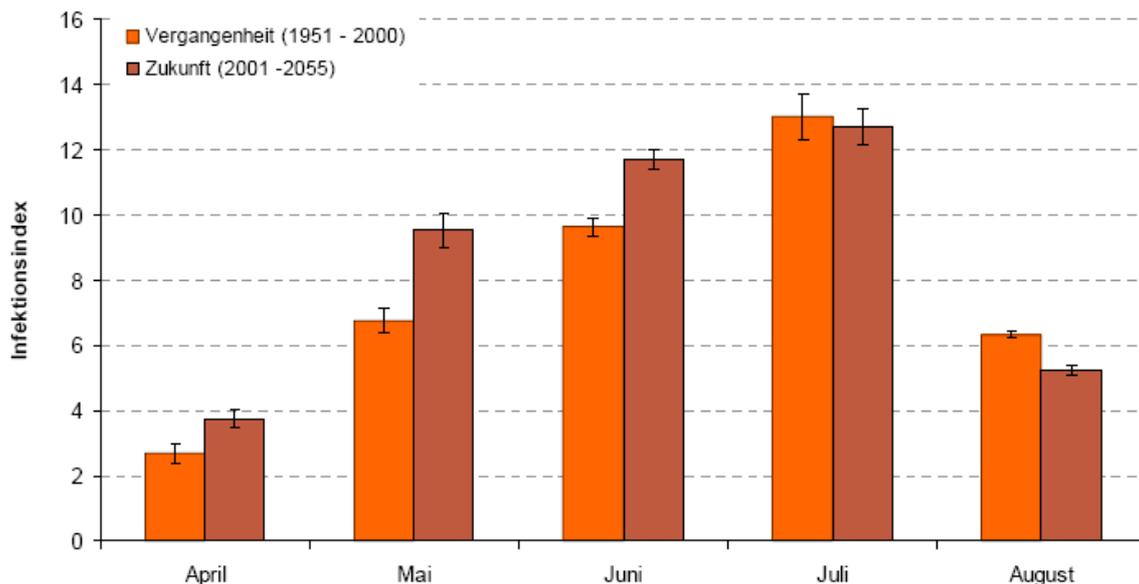
## 4. Auswirkungen des Klimawandels auf

### 4.1 Landwirtschaft

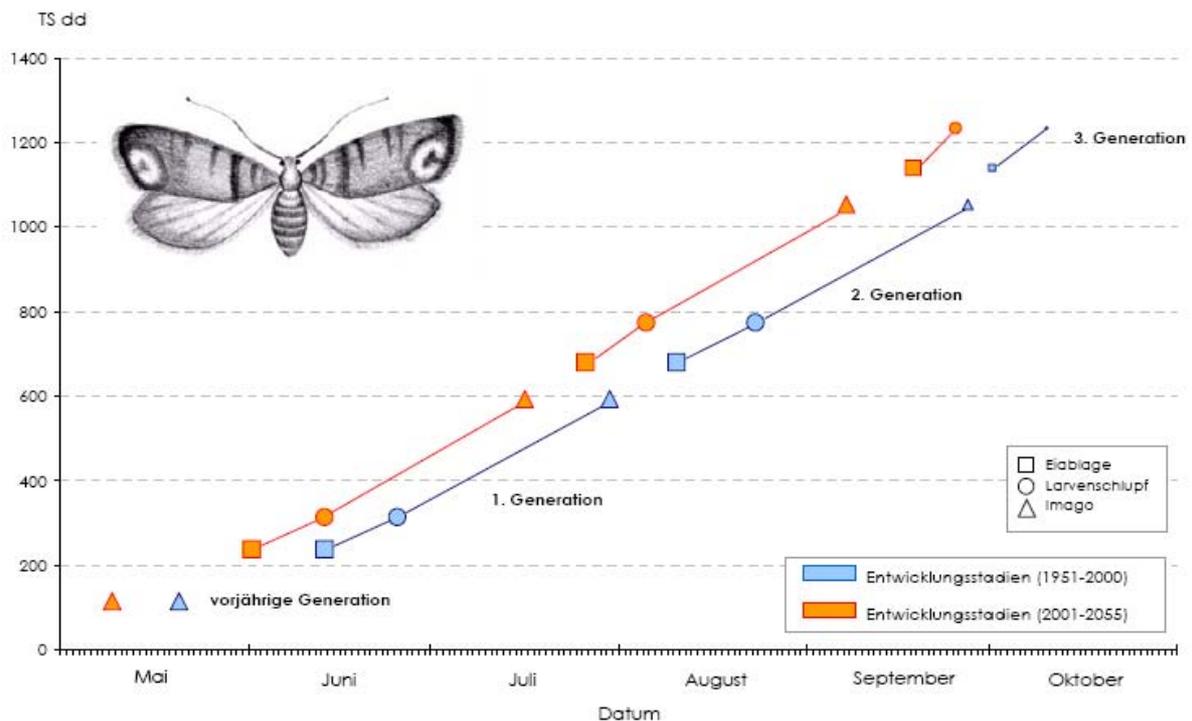
Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft in Baden-Württemberg wurde exemplarisch für die Erträge von Mais und Weizen, die Gefährdung durch Schädlinge im Obstbau sowie die Reifebedingungen im Weinbau untersucht.

Ein wärmeres Klima wird unter den speziellen Bedingungen von Baden-Württemberg bei der postulierten Niederschlagsentwicklung in der Fläche zur Ausdehnung des Maisanbaus führen, da die Voraussetzungen für dessen Anbau sich weiter verbessern. Der in vielen Untersuchungsregionen zunehmende Trockenstress führt demgegenüber beim Weizen wahrscheinlich zu leichten Ertragseinbußen. Die hieraus resultierenden Einnahmeverluste könnten aber durchaus durch bessere Qualitäten in Folge einer verkürzten Kornfüllungsphase ausgeglichen werden.

In der Bodensee Region führt ein wärmeres Klima bei weitgehend gleich bleibender Höhe der Jahresniederschläge zu einem höheren Schaderregerdruck im Apfelanbau, wie am Beispiel des Apfelschorfs und des Apfelwicklers gezeigt werden konnte. Die Infektionsgefährdung durch die Pilzkrankheit Apfelschorf wurde mit Hilfe eines Infektionsindex ermittelt, der unter anderem von der Blattfeuchte abhängt. Bezüglich des Apfelschorfs steigert die Klimaerwärmung das Risiko von Primärinfektionen im Frühjahr (Bild 7). Beim Insektenbefall durch den Apfelwickler wurden die phänologischen Eintrittstermine (Ei, Larve, Imago) mit einem Temperatursummenmodell simuliert. Beim Apfelwickler begünstigen die höheren Temperaturen das häufigere Auftreten von zwei Larvengenerationen pro Jahr (Bild 8). Die im Zusammenhang mit der postulierten Klimaerwärmung simulierten Effekte unterstreichen den Stellenwert der regionalen Schaderregerüberwachung im Obstbau und die Notwendigkeit für die laufende Anpassung integrierter Bekämpfungsstrategien von Apfelwickler und Apfelschorf.



**Bild 7: Mittlere Monatssummen des täglichen Infektionsindex für den Apfelschorf (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung von 4 Bodensee-Stationen) in der rezenten Klimaperiode 1951-2000 und der Szenarienperiode 2001-2055**



**Bild 8: Veränderung der Generationsentwicklung beim Apfelwickler (*C. pomonella*) im Gebiet Bodensee**

Beim Weinbau wurde ein Temperatursummenindex nach Huglin zur Beurteilung der klimatischen Entwicklung benutzt. Der in den 90er Jahren beobachtete Trend zu prinzipiell besseren Anbaubedingungen setzt sich in die Zukunft fort. Dies sollte in den nächsten Jahrzehnten die Bedingungen des Weinbaus und den Charakter der kultivierten und angebauten Weine nachhaltig beeinflussen. Es ist aber zu überlegen, inwieweit der zunehmenden Erwärmung im Weinbaugebiet Baden beim An- und Ausbau traditioneller Sorten durch konservative Maßnahmen (z.B. Züchtung spätreifender Weißweinsorten) Rechnung getragen werden kann. Für das Anbaugebiet Württemberg scheinen die in den nächsten Jahrzehnten zu erwartenden klimatisch bedingten Änderungen eher günstig zu sein, sie lassen die Kultivierung der bisher bevorzugten und einen zunehmenden Anbau anspruchsvollerer Sorten erwarten.

#### 4.2 Forstwirtschaft

Die hier vorgestellten Modellstudien zur Klimasensitivität dienen der Untersuchung einzelner Elemente der potenziellen Auswirkungen des klimatischen Wandels auf die Produktivität der Wälder in Baden-Württemberg. Mit Hilfe des Waldwachstumsmodells 4C wurden Simulationen für hypothetische Waldbestände unterschiedlichen Alters (Buche, Eiche, Fichte, Kiefer) unter den Klimaszenarien durchgeführt. Das untersuchte Zukunftsszenarium hat geringe Auswirkungen auf die Produktivität der untersuchten Waldbestände.

Bedingt durch die auch im Zukunftsszenarium noch relativ hohen Niederschläge ist nicht zu erwarten, dass die Wälder regelmäßig unter Trockenstress geraten. Insgesamt ist die erwartete Produktivität der baden-württembergischen Wälder unter dem hier verwendeten Zukunftsszenarium bis zur Mitte des kommenden Jahrhunderts eher durch leicht positive Trends gekennzeichnet.

Neben Änderungen in Niederschlagsmenge und -saisonalität wirken Temperaturänderungen vermittelt über die Vegetationsperiodenlänge und den Verdunstungsanspruch der Atmosphäre

re auf den Wasserhaushalt. An den beiden untersuchten Intensivmessstellen führen die klimatischen Bedingungen des Extremjahres 2003 ähnlich wie 1997 zu einem Rückgang der Versickerung, ohne dass der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat komplett ausgeschöpft wird. Damit ist die aktuelle Evapotranspiration vom Niederschlagsrückgang nicht beeinflusst.

Eine bisher schon beobachtete Auswirkung der Klimaerwärmung ist das frühere Eintreten phänologischer Phasen im Frühjahr. Unter den humiden klimatischen Bedingungen in Baden-Württemberg kann eine vollständige Umsetzung des Potenzials höherer Produktivität infolge früheren Blattaustriebs erwartet werden. Die Jahresproduktion steigt pro Tag früheren Austriebs um 0.5 bis 1% an.

Zu erwartende Änderungen im Waldbrandgeschehen aufgrund der klimatischen Waldbrandgefahr wurden quantifiziert. Die klimatische Waldbrandgefahr erhöht sich nur leicht in den Regionen Baden-Württembergs, die von einem Rückgang des Niederschlags betroffen sind (Südosten).

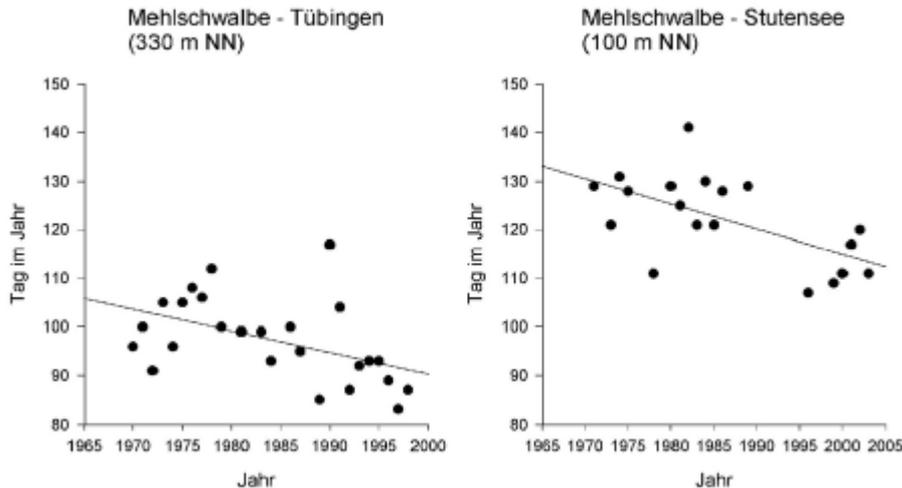
### **4.3 Naturschutz**

Die Erwärmung des globalen Klimas im vergangenen Jahrhundert  $0.6^{\circ}\text{C}$  beeinflusst auch Ökosysteme stark. Die Veränderungen sind vor allem in den letzten Jahrzehnten festzustellen und betreffen alle ökologische Ebenen: Populationen, Arten, Ökosysteme. Diese Veränderungen haben folglich auch Konsequenzen für den Naturschutz. Klimaveränderungen können zu Änderungen der Phänologie, Verschiebungen von geografischen Arealen und dem Aussterben kleiner und isolierter Populationen führen. Neue Arten wandern ein, vorhandene Arten verschwinden. Davon sind auch Schutzbemühungen um Arten und Lebensräume betroffen.

Um die Effekte der Klimaveränderungen auf Ökosysteme untersuchen zu können, werden experimentelle Ansätze ebenso gewählt wie theoretische Modelle. Daneben bleibt die Analyse langfristiger Beobachtungsreihen ein wichtiges Instrumentarium, um langfristige Trends und Muster erkennen zu können. Im Folgenden werden die Auswirkungen des Klimawandels während der letzten 30 Jahre exemplarisch am Beispiel von Vögeln und der Verbreitung von Insekten untersucht. Dazu wurden keine eigenen Experimente oder Feldbeobachtungen durchgeführt, sondern bereits vorhandene langfristige Beobachtungsreihen aus Südwestdeutschland im Hinblick auf Klimaveränderungen ausgewertet.

#### **Vögel**

Die Analyse einer langjährigen Beobachtungsreihe (1970-2003) der Erstankunftszeiten von 17 Zugvogelarten an 13 verschiedenen Orten in Südwestdeutschland ergab, dass sich die Ankunft um durchschnittlich 3 bis 5 Tage pro zehn Jahre verfrühte (siehe Bild 9).



**Bild 9: Erstankünfte im Zeitraum 1970-2003 für die Mehlschwalbe an den Standorten Tübingen(links) und Stutensee (rechts).**

Frühere Ankunftsdaten wurden nicht nur bei Kurz-, sondern auch bei Langstreckenziehern festgestellt, allerdings nicht im gleichen Ausmaß. Es wird vermutet, dass die frühere Ankunft darauf zurückzuführen ist, dass sich die Überwinterungsgebiete vieler Arten nach Norden verschoben haben. Das steht in Einklang mit der allgemeinen Tendenz, dass Langstreckenzieher (südlich der Sahara) zu Kurzstreckenziehern (Mittelmeerraum) und Kurzstreckenzieher zu Standvögeln werden. Der Wegflug im Spätsommer verzögert sich bei 9 von 19 getesteten Arten des langjährigen Datensatzes (1972-2003) der Fangstation Mettnau am Bodensee, nur bei zwei Arten wurde eine frühere Ankunft festgestellt. Verspätungen im Herbst sind demnach die deutlich häufiger anzutreffende Verhaltensänderung, allerdings konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen Lang- und Kurzstreckenziehern beobachtet werden.

Die Auswirkung der Klimaerwärmung auf die Artenzusammensetzung und –verbreitung wurde anhand der Brutvogel-Rasterkartierungen der Ornithologischen Arbeitsgemeinschaft Bodensee untersucht. Die Bestandsveränderungen zwischen 1980 und 2000 wurden zu Zugverhalten, Bruthabitat und Nord-Südverbreitung der Arten in Beziehung gesetzt. Letztere wurde als Mittelpunkt zwischen Nord- und Südgrenze der Areale in Europa berechnet. Wie auch bei früheren Auswertungen hat sich gezeigt, dass die Bestandsrückgänge vor allem bei Langstreckenziehern und Vögeln des Offenlandes besonders stark ausfielen. Erstmals wurde festgestellt, dass die Bestandsveränderungen unabhängig von Zugverhalten und Bruthabitat auch von der Nord-Südverbreitung abhängen. Südlich verbreitete Arten nahmen zu, während nördlich verbreitete nicht so stark abgenommen haben, wie ursprünglich vermutet. Die Ergebnisse machen deutlich, dass sich Vogelgemeinschaften aufgrund der Klimaerwärmung stark verändern werden und deshalb ein „konservierender“ Naturschutz in Zukunft kaum noch möglich sein wird.

Das Verhalten von Vögeln ist aufgrund ihrer hohen Mobilität ein empfindlicher Indikator für die Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme. Auf der Basis der gesammelten Daten sind weitere Untersuchungen zum bisherigen Verhalten von Ökosystemen allgemein und möglichen zukünftigen Entwicklungen erforderlich.

## Insekten

Seit den 1990er Jahren wird vermehrt von der Zunahme Wärme liebender bzw. der Einwanderung südlicher Arten berichtet. Um diese Entwicklung systematisch zu verfolgen und Konzepte für den Umgang mit den möglichen Folgen einer Erwärmung zu entwickeln, hat das

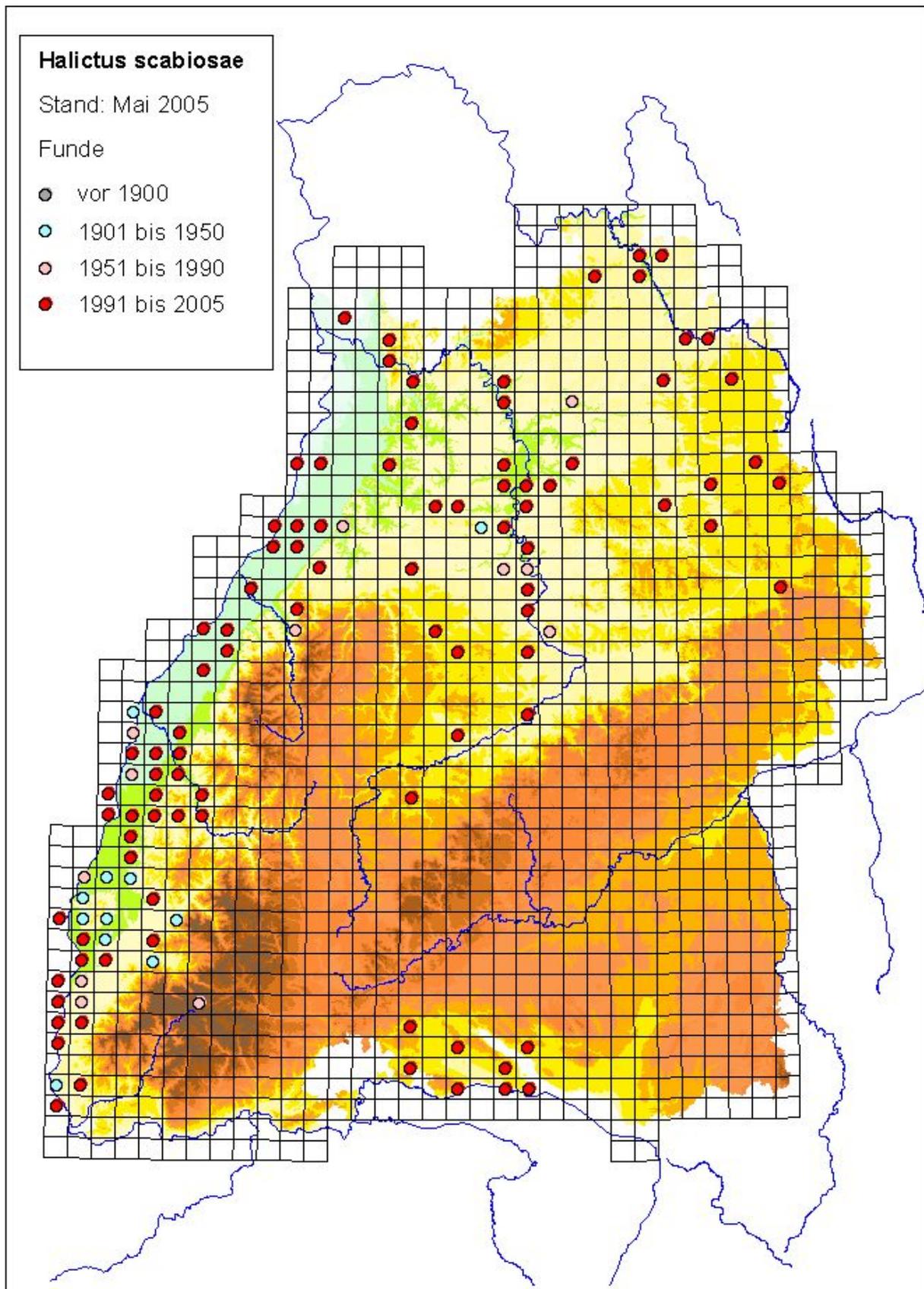
Land eine Studie beauftragt, in der verschiedene Insektengruppen auf Arten hin durchleuchtet werden sollen, die Reaktionen auf eine Klimaveränderung zeigen.

Grundsätzlich erschienen solche der bereits seit langem in Baden-Württemberg heimischen Arten als Indikatoren einsetzbar, die bekanntermaßen Wärme liebend sind und gleichzeitig möglichst breite ökologische Nischen besitzen, also beispielsweise nicht auf ganz spezifische, nur regional vorhandene Habitatrequisiten angewiesen sind, wie bestimmte Raupennahrungspflanzen, Pollenquellen oder edaphische Bedingungen (z.B. Sandboden).

In einem zweiten Schritt galt es die Datenlage zu dieser Vorauswahl an Arten zu prüfen, die verfügbaren Daten zusammenzutragen und eventuell weitere geeignete Spezies mit ausreichender Datenlage zu identifizieren. Wie sich rasch zeigte, liegt eine systematische Sammlung entomofaunistischer Informationen aus Baden-Württemberg, die in einer Datenbank zur Auswertung bezüglich der zu bearbeitenden Fragestellung verfügbar wären, allenfalls in Ansätzen vor. So konnte für die Verbreitungskarten der hier dargestellten Wildbienenarten auf umfangreiches Datenmaterial des Wildbienen-Katasters am Staatlichen Museum für Naturkunde Stuttgart zurückgegriffen werden. Im Folgenden wird exemplarisch die Ausbreitung der gelbbindigen Furchenbiene (*Halictus scabiosae*) gezeigt. Diese Wildbienenart hat ihr Verbreitungsgebiet von Marokko bis Rhodos und Bosporus, vereinzelt in Mitteleuropa.

Noch vor 15 Jahren waren von der Gelbbindigen Furchenbiene neben mehreren alten Nachweisen nur einzelne neuere Funde aus der Region Südlicher Oberrhein-Kaiserstuhl bekannt. Seitdem konnte sie in Baden-Württemberg in Lagen unter 500 m NN in nahezu allen Regionen nachgewiesen werden (siehe Bild 10). Auch aus anderen Bundesländern gibt es Meldungen über merkliche Bestandeszunahmen und Arealerweiterungen bis nach Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen.

Die Weibchen von *Halictus scabiosae* sind ab Ende April das ganze Sommerhalbjahr über zu finden, während die Männchen erst ab Mitte Juli auftreten. Die Art nistet in selbst gegrabenen Hohlräumen an sonnigen, trockenwarmen Stellen im Boden. Im Gelände ist die Gelbbindige Furchenbiene gut zu beobachten, da sie, selbst etwas größer als eine Honigbiene, gerne große, auffällige Blüten, vor allem von rot-violetten Korbblütlern, besucht. Bevorzugte Lebensräume sind Magerwiesen, Halbtrockenrasen sowie entsprechende Ruderalstandorte.



**Bild 10:**      **Ausbreitung von *H. scabiosae* in Baden-Württemberg (Quelle: WILDBIENEN-KATASTER)**

Der in Bild 10 dargestellte Verlauf der Ausbreitung findet sich auch bei anderen Arten wieder. Es sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die Auswirkungen auf die Ökosysteme abschätzen zu können. Für eine Übergangszeit kann das Einwandern der wärmeliebenden Arten wahrscheinlich zu einer Zunahme der Biodiversität führen, solange die heimischen Arten nicht verdrängt werden.

#### 4.4 Gesundheit

Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen und heißen Tagen in Mitteleuropa in Zukunft zunehmen wird. Das kann auch eine Zunahme von hitzebedingter Morbidität und Mortalität in Baden-Württemberg bedingen. Hitzebedingte Sterbefälle treten auch unter aktuellen klimatischen Bedingungen in Baden-Württemberg auf, im Sommer 2003 waren schätzungsweise 2000 Sterbefälle der hitzebedingten Mortalität zuzurechnen.

Klimaänderungen verursachen in der Regel keine neuartigen Umwelteinflüsse. Sie können jedoch die Auswirkungen von klimasensitiven Erkrankungen verschlimmern, wenn keine zusätzlichen Anpassungsmaßnahmen getroffen werden. Um die Risiken aktueller und zukünftiger Auswirkungen von Klimaänderungen effektiv kontrollieren zu können, müssen die Vulnerabilität und die Anpassungsfähigkeit der Bevölkerung verstanden werden.

Die Bewertung der thermischen Umweltbedingungen (Exposition) wurde mit dem Standardverfahren des Deutschen Wetterdienstes, dem Klima-Michel-Modell, vorgenommen. Die zentrale Größe zur Charakterisierung der thermischen Umwelt des menschlichen Körpers ist dabei die „gefühlte Temperatur“, die aus vier thermischen Umweltfaktoren berechnet wird: Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Wasserdampfdruck und mittlere Strahlungstemperatur. Durch Festlegung von Schwellenwerten der gefühlten Temperatur werden 9 thermische Belastungsklassen von „extremer Kältestress“ bis „extreme Wärmebelastung“ definiert. Diese Belastungsklassen beziehen im Gegensatz zu verschiedenen anderen Indizes die kurzfristige Anpassung an die aktuellen Witterungsbedingungen durch eine jahreszeitliche Abhängigkeit der Schwellenwerte mit ein. Der Vergleich zwischen Basis- und Zukunftsszenarium zeigt, dass es zu einem deutlichen Anstieg der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung und zu einem Rückgang der Anzahl der Tage mit Kältestress kommen wird. Dabei fällt der Anstieg der Zahl der Tage mit Wärmebelastung relativ gesehen stärker aus als der Rückgang des Kältestresses.

Neben der Auftretenshäufigkeit thermischer Belastungen wurde die Sensitivität der Bevölkerung für diese Art von Stress bestimmt. Auf der Basis von täglichen Sterbefallzahlen für das gesamte Bundesland von 1968 bis 2003 wurde die Sensitivität der Bevölkerung für jede der 9 thermischen Belastungsklassen - aufgeteilt in zwei Altersgruppen (unter und über 75 Jahre) - abgeschätzt. Dabei zeigte sich, dass die Bevölkerungsgruppe über 75 Jahre besonders sensitiv auf thermische Belastung reagiert. Unter der Annahme, dass sich die altersspezifische Sensitivität über den gesamten Zeitraum des Basis- und Zukunftsszenariums nicht ändert und unter Verwendung von demographischen Szenarien für den Anteil der über 75-Jährigen, wurde die Sensitivität der Gesamtbevölkerung in den einzelnen Kreisen in den Zukunftszeitraum extrapoliert.

Das Produkt aus der Auftretenshäufigkeit einer thermischen Belastung und der Sensitivität der Bevölkerung für diesen Stress liefert die Vulnerabilität, wobei mögliche zukünftige Anpassungsmaßnahmen hier nicht berücksichtigt wurden. Ein Vergleich zwischen Basis und Zukunftsszenarium zeigt, dass sich die Vulnerabilität der Bevölkerung für Wärmebelastung über alle Kreise gemittelt um ca. 20% erhöht. Im Zukunftsszenarium ist daher landesweit mit jährlich 180 bis 400 zusätzlichen hitzebedingten Todesfällen zu rechnen. Der für das ermittelte Rückgang der Vulnerabilität für Kältestress kann diesen Anstieg nicht kompensieren.

Vor diesem Hintergrund und angesichts der Erfahrungen aus dem Extremjahr 2003 ist es empfehlenswert, Maßnahmen zur Abmilderung dieser möglichen Auswirkungen zu ergreifen. Zu diesen Maßnahmen zählen einerseits das bereits installierte Hitzewarnsysteme des Deutschen Wetterdienstes mit Integration des Gesundheitswesens und andererseits langfristig die konsequente Berücksichtigung der thermischen Umweltbedingungen bei Stadtplanung und Gebäudedesign.

#### **4.5 Tourismus**

Auf dem deutschen Tourismusmarkt nimmt das Bundesland Baden-Württemberg mit über 38 Millionen Übernachtungen im Jahr 2002 eine Spitzenstellung ein - lediglich Bayern verzeichnet noch höhere Übernachtungszahlen. Insgesamt entfallen auf Baden- Württemberg über 12% aller Übernachtungen in Deutschland. Dem hohen Stellenwert der Tourismusbranche Baden-Württembergs entsprechend bietet dieser Wirtschaftszweig etwa 200.000 Arbeits- und 8.000 Ausbildungsplätze. Rund 5% des Bruttoinlandproduktes werden in diesem Wirtschaftszweig erwirtschaftet. Da der Tourismus als wirtschaftlich bedeutende Branche stärker noch als manch anderer Wirtschaftszweig witterungsbedingten Einflüssen unterliegt, ist es von Interesse, die möglichen Einflüsse des Klimawandels auf den Tourismus in Baden-Württemberg zu analysieren.

In diesem Abschnitt werden erste Ansätze zur Quantifizierung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Sommertourismus in Baden-Württemberg dargestellt. Bezüglich des Winter- und Schneesporttourismus hat das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg in 2004 eine umfangreiche Studie abgeschlossen, so dass hier auf eine Ergebnisdarstellung aus dem Bereich verzichtet werden kann, zumal die Studie bei der Klimaentwicklung zu ähnlichen Ergebnissen kommt wie sie oben in Kapitel 3 dargestellt sind.

Zunächst wurden die sommertouristischen Aktivitäten identifiziert und deren regionale Schwerpunkte in Baden-Württemberg erfasst. Exemplarisch wurden dann die Bereiche „Badetourismus am Bodensee“ und „Wandertourismus im Schwarzwald“ ausgewählt, um Methoden zur Untersuchung des Einflusses möglicher Klimaveränderungen beispielhaft zu entwickeln. Das methodische Vorgehen erfolgt in beiden Bereichen in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurden anhand von empirischem Datenmaterial tourismusrelevante Klimaparameter ermittelt. Im Fall „Badetourismus am Bodensee“, d.h. der freizeitorientierten Nutzung von Frei- und Seebädern, waren dies die tägliche Maximaltemperatur, der Bewölkungsgrad und die tägliche Sonnenscheindauer. Die empirische Ermittlung von Schwellwerten für diese drei Klimaparameter führte zur Definition eines „potentiellen Badetages“. Beim „Wandertourismus im Schwarzwald“ zeigten sich als wanderrelevante Klimaparameter die tägliche Maximaltemperatur, die relative Feuchte und vor allem die tägliche Sonnenscheindauer. Die Definition eines „potentiellen Wandertages“ war hier jedoch aufgrund der mageren empirischen Datenbasis und der statistisch uneindeutigeren Beziehung zwischen Wanderaktivität und Wetterverhältnissen nicht möglich.

Im zweiten Schritt wurde die mögliche zukünftige Entwicklung dieser Klimaparameter mit dem in der Vergangenheit beobachteten Verlauf verglichen. Dabei zeigte sich erwartungsgemäß, dass sich hinsichtlich der baderelevanten Klimaparameter in der Bodensee-Region im Zukunftsszenarium höhere tägliche Maximaltemperaturen und besonders während der Sommersaison längere tägliche Sonnenscheindauern ergeben. Für den südlichen Schwarzwald zeichnet sich im Zukunftsszenarium ebenfalls ein statistisch signifikanter Trend zu höheren täglichen Maximaltemperaturen und längeren täglichen Sonnenscheindauern ab.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in der Bodensee-Region für das Zukunftsszenarium mit einer Zunahme der „potentiellen Badetage“ und zusätzlich mit einer Verlängerung der Badesaison zu rechnen ist. Ebenso treten im südlichen Schwarzwald im Zukunftsszenarium öfter Tage mit für den Wandertourismus günstigen Wetterverhältnissen auf - allerdings unter

größeren methodischen Unsicherheiten als im Fall der „potentiellen Badetage“. Im Unterschied zum Wintertourismus wird für den Sommertourismus in Baden-Württemberg eine positive klimatische Entwicklung prognostiziert. Dies entspricht zwar grundsätzlich den Erwartungen, die hier vorgestellten Methoden zeigen darüber hinaus Ansätze für eine Quantifizierung der Zusammenhänge, die im Hinblick auf die wirtschaftliche Ertragsentwicklung wichtig ist.

#### 4.6 Ereignisse mit großen Schadenspotential

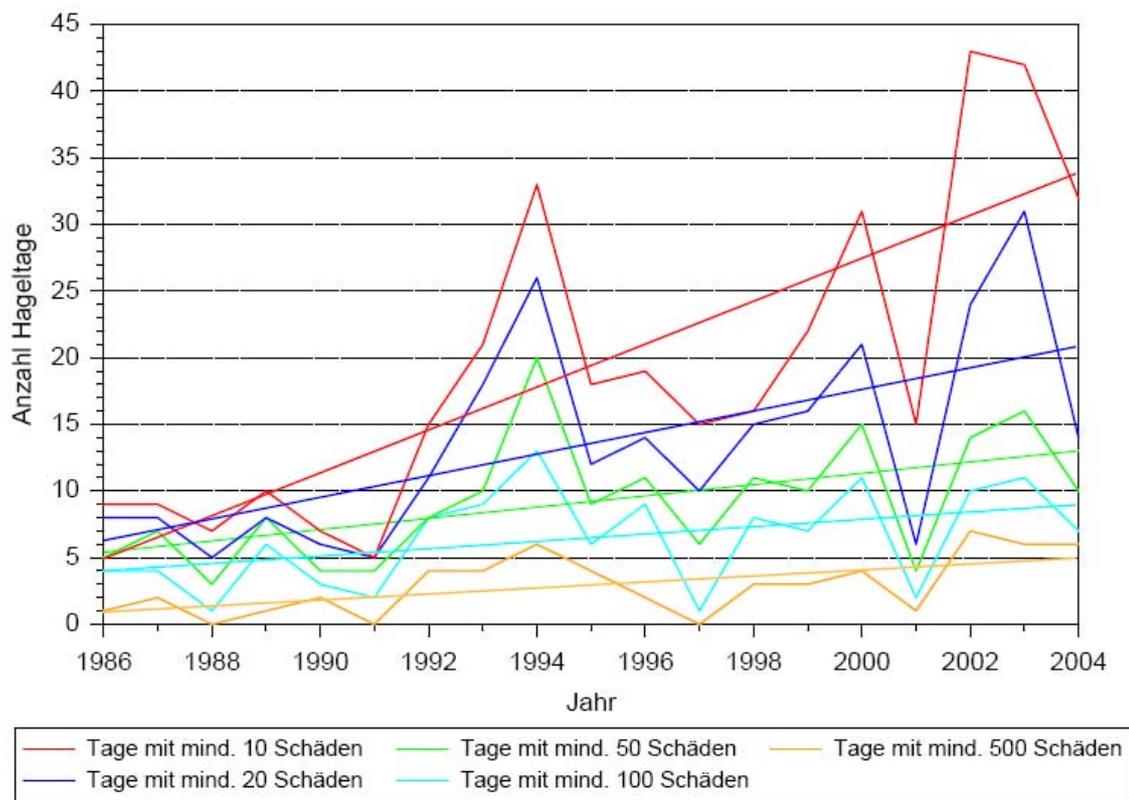
Es wurde untersucht, ob in den vergangenen Jahren eine Zunahme an Gewitterstürmen und Winterstürmen im Gebiet von Baden-Württemberg als mögliche Folge eines anthropogenen Treibhauseffekts bereits erkennbar ist.

Aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität von Gewitterstürmen sind für die Analyse der Auftretenswahrscheinlichkeit Messdaten in sehr hoher Auflösung über einen langen Zeitraum erforderlich. Da diese Kriterien derzeit von keinem Datensatz ausreichend erfüllt sind, wurden in diesem Vorhaben Daten verschiedener Messsysteme ausgewertet.

Im ersten Schritt wurde die Gewitterhäufigkeit zwischen 1949 und 2000 an dreizehn SYNOP-Stationen im Land analysiert. Insgesamt konnte sowohl an den meisten Stationen als auch im Mittel über alle Stationen ein positiver Trend in der Anzahl der Gewittertage festgestellt werden. Da dieses Ergebnis an einzelnen Stationen nicht ohne weiteres auf das gesamte Gebiet von Baden-Württemberg übertragen werden kann, wurden im nächsten Schritt die großräumigen atmosphärischen Bedingungen zwischen 1971 und 2003 aus den Vertikalprofilen der Radiosondenstation Stuttgart untersucht. Diese wurden durch verschiedene Stabilitätsparameter und Gewitterindizes ausgedrückt, die allerdings nur das Potenzial für die Entstehung von Gewitterstürmen wiedergeben können. Vor allem bei der *CAPE*, die ein Energiemaß für den Auftrieb in der Atmosphäre darstellt, konnte ein erheblicher Anstieg sowohl bei der Anzahl der Tage über definierten Schwellenwerten als auch bei den Jahresmaxima beobachtet werden. Als Ursache für den positiven Trend konnte vor allem die Zunahme der bodennahen Taupunkttemperatur bzw. Feuchte identifiziert werden. Die Parameter hingegen, bei denen keine bodennahen Werte einfließen, wiesen keinen bzw. sogar einen negativen Trend auf.

Um zu überprüfen, inwieweit die aus den Radiosondendaten abgeleiteten Konvektionsindizes, insbesondere die *CAPE*, tatsächlich Rückschlüsse auf Gewitterereignisse zulassen, wurden zusätzlich Daten des IMK-Radars zwischen 1998 und 2003 herangezogen. Ein direkter Vergleich zwischen den Tagen, die aufgrund der Radardaten bzw. der *CAPE*-Werte als Gewittertage eingestuft wurden, ergab in 2/3 aller Fälle eine Übereinstimmung. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass hohe *CAPE*-Werte tatsächlich in der Mehrzahl der Fälle mit schweren Gewittern verbunden sind. Damit ist allerdings nicht ausgeschlossen, dass es auch bei niedrigen *CAPE*-Werten zu kräftiger Konvektion kommen kann insbesondere in Verbindung mit einem Frontdurchgang oder bei vorherrschen der großräumiger Hebung etwa vorderseitig eines Höhentrog.

Schließlich wurden, um die Lücke zwischen Punktmessungen und flächendeckenden Messungen weiter zu schließen, Schadendaten der SV Sparkassen Versicherung bezüglich Hagelschlag zwischen den Jahren 1986 und 2004 analysiert. Sowohl die Schadenssummen als auch die Anzahl der Schadenmeldungen, jeweils korrigiert um die jährlichen Veränderung der Vertragszahlen, zeigten trotz starker jährlicher Schwankungen eine nahezu dramatische Zunahme in den vergangenen 20 Jahren. Annähernd dasselbe Bild zeigte sich auch in der Anzahl der Hageltage pro Jahr, die aus den Schadendaten für Baden-Württemberg rekonstruiert wurden (s. Bild 11).



**Bild 11: Anzahl Hageltage pro Jahr in Baden-Württemberg nach Daten der SV Versicherung.**

Für Winterstürme gestaltet sich die Analyse aufgrund der großräumigen Ausdehnung der Windfelder entsprechend einfacher. Da schwere Ereignisse allerdings selten sind, muss der Beobachtungszeitraum hierbei entsprechend groß sein. Von den neun schwersten Stürmen in den vergangenen 200 Jahren in Baden-Württemberg fallen allein sechs dieser Ereignisse in die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts. Die Auswertungen an verschiedenen SYNOP-Stationen über ca. 50 Jahre ergaben zudem eine Zunahme der Böengeschwindigkeit an Talstationen, während dies an Bergstationen nicht zu erkennen war. Bestätigt wurde das Ergebnis durch zusätzliche Auswertungen von Daten der Radiosondenstation Stuttgart.

Zusammenfassend lässt sich aus den vorgestellten Untersuchungen ableiten, dass die Häufigkeit von extremen Wetterereignissen und die damit verbundenen Gefahren in Baden-Württemberg in den vergangenen 20 bis 30 Jahren teilweise erheblich zugenommen haben. Dabei ist auch eine Zunahme der damit verbundenen Schäden zu beobachten, wie dies im Fall von Hagelschlag gezeigt wurde. Vieles deutet darauf hin, dass diese Änderungen in einem Zusammenhang mit dem anthropogenen Treibhauseffekt stehen. Vollständig und abschließend kann diese Frage hier aber nicht beantwortet werden.

Ebensowenig kann eine definitive Aussage darüber getroffen werden, wie sich die Auftretenswahrscheinlichkeit von Extremereignissen in Zukunft entwickeln wird. Extrapoliert man allerdings die diskutierten Ergebnisse für die nächsten Jahre linear weiter, ist in Zukunft mit einer größeren Häufung extremer Wetterereignissen zu rechnen.

## **5 Ausblick**

Die Untersuchungsergebnisse der Projekte KLIWA und KLARA haben gezeigt wie bereits heute alle Lebensbereiche von deutlichen Klimaveränderungen betroffen sind. Es werden auch Lücken und Defizite erkennbar, die ergänzende Untersuchungen erfordern, um die Synthese zu einem Gesamtbild der Verwundbarkeit des Landes Baden-Württemberg im Klimawandel vervollständigen zu können.

# Auswirkungen von Klimaänderungen im Land Brandenburg auf Wasserhaushalt, Forst- und Landwirtschaft

Werner Lahmer

**UBA-Workshop „Klimaänderungen – Herausforderungen für den Bodenschutz“  
Dessau, 28./29. September 2005**

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>32</b>
<b>2</b>	<b>Der Klimawandel .....</b>	<b>32</b>
2.1	Die besondere Situation Brandenburgs .....	33
<b>3</b>	<b>Klimatologie .....</b>	<b>34</b>
3.1	Die Situation .....	34
3.2	Methodik.....	34
3.3	Ausgewählte Ergebnisse .....	36
3.4	Bewertung der Klimaänderungen .....	37
<b>4</b>	<b>Wasserhaushalt.....</b>	<b>37</b>
4.1	Einführung .....	37
4.2	Methodik.....	37
4.3	Gegenwärtige hydrologische Verhältnisse .....	39
4.4	Aktuelle Veränderungen des Wasserhaushalts .....	40
4.5	Hydrologische Auswirkungen von Klimaänderungen.....	42
4.6	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	46
<b>5</b>	<b>Forstwirtschaft.....</b>	<b>47</b>
5.1	Problemstellung .....	47
5.2	Methodik und Daten .....	47
5.3	Kohlenstoffspeicherung und Produktivität .....	48
5.4	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	49
<b>6</b>	<b>Landwirtschaft .....</b>	<b>49</b>
6.1	Problemstellung .....	49
6.2	Methodik.....	50
6.3	Auswirkungen auf die Erträge .....	50
6.4	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	51
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....</b>	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>53</b>
<b>9</b>	<b>Verzeichnis der Abbildungen .....</b>	<b>54</b>

## 1 Einführung

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse basieren auf einer Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis zum Jahr 2055, die das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK) 2003 der Öffentlichkeit vorgestellt hat (*Gerstengarbe et al. 2003*). Sie setzt mit wesentlich verbesserten Methoden den Ansatz der sechs Jahre zuvor erschienenen „Pilotstudie 1“ (*Stock und Toth 1996*) für das Land Brandenburg fort. Schwerpunkte sind die regionale Klimaentwicklung und deren Auswirkungen auf Wasserhaushalt, Forst- und Landwirtschaft. Bei der Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf zu treffende Entscheidungen, einzuleitende Maßnahmen und mögliche Optionen wird dabei versucht, den wissenschaftlichen Horizont mit der Nutzerperspektive zu verbinden.

Die Studie wagt mit Hilfe innovativer wissenschaftlicher Methoden eine Vorschau in die Zukunft. In den Industrienationen hängen bereits heute 5 bis 10% des Bruttosozialprodukts direkt oder indirekt vom Wettergeschehen ab. Da eine Zunahme unvorhergesehener Witterungsbedingungen zu erwarten ist, wird mit einem verstärkenden Trend durch die globale Erwärmung gerechnet. Betroffene Nutzer, die anhand der 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 die Wasserwirtschaft, die Land- und Forstwirtschaft, den Naturschutz, die Elektrizitäts- und Energiewirtschaft, die Bauwirtschaft, den Tourismus, die Raumordnung sowie die Verkehrswege- und Landnutzungsplanung.

Auf Grundlage der vorliegenden Klimaprognosen ergeben sich aber auch für den Bodenschutz neue Herausforderungen im Sinne einer nachhaltigen Ressourcennutzung. Im Mittelpunkt steht im Fall des Bodens als Nutzungs- und Bewirtschaftungssystem dabei die landwirtschaftliche Nutzung. So werden sich Veränderungen des Niederschlags- und Verdunstungsregimes auf den Bodenwasserhaushalt und den oberirdischen Abfluss auswirken, weshalb konkrete Maßnahmenkonzepte und Handlungsstrategien zur vorbeugenden Minderung klimabedingter Schäden zu entwickeln sind.

## 2 Der Klimawandel

Das Klima der Erde unterlag und unterliegt einem stetigen Wandel, und die Erforschung der damit einhergehenden Vorgänge ist für das Verständnis der langfristigen Klimaentwicklung von großer Bedeutung. Dem gegenüber stehen Fragen, die durch im Vergleich dazu kurzfristige Klimaänderungen aufgeworfen werden. Aktuell stellt sich zum Beispiel die Frage, ob die in den letzten 100 Jahren zu beobachtende globale Erwärmung von ca. 0.6°C einen Einfluss auf das regionale Klima auch in unseren Breiten hat.

Der globale Klimawandel zeigt schon heute in verschiedenen Regionen der Erde deutliche, aber sehr unterschiedliche Auswirkungen. Auch in Deutschland lassen sich signifikante Veränderungen von Umwelt- und Lebensbedingungen feststellen. Die Autoren der Klimastudie stellten sich deshalb die Frage, wie diese Veränderungen die Region Berlin-Brandenburg bereits betreffen und zukünftig betreffen werden. Die auf verschiedenen räumlichen Ebenen ablaufenden Prozess erfordern dabei unterschiedliche Entscheidungen und Maßnahmen:

- *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.
- *Regional* zeigen sich die Folgen der Klimaveränderung, wobei die Auswirkungen außer vom globalen Klimawandel stark davon abhängen, wie vorbereitet oder verwundbar

eine bestimmte Region ist und wie sie entweder vorsorgend agiert oder passiv reagiert.

Folgende Aspekte werden zunehmend deutlicher und sollten bei Entscheidungen und Maßnahmen berücksichtigt werden:

- Anthropogene Emissionen von Treibhausgasen haben im Vergleich zu natürlichen Ursachen inzwischen einen wesentlichen Anteil am Klimawandel. Den stärksten Beitrag liefert dabei die Freisetzung von CO<sub>2</sub> aus der Verbrennung fossiler Energieträger. Den zweitwichtigsten Beitrag zur Erhöhung der Treibhausgaskonzentration liefert die Verdrängung naturnaher Ökosysteme durch intensive Formen der Landnutzung für Ansiedlungen, Verkehrserschließungen und industrialisierte Landwirtschaft.
- Notwendige Maßnahmen zur Verminderung dieser Emissionen werden infolge starker Interessenkonflikte nur zögerlich realisiert und wenn, dann führen sie nur mit 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.
- Dieses Dilemma von großer zeitlicher Verzögerung zwischen Ursachen und Reaktionen des Klimasystems stellt eine große Herausforderung für eine verantwortungsvolle Politik des Klimaschutzes dar.
- Seit etwa 8.000 Jahren war keine Klimaänderung an Ausprägung und Geschwindigkeit nur annähernd mit dem vergleichbar, was der Erde in den kommenden Jahrzehnten bevorsteht. Auch wenn dies inzwischen als wissenschaftlich gut begründet anzusehen ist, bestehen noch große Unsicherheiten hinsichtlich der zu erwartenden Auswirkungen.
- Trotz dieser Tatsachen und Umstände stellen die noch nicht überall eindeutig zu erkennenden, aber möglicherweise einschneidenden Konsequenzen des Klimawandels noch keinen Grund zur Panik dar.

Neben Maßnahmen zum Schutz des Klimas sind 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 Frage nach den regionalen Auswirkungen von Klimaänderungen soll nachfolgend für das Land Brandenburg beantwortet werden. Dazu wird kurz erläutert, wie die notwendigen klimatologischen Daten gewonnen werden und mit welchen Methoden man einen Blick in die Zukunft wagen kann. Zur Veranschaulichung der Entwicklung wurden 100 Jahre ausgewählt, von denen die erste Hälfte in der Vergangenheit (1951-2000) liegt und die zweite bis zum Jahre 2050 in die Zukunft reicht. Die Ergebnisse verdeutlichen die wahrscheinlichste Entwicklung des Klimas und seines Einflusses auf den Wasserhaushalt, die Wälder und die Landwirtschaft der Region. Dargestellt werden hier lediglich einige ausgewählte Ergebnisse der Klimastudie. Für weitere Informationen sei der interessierte Leser auf den bereits erwähnten PIK-Report 83 verwiesen.

## **2.1 Die besondere Situation Brandenburgs**

Brandenburg ist gekennzeichnet durch einen Gradienten maritim beeinflussten Klimas im Norden hin zu einem mehr kontinental beeinflussten Klima im Süden und gehört zu den trockensten Regionen Deutschlands. Dabei nehmen die Sommerniederschläge in der Summe zur Zeit deutlich ab, die Winterniederschläge dagegen leicht zu. Bei Jahresniederschlagssummen von etwa 500 bis 650 mm ist das Land 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 mit geringer Wasserspeicherkapazität und gut durchlässigen Grundwasserleitern.

Die Wasserproblematik resultiert aber auch aus der Tatsache, dass der im Vergleich zum Westen ohnehin schon erheblich trockenere Osten Deutschlands in den letzten 100 Jahren einen überproportional hohen Rückgang der bereits geringen Niederschläge aufweist. Das Fehlen bedeutender Fremdzuflüsse im Ballungsraum Berlin/Potsdam und die zusätzliche Reduktion der Abflüsse in der Spree durch die Wiederauffüllung der Grundwasserabsenkungstrichter in der Lausitz (Tagebaurestlöcher nach der Einstellung der Braunkohletagebaue) tragen ein Übriges zur bereits angespannten Lage bei.

Im „Jahrhundertssommer“ des Jahres 2003 wurde Brandenburg von der „größten Dürre seit der Wende“ betroffen. Aufgrund ausbleibender Regenfälle wurde die Berufsschifffahrt auf Oder und Elbe stark eingeschränkt bzw. ganz eingestellt. Die Pegel verschiedener Flüsse näherten sich den gemessenen Rekordtiefstständen, die Fließgeschwindigkeiten unterschritten z.T. das für das Überleben vieler Arten notwendige Maß. Sauerstoffmangel und Algenpest bedrohten die Tierwelt in Flüssen und Seen. Brandenburg war so früh wie nie zuvor gezwungen, Wasser aus sächsischen Talsperren einzukaufen. Die Trockenheit hatte massive Auswirkungen auch auf die auf Forst- und Landwirtschaft.

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

- Moderater Temperaturanstieg von 1,4 °C 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 regionale Wasserbilanz erheblich stört.

Vor diesem Hintergrund ist die Frage, welchen Einfluss klimabedingte „Störungen“ auf den regionalen Wasserhaushalt und davon abhängige Sektoren haben können, mehr als berechtigt. Nachfolgend soll deshalb versucht werden, die klimabedingten Probleme und ihre Ursachen näher zu beschreiben sowie mögliche Zukunftsperspektiven zu diskutieren. Da die Voraussetzung für einen wissenschaftlich fundierten „Blick in die Zukunft“ die Anwendung entsprechender Methoden ist, sollen auch diese Methoden kurz erläutert werden. Für detailliertere Informationen sei der interessierte Leser auch auf die am Ende angegebene Literatur verwiesen.

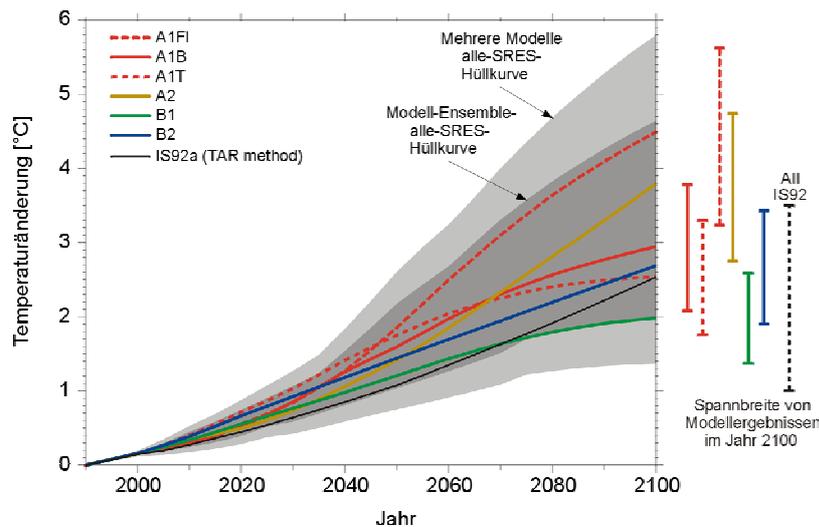
### 3 Klimatologie

#### 3.1 Die Situation

In dem 2001 veröffentlichten „Third Assessment Report“ des Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (*IPCC 2001*) wird die zu erwartende Klimaentwicklung im 21. Jahrhundert abgeschätzt. In **Abb. 3.1** 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 (wie bereits erwähnt war es nicht Ziel der PIK-Studie, extreme Entwicklungen abzuschätzen, sondern eine Aussage zur wahrscheinlichsten zu liefern).

#### 3.2 Methodik

Will man in der Naturwissenschaft Aussagen über ein zukünftiges Geschehen machen, also eine Vorhersage abgeben, bedient man sich in der Regel eines "Modells", das die zu erwartenden Geschehnisse möglichst genau abbildet. Ein solches Modell besteht aus mathematischen Gleichungen, welche die wesentlichen Eigenschaften des untersuchten Objektes beschreiben und mit denen man in der Lage ist, der Zeit vorauseilende Berechnungen durchzuführen. Dass dies im Fall des Klimas eine fast unlösbare Aufgabe ist, lässt sich leicht aus dem komplexen Charakter des Klimas ableiten. Das Klimasystem der Erde ist ein hochgradig nichtlineares System, dessen Entwicklung nur beschränkt vorhersagbar



**Abb. 3.1:** Bandbreite der möglichen mittleren globalen Temperaturänderungen im 21. Jahrhundert.

ist. Um dennoch eine gute „Vorhersage“ machen zu können, müssten alle Eigenschaften und Randbedingungen so genau wie möglich im Klimamodell erfasst werden. Das allein würde jedoch noch nicht ausreichen. Man müsste außerdem Kenntnis haben über das zukünftige Verhalten äußerer, das Klima beeinflussender Faktoren, wie zum Beispiel die Schwankungen der Sonnenaktivität, die Zusammensetzung der Atmosphäre (CO<sub>2</sub>-Anstieg) oder den Vulkanismus. Da dies nach dem heutigen Erkenntnisstand prinzipiell

nicht möglich ist, wird es eine Klimavorhersage, die Auskunft über den exakten Ablauf des zukünftigen Klimageschehens ermöglicht, nicht geben.

In den letzten 20 Jahren wurden die globalen Klimamodelle zu "High-Tech-Modellen", und ein Ende der Entwicklung ist noch nicht abzusehen. Wenn man die globalen Aussagen dieses Modelltyps inzwischen als gut gesichert betrachten kann, gilt dies noch nicht für Aussagen im regionalen Bereich. Da aber nur die regionalen Auswirkungen zukünftiger Klimaänderungen von Bedeutung für Mensch und Umwelt sind, wird seit einigen Jahren versucht, eine Antwort auf diese Problematik zu finden.

Auch in Zukunft wird es also keine exakten Vorhersagen der Klimaentwicklung geben. Klimavorhersagen, wie sie heute berechenbar sind, sind immer Wahrscheinlichkeitsaussagen über eine mögliche Klimaentwicklung. So ist auch die Zukunft Brandenburgs kein vorbestimmter Pfad, den es nur noch wissenschaftliche „vorherzusagen“ gilt. Es handelt sich vielmehr um ein Labyrinth von Pfaden, und jede Verzweigung wird beeinflusst durch Entscheidungen (oder deren Unterlassung) verschiedener Akteure. Dies ist ein wesentlicher Grund, warum nicht Prognosen, sondern Szenarien eine Beschreibung der Zukunft ermöglichen. Szenarien beschreiben, was nach heutigem Stand der Wissenschaft zu erwarten ist, wenn diese oder jene Entscheidungslage besteht. Sie enthalten damit prinzipiell das Element der Zukunftssteuerung, und zwar um so mehr, je mehr man sich von den globalen Ursachen hin zu den regionalen und konkreten Auswirkungen bewegt.

Um trotz der geschilderten grundsätzlichen Probleme zu Aussagen über mögliche Klimaentwicklungen bzw. deren Auswirkungen zu kommen, geht man also den Weg über die Szenarientwicklung. Unter einem Szenarium versteht man dabei einen sich einstellenden Klimazustand, wenn über einen definierten Zeitraum bestimmte Annahmen zur Änderung bestimmter Einflussgrößen gemacht werden. Die Art des Szenariums richtet sich nach den Änderungsgrößen, dem gewählten Maßstab sowie der spezifischen Fragestellung. Werkzeuge zur Szenarienerstellung sind sowohl Klimamodelle (z.B. Globale Zirkulationsmodelle) als auch statistische Methoden. In der PIK-Studie wurde ein statistisches Modell zur Entwicklung von Klimaszenarien verwendet, dessen Grundlage sowohl Klimamodellaussagen als auch Beobachtungsdaten sind.

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

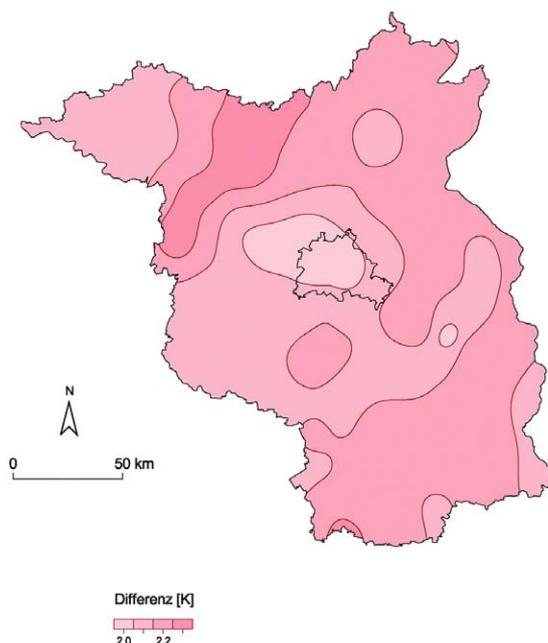
Möglichkeiten der Datenbereitstellung zurückgegriffen werden. Dabei darf die Konsistenz sowohl räumlich, zeitlich als auch zwischen den meteorologischen Größen nicht verletzt werden. Von den drei wesentlichen Methoden zur Szenarienentwicklung (Einbettung eines regionalen Klimamodells in ein globales, Transformation von Klimamodellerggebnisse in kleinerskalige Bereiche über statistische Verfahren, statistische Modelle unter Verwendung von Beobachtungsdaten) wurde in der PIK-Studie die dritte Methode angewandt, da die beiden erstgenannten Methoden zur Zeit noch keine oder nur eingeschränkt verwertbare Ergebnisse liefern. Diese Methode geht davon aus, dass die großräumigen, vom Klimamodell berechneten Änderungen für bestimmte meteorologische Größen in einer Region im Mittel als richtig anzusehen sind. Auf der Basis einer solchen Annahme werden dann 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 Szenariengestaltung auf ein Minimum reduziert werden, wobei die bereits angeführte Konsistenz der Klimagrößen erhalten bleibt. Nachteilig ist der nicht mehr vorhandene physikalische Zusammenhang zwischen den Klimamodellerggebnissen und denen des Szenariums.

Weitere Einzelheiten zum Szenarienmodell sind dem ausführlichen PIK-Report Nr. 83 zu entnehmen. Dort werden u.a. die „mittleren klimatischen Verhältnisse Brandenburgs 1951-2000“, die „Berechnung des wahrscheinlichsten Zukunftsszenariums“ und „Die mittleren klimatischen Verhältnisse in Brandenburg für den Zeitraum 2046-2055“ diskutiert und dargestellt. Nachfolgend sollen lediglich einige Ergebnisse der Szenariengestaltung vorgestellt werden, die den Vergleich der Klimaentwicklung zwischen den Zeiträumen 2046/2055 und 1951/2000 zum Thema haben.

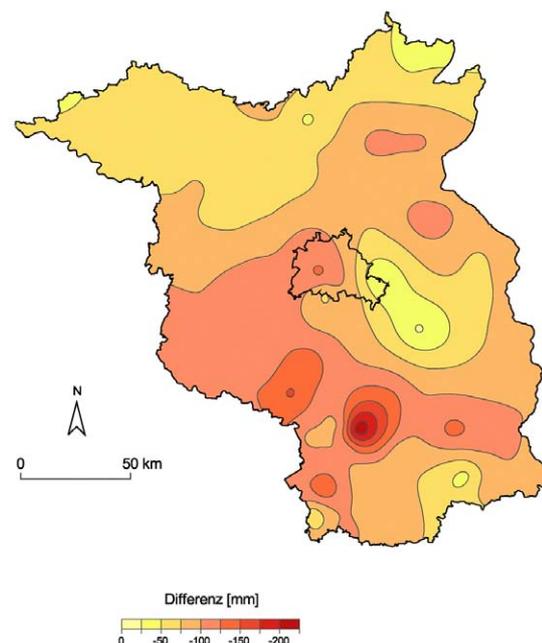
### 3.3 Ausgewählte Ergebnisse

**Abb. 3.2** zeigt die Temperaturdifferenz zwischen den letzten 10 Jahren des Szenarienzeitraums (2046/2055) und dem Mittelwert des Beobachtungszeitraums (1951/2000). Die Differenzen sind generell größer als  $2^{\circ}\text{C}$  und räumlich nur schwach strukturiert. Die ebenfalls ermittelte Anzahl der heißen und der Sommertage im Zeitraum 2046/55 (hier nicht dargestellt) ist deutlich höher als im Zeitraum 1951/2000. Invers dazu verhalten sich die Häufigkeiten von Frost- und Eistagen.

Veränderung der Temperatur 2046/2055 zu 1951/2000



Veränderung der Niederschläge 2046/2055 zu 1951/2000



**Abb. 3.2:** Räumliche Verteilung der Differenzen des Jahresmittels der Lufttemperatur 2046/2055 - 1951/2000

**Abb. 3.3:** Räumliche Verteilung der Differenzen der Jahressumme des Niederschlags 2046/2055 - 1951/2000

Die in **Abb. 3.3** dargestellte Verteilung des Niederschlags zeigt, dass es bis zum Ende des Szenarienzeitraums zu einer deutlichen Abnahme der Jahressummen des Niederschlags für alle Regionen Brandenburgs kommt. Die räumlich stark differenzierte Abnahme reicht von -17.8 mm (südöstlich Berlins) bis zu -221.0 mm (Luckau). Der PIK-Report enthält weitere Differenzkarten für die Größen Sonnenscheindauer und Bewölkung.

### 3.4 Bewertung der Klimaänderungen

Bei Annahme eines mittleren Temperaturanstiegs von 1,4 °C für den Zeitraum 2001/2055 ergibt sich als markanteste Klimaänderung ein deutlicher Rückgang der Jahressummen des Niederschlags, insbesondere im Sommer. Damit verbunden ist eine Zunahme der Sonnenscheindauer bei gleichzeitigem Rückgang der Bewölkung. Auch wenn das Szenarium A1B (siehe Abb. 3.1) in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts von einer deutlichen Emissionsminderung ausgeht, wird sich der Temperaturanstieg bis zum Ende des Jahrhunderts fortsetzen. Hinsichtlich der Klimaentwicklung in Brandenburg gibt es somit keine Entwarnung. Vielmehr werden sich die Randbedingungen, denen man sich anpassen muss, noch verschärfen.

Die erzielten Ergebnisse stellen die mittlere Klimaentwicklung Brandenburgs dar, beantworten aber nicht die Frage, wie sich in den nächsten 50 Jahren extreme Ereignisse hinsichtlich Häufigkeit und Intensität entwickeln werden. Diese Frage ist von besonderem Interesse, da im Rahmen der zu erwartenden Klimaänderungen mit einer Zunahme solcher Ereignisse zu rechnen ist. Allerdings müssen dazu zunächst die regionalen dynamischen Klimamodelle so erweitert werden, dass sie Aussagen zu Extremen in ihrem räumlichen und zeitlichen Auftreten ermöglichen. Aufgrund der nicht expliziten Untersuchung der Extreme konnten z.B. 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 jedoch die bereits vor einiger Zeit am PIK erstellte Studie zur Waldbrandgefährdung im Land Brandenburg bis 2050 angeführt werden (*Gerstengarbe und Werner 1997*).

## 4 Wasserhaushalt

### 4.1 Einführung

In Zusammenhang mit möglichen Klimaänderungen spielt die Sorge um die Wasserverfügbarkeit zweifellos eine Schlüsselfunktion. Die zunehmenden Ansprüche an die begrenzt verfügbaren Wasserressourcen erfordern nicht nur in den ariden und semi-ariden Zonen, sondern auch in unseren Breiten eine umweltverträgliche und nachhaltige Bewirtschaftung der Ressource Wasser. Trotz „verregneter Sommer“ in den letzten Jahren und trotz der im August 2002 im Elbegebiet aufgetretenen „Jahrhundertflut“ wird für Brandenburg (und Ostdeutschland generell) in Zukunft eine zunehmende Trockenheit prognostiziert. Die Änderungen des Wasserdargebotes werden gravierende Auswirkungen auf den regionalen Wasserhaushalt und damit auf verschiedenste volkswirtschaftliche Sektoren haben.

Nachfolgend soll die Frage diskutiert werden, welche Tendenzen der Wasserhaushalt in Brandenburg gegenwärtig zeigt, wie sich diese Tendenzen unter Annahme eines Klimawandels verstärken werden und welche Auswirkungen mittel- bis langfristig zu erwarten sind.

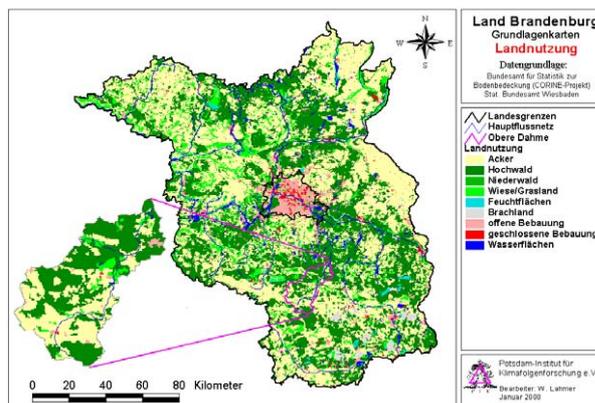
### 4.2 Methodik

Zur Ableitung aussagekräftiger hydrologischer Ergebnisse in regionalem Maßstab ist der Einsatz eines Wasserhaushaltsmodells notwendig, das für meso- bis makroskalige Gebiete (Flächengrößen von einigen 100 bis zu 10.000 km<sup>2</sup>) belastbare Ergebnisse liefert. Eine zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Modellierung erfordert dabei eine der räumlichen Skala angemessene Herangehensweise, bei der die räumlichen Variabilitäten des Untersuchungsgebietes hinreichend genau erfasst werden. Dazu gehört die realitätsnahe Be-

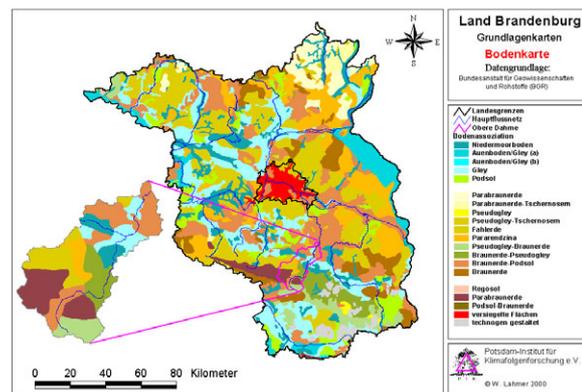
rücksichtigung klimatischer Triebkräfte ebenso wie räumliche Aggregationsverfahren bei der Datenaufbereitung und der Durchführung der Simulationsrechnungen.

Für die hier vorgestellten Untersuchungen wurde das hydrologische Modellierungssystem ArcEGMO eingesetzt, das für Einzugsgebiete sowie beliebig geformte Landschaftseinheiten die Modellierung aller maßgeblichen Prozesse des Landschaftswasserhaushaltes ermöglicht (Pfützner 2002, Becker et al. 2002). Im Gegensatz zu den meisten anderen Modellen erfolgt die Modellierung nicht raster- sondern polygonbasiert, woraus sich z.B. eine bessere Anpassung an die Heterogenität des Gebietes ergibt. Vorteilhaft sind auch die variablen Möglichkeiten der räumlichen Aggregation und Disaggregation, die insbesondere im Fall von Langzeitsimulationen (z. B. 50 bis 100 Jahre im Fall von Klimaänderungen) eine effektive Modellierung erst ermöglichen. Weitere Informationen zu ArcEGMO sind unter [www.arcegmo.de](http://www.arcegmo.de) auch im Internet verfügbar.

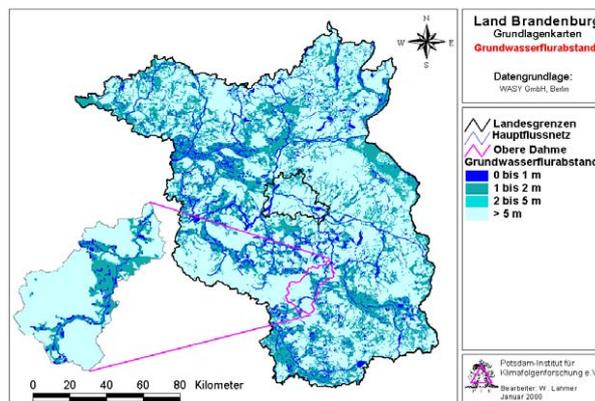
Als räumliche Datengrundlagen für die Analysen wurden für das Land Brandenburg flächendeckend verfügbare Karten verwendet, die den besonderen Anforderungen an die mesoskalige Modellierung entsprechen. Diese Karten enthalten u.a. Informationen zur Landnutzung und -bedeckung, zu den Böden, zur Topographie und zu den mittleren Grundwasserständen. Einige dieser Karten sind nachfolgend zusammen mit dem Hauptflussnetz dargestellt. Als Ausschnitt jeweils mit angegeben ist das Einzugsgebiet der Oberen Dahme, das als weitgehend anthropogen unbeeinflusstes Gebiet u.a. zur Eichung des hydrologischen Modells herangezogen wurde.



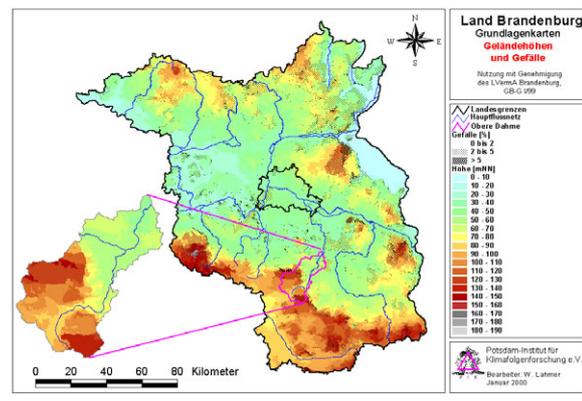
**Abb. 4.1:** Landnutzungskarte für das Land Brandenburg



**Abb. 4.2:** Bodenkarte für das Land Brandenburg



**Abb. 4.3:** Grundwasserflurabstandskarte für das Land Brandenburg



**Abb. 4.4:** Digitales Höhenmodell und Gefälle für das Land Brandenburg

Eine tiefgreifende Diskussion dieser für die Modellierungsarbeiten verwendeten räumlichen Grundlagenkarten und ihrer Aufbereitung findet sich in Lahmer et al. 2001. Für Wasserhaushaltsmodellierungen werden darüber hinaus räumlich verteilte dynamische Informationen für den Niederschlag sowie weitere meteorologische Variablen benötigt (z.B. zur Berechnung der Verdunstung). Entsprechende, an Niederschlags- und Klima-

hauptstationen erhobene Zeitreihen auf Tagesbasis wurden von Deutschen Wetterdienst (DWD) bereitgestellt.

### 4.3 Gegenwärtige hydrologische Verhältnisse

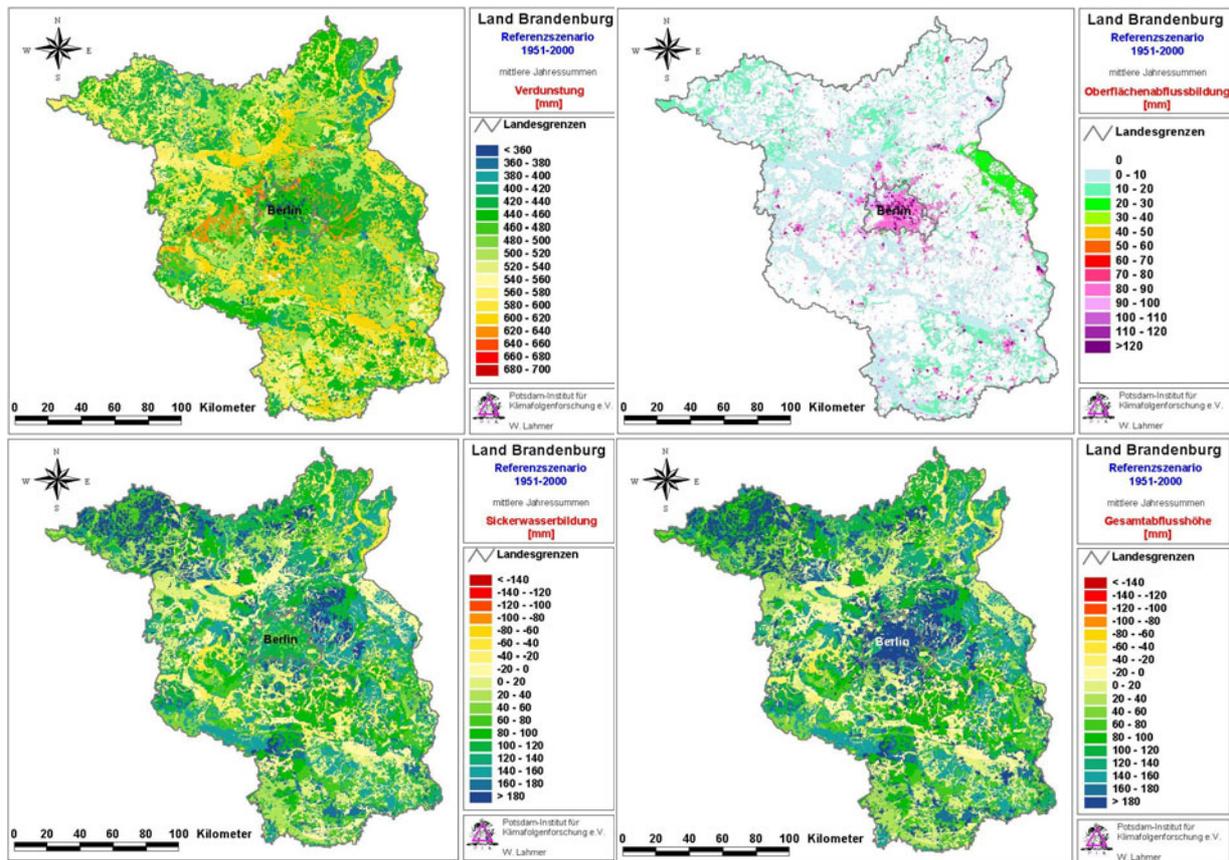
Grundlage für Analysen unter Annahme eines geänderten Klimas ist eine möglichst realitätsnahe Erfassung des gegenwärtigen hydrologischen Zustandes des Untersuchungsgebietes. Dazu lieferte die im Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg erstellte Studie „Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg“ mit einer Beschreibung der mittleren hydrologischen Verhältnisse für den Zeitraum 1961-1998 wichtige Erkenntnisse (siehe *Lahmer et al. 2001*). Unter Verwendung des hydrologischen Modellierungssystems ArcEGMO wurden für den „Ist-Zustand“ (Referenzszenarium, Zeitraum 1951-2000) räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Wasserhaushaltsberechnungen 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.

In Tabelle 1 sind die für das Referenzszenarium berechneten mittleren Jahres-, Sommer- und Wintersummen aller meteorologischen Eingangs- sowie damit berechneter Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg zusammengefasst. Der Übersicht halber sind auch die für das 1,4°C-Klimaänderungsszenarium ermittelten und später diskutierten Werte bereits hier angegeben.

**Tabelle 4.1:** Für das gesamte Land Brandenburg berechneten mittleren 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°C-Klimaänderungsszenarium (2001-2055) (Werte jeweils in mm/Jahr bzw. in °C für LT). Unten sind die zwischen dem 1,4°C-Klimaänderungsszenarium und dem Referenzszenarium berechneten Differenzen angegeben (jeweils in mm/Jahr bzw. in °C für LT sowie in % darunter).

Wasserhaushaltsgröße	PI	LT	EP	WB	ER	SWB	RO	QC	
<b>Referenzszenarium (Periode 1951-2000)</b>									
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
<b>1,4K-Klimaänderungsszenarium (Periode 2001-2055)</b>									
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
<b>Differenzen zwischen 1,4K-Szenarium und Referenzszenarium</b>									
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	%

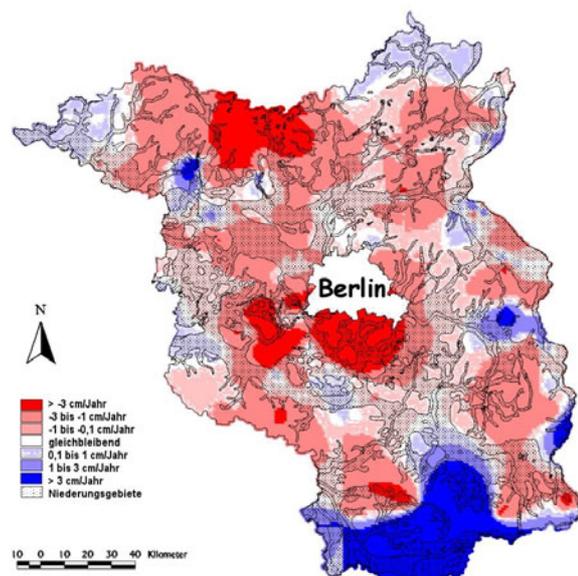
Neben zeitlich aggregierten Ergebnissen erlauben flächendifferenzierte Ergebnisse (Karten) regionale Aussagen im Untersuchungsgebiet. Stellvertretend für die berechneten Ergebnisse sind in **Abb. 4.5** die räumlichen Verteilungen der Verdunstung, Sickerwasserbildung, Oberflächenabflussbildung und Gesamtabflusshöhe dargestellt. Alle Karten zeigen eine starke Differenzierung der entsprechenden Werte, die von den Gebietseigenschaften (Vegetation, Bodeneigenschaften, Grundwasserstände), aber auch von den mittleren meteorologischen Bedingungen geprägt ist. 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 werden später diskutiert.



**Abb. 4.5:** Karten der für das Land Brandenburg berechneten Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung, Sickerwasserbildung, Oberflächenabflussbildung und Gesamtabflusshöhe für das Referenzszenarium (beobachtetes Klima im Zeitraum 1951-2000).

#### 4.4 Aktuelle Veränderungen des Wasserhaushalts

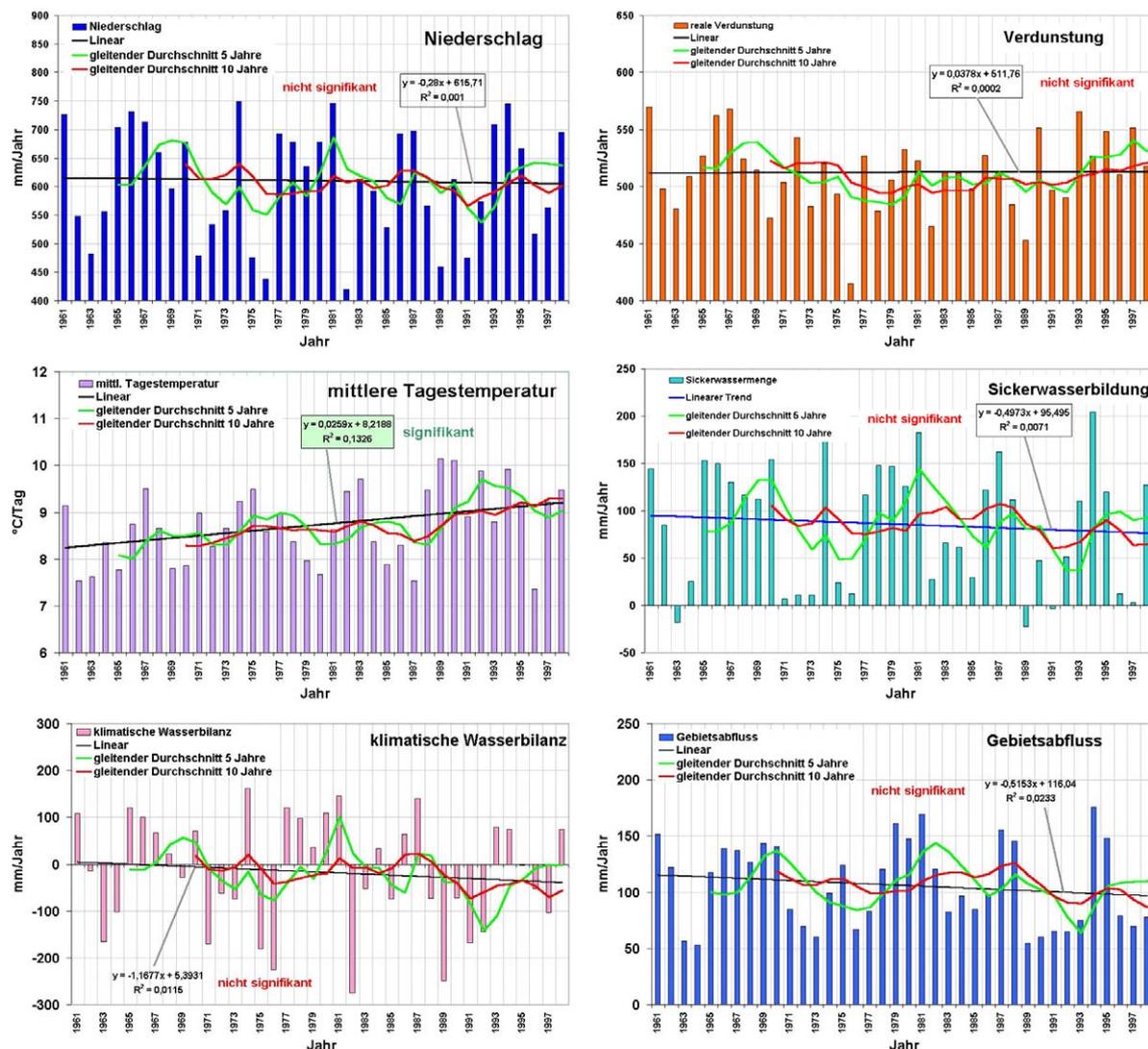
Bevor im nächsten Kapitel die Ergebnisse der Impaktanalysen unter Verwendung des regionalen 1,4°C Klimaszenariums dargestellt werden, sollen zunächst Ergebnisse einer Trenduntersuchung vorgestellt werden, die einen tieferen Einblick in die hydrologische Ist-Situation der Region ermöglichen. Nach Beobachtungen des Landesumweltamtes Brandenburg (LUA) weisen zahlreiche Grundwassermessstellen in den letzten Jahren sinkende Grundwasserstände auf (siehe **Abb. 4.6**). Die Analyse langjähriger Ganglinien zeigt überwiegend einen schwachen Abfall des Grundwasserstandes, der oft anthropogen bedingt ist (z. B. Einstellung der Rieselfeldbewirtschaftung südlich von Berlin). 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.



**Abb. 4.6:** Änderungen der an 350 Messstellen im Zeitraum 1970-1999 in Brandenburg gemessenen Grundwasserstände (Quelle: Landesumweltamt Brandenburg)

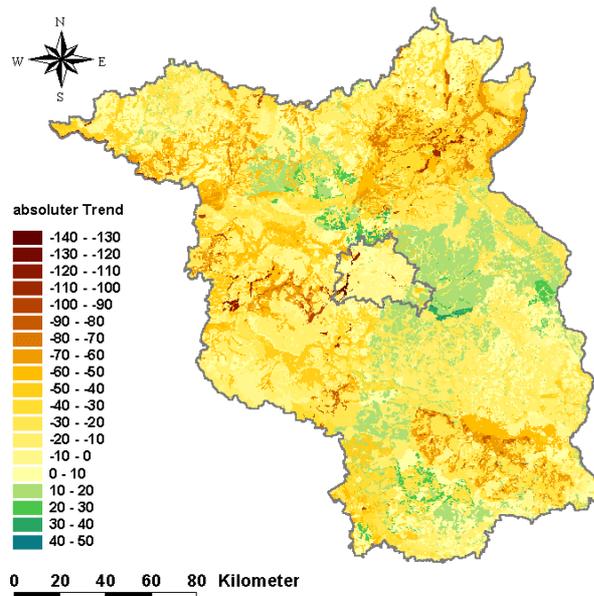
Ohne eine Klärung der komplizierten Zusammenhänge gestaltet sich eine Prognose und Extrapolation der beobachteten Trends schwierig. Zur wissenschaftlichen Untersezung der Problematik wurden deshalb räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Untersuchungen der Veränderungen der Sickerwassermenge durchgeführt. Die in Untersuchungen des LUA zum Landschaftswasserhaushalt Brandenburgs eingebundene Studie „Orts- und zeitdiskrete Ermittlung der Sickerwassermenge im Land Brandenburg“ (Lahmer und Pfützner 2003) lieferte wichtige Hinweise darauf, ob, in welche Richtung und wie signifikant sich die Sickerwassermenge in den letzten Jahrzehnten verändert hat.

Dazu wurden für den Zeitraum 1961-1998 Simulationsrechnungen für alle relevanten Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg durchgeführt. Die in **Abb. 4.7** dargestellten Ergebnisse der statistischen 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. Für alle anderen Größen ergeben sich zwar mehr oder weniger große Änderungen, die jedoch allesamt statistisch nicht signifikant sind. Dies gilt insbesondere auch für die mittleren Jahresniederschläge sowie die Sickerwasserbildung. So zeigt Abb. 4.7 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.

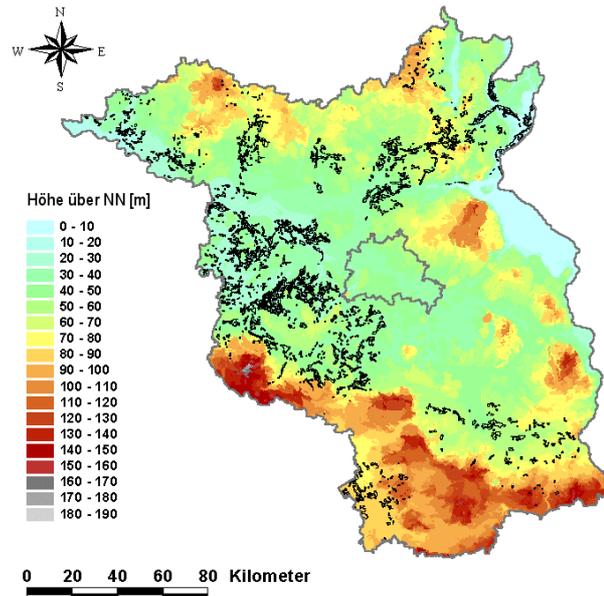


**Abb. 4.7:** Zeitliche Entwicklung der Größen Niederschlag, mittlere Tagestemperatur, klimatische Wasserbilanz, Verdunstung, Sickerwasserbildung und Gebietsabfluss im Land Brandenburg für den Zeitraum 1961-1998. Neben Regressionsgeraden sind jeweils auch Gleitmittel über 5 bzw. 10 Jahre eingezeichnet.

Um die Teilflächen im Land Brandenburg zu lokalisieren, die eine statistisch signifikante Änderung der Sickerwassermenge aufweisen, wurden zusätzlich flächendeckende Trendanalysen durchgeführt. Die zwischen 1961 (Anfangszustand) und 1998 (Endzustand) berechneten und in **Abb. 4.8** dargestellten Änderungen der Sickerwassermenge 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 statistisch signifikante Änderungen der Sickerwassermenge aufweisen. Bei diesen Flächen handelt es sich ohne Ausnahme um grundwassernahe Flächen (Niederungsgebiete), deren ohnehin geringe Sickerwasserbildung um bis zu etwa 100 mm/Jahr weiter absinkt. Dies wird deutlich anhand der in **Abb. 4.9** dargestellten Lage dieser Flächen im Höhenmodell.



**Abb. 4.8:** Veränderungen der Grundwasserneubildung im Land Brandenburg im Zeitraum 1961-1998.



**Abb. 4.9:** Lage der Teilflächen, für die eine signifikante Änderung der Sickerwassermenge zwischen 1961 und 1998 berechnet wurde.

Die durchgeführte Analysen zeigen, dass sich die Grundwasserneubildung in Brandenburg im Zeitraum 1961-1998 deutlich verringert hat. So weisen etwa  $\frac{3}{4}$  der Gesamtfläche Brandenburgs eine Abnahme dieser Wasserhaushaltsgröße auf, knapp 5 % zeigen statistisch signifikante Änderungen mit einem Rückgang von bis zu 100 mm/Jahr. Bei diesen Flächen handelt es sich ohne Ausnahme um grundwassernahe Flächen wie Feuchtgebiete, Niederungsflächen, Auenbereiche u.ä. Wesentliche Ursachen sind die Abnahme des Niederschlags und die Zunahme der mittleren Tagestemperatur, insbesondere in den 90er Jahren mit ihren dicht aufeinander folgenden „Jahrhundertsommern“.

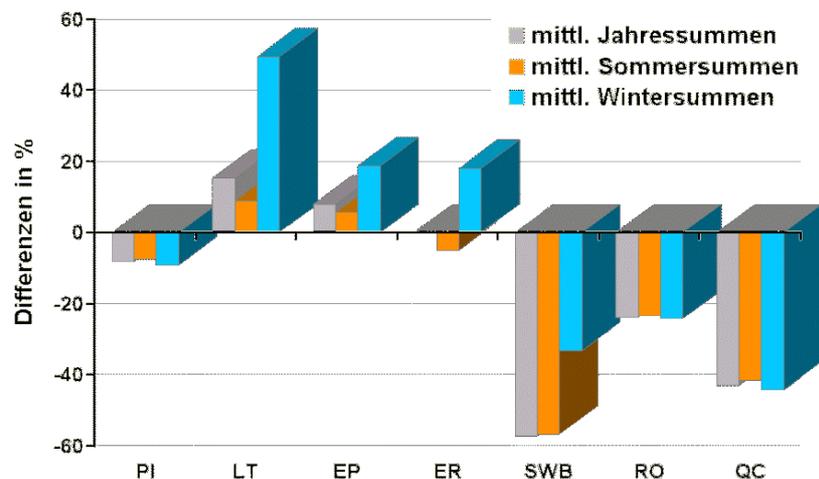
#### 4.5 Hydrologische Auswirkungen von Klimaänderungen

Jede Änderung des Klimas hat direkten Einfluss auf die hydrologischen Prozesse und die regionale Wasserbilanz. Grundsätzlich resultieren die Einflüsse von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt aus räumlichen und innerjährlichen Verschiebungen des Niederschlags, einer Erhöhung der Verdunstung und einer Zunahme von Extremereignissen.

Grundlage und zusätzliche Motivation für die hydrologische „Impaktstudie“ waren auch die oben diskutierten Trendanalysen, die bereits für den Beobachtungszeitraum 1961-1998 eine signifikante Abnahme der Sickerwasserbildung auf grundwassernahen Flächen im Land Brandenburg ausweisen. Untersuchungen zu den Auswirkungen eines geänderten Klimas auf den Wasserhaushalt fußen auf Annahmen über die zukünftige Entwicklung des regionalen Klimas, die in Form von „Szenarien“ in ein geeignetes hydrologisches Modell eingehen. Wie bereits in Kap. 3.2 dargelegt, wird es auch in Zukunft keine exakten Vorhersagen der Klimaentwicklung geben sondern lediglich Wahrscheinlichkeitsaussagen

über eine mögliche Klimaentwicklung. Deshalb sind die Ergebnisse hydrologischer Studien stets davon abhängig, welche klimatische Entwicklung den Untersuchungen zu Grunde gelegt wird. Für die hier vorgestellten Untersuchungen wurde die in Kap. 3 beschriebene moderate Temperaturerhöhung von 1,4°C für den Zeitraum 2001-2055 angenommen. Zum Vergleich wurden Ergebnisse herangezogen, die auf dem in der Region beobachteten Klima im Zeitraum 1951-2000 beruhen (sogn. „Referenz-„ oder „Ist-Zustand“). Für beide Klimazustände wurden räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Wasserhaushaltsberechnungen durchgeführt.

Die Ergebnisse der für das 1,4°C -Klimaänderungsszenarium auf Jahres- und Halbjahresbasis für das gesamte Land Brandenburg berechneten meteorologischen Eingangs- sowie Wasserhaushaltsgrößen waren bereits in Zusammenhang mit der Beschreibung der mittleren hydrologischen Verhältnisse des derzeitigen Klimazustandes angegeben worden (siehe **Tabelle 4.1**). Der untere Teil dieser Tabelle enthält die zwischen dem 1,4°C-Klimaänderungsszenarium und dem Referenzzustand berechneten Differenzen. Die Darstellung dieser Differenzen in **Abb. 4.10** erlaubt einen direkten Vergleich beider meteorologischen Zustände.



**Abb. 4.10:** Differenzen der für den Referenzzustand (Periode 1951-2000) und das 1,4°C -Klimaänderungsszenarium (Periode 2001-2055) berechneten mittleren Jahres-, Sommer- und Winter-summen der Größen Niederschlag (PI), mittlere Tagestemperatur (LT), potenzielle Verdunstung (EP), reale Verdunstung (ER), Sickerwasserbildung (SWB), Oberflächenabflussbildung (RO) und Gesamtabflusshöhe (QC) im Land Brandenburg.

Danach verringert sich der mittlere Jahresniederschlag PI für das Klimaänderungsszenarium gegenüber dem Referenzzustand um etwa 50 mm/Jahr oder 8,3 %. Der Rückgang im Winter fällt mit 9,1 % etwas stärker aus als im Sommer (7,6 %). Gleiches gilt für die mittlere Tagestemperatur LT, die im Winterhalbjahr prozentual erheblich stärker ansteigt als im Sommerhalbjahr. Dies bedeutet, dass das Klimaänderungsszenarium insbesondere zu einer relativen Erhöhung der Wintertemperaturen führt - mit den entsprechenden Auswirkungen auf die hydrologischen Prozesse.

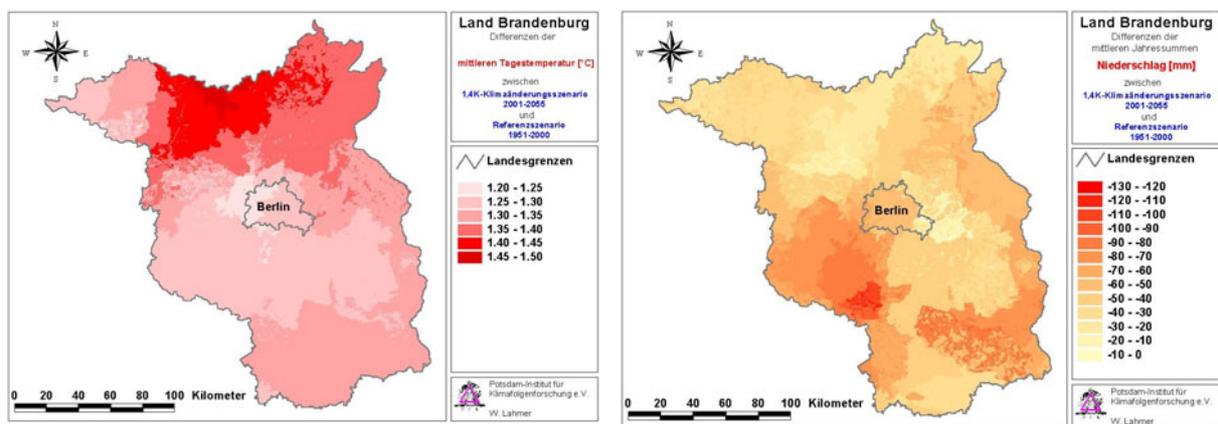
Während sich im Fall der Verdunstung ER bei Betrachtung der mittleren Jahreswerte keine nennenswerte Änderung gegenüber dem Referenzzustand zeigt, liefert die Unterscheidung von Sommer- und Winterwerten einen deutlichen Informationsgewinn. So sinkt die Verdunstung im Sommer deutlich um etwa 20 mm, während 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 Verdunstung im Winter erhöht.

Die Sickerwasserbildung SWB sinkt für das angenommene Klimaänderungsszenarium im langjährigen Mittel beträchtlich, und zwar um etwa 46 mm/Jahr oder 57 %. Die Abnahme von im Jahresmittel 81 mm für den Referenzzustand auf nur noch 34 mm für das 1,4°C -

Szenarium bedeutet eine erhebliche Änderung der regionalen Wasserbilanz mit den entspr. 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°C-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 od. 60 % besonders ausgeprägt. Insbesondere die abnehmenden Niederschläge und die zunehmenden Verdunstungsraten tragen zu dieser Abnahme bei. Dabei sind die Rückgänge im Sommerhalbjahr mit knapp 17 mm geringer als jene im Winterhalbjahr (etwa 27 mm).

Insgesamt zeigen die durchgeführten Analysen zu den Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt somit, dass sich bis zum Jahre 2055 einige der den Landschaftswasserhaushalt bestimmenden Wasserhaushaltsgrößen deutlich verändern werden (siehe auch *Lahmer 2004a/b, Bronstert et al. 2003, Werner et al. 2004*).

Um ortsdiskrete Aussagen zu den zu erwartenden Veränderungen machen zu können, wurden sowohl für den Referenzzustand als auch für das 1,4°C-Klimaszenarium räumliche Verteilungen der meteorologischen Eingangs- und der berechneten Wasserhaushaltsgrößen berechnet. Die **Abb. 4.11** zeigt zunächst die Änderungen der mittleren Tages- und des Niederschlags bei Eintreten des angenommenen Klimaänderungsszenariums.

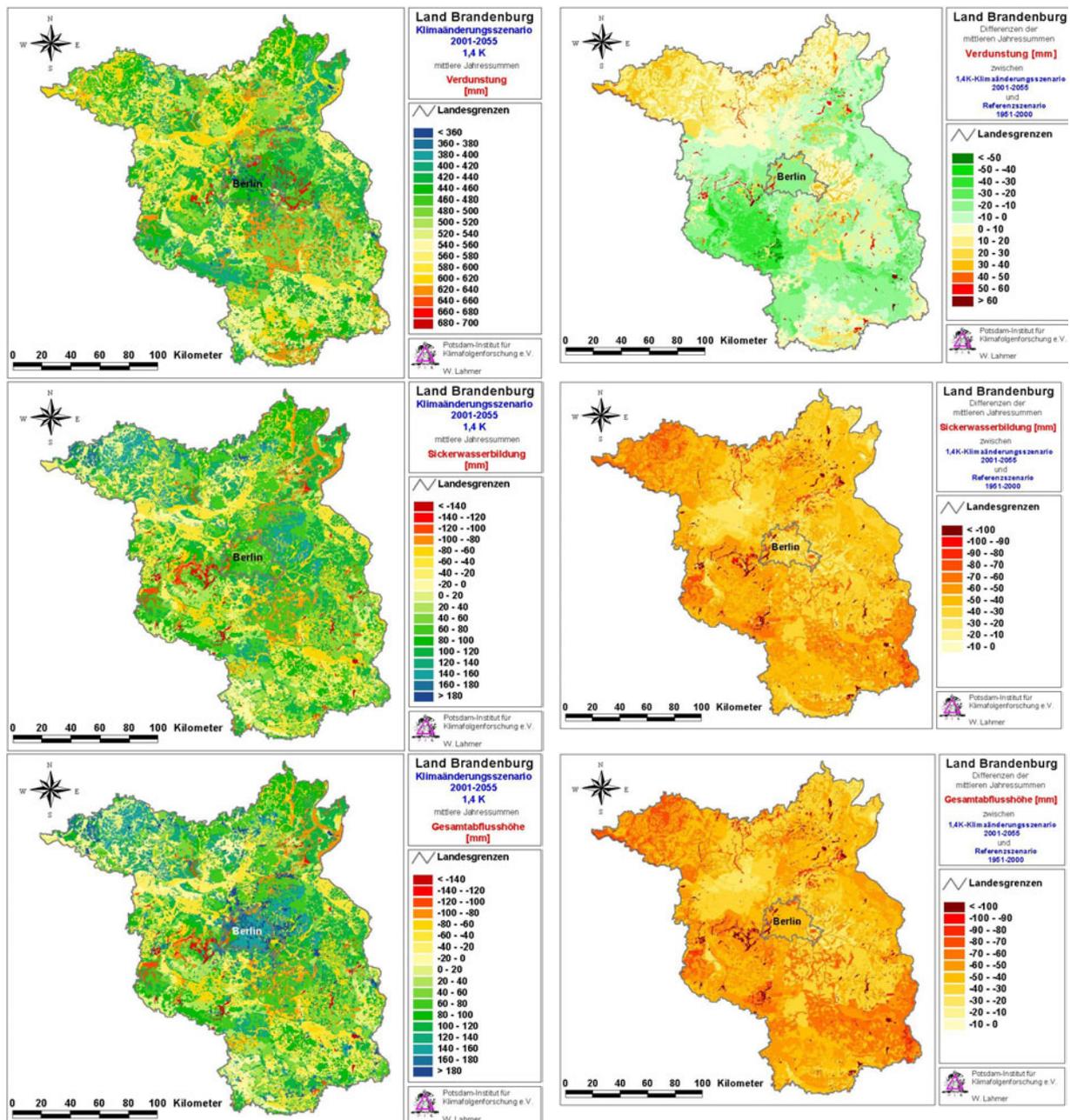


**Abb. 4.11:** Änderungen der mittleren Tages- und des Niederschlags (rechts) im Land Brandenburg bei Eintreten des 1,4°C-Klimaänderungsszenariums (2001-2055).

Die Differenzkarten zeigen, dass insbesondere der nördliche Teil Brandenburgs von der Temperaturerhöhung betroffen ist. Auch beim Niederschlag ist die zukünftige Entwicklung als dramatisch anzusehen. So betragen die Rückgänge lokal bis zu mehr als 100 mm/Jahr, und zwar insbesondere im Süden Brandenburgs. Darüber hinaus entsprechen die Gebiete mit dem stärksten Niederschlagsrückgang denen, wo bereits im Beobachtungszeitraum niedrige Niederschlagssummen und ein negativer Trend beobachtet werden.

Auf der Basis der räumlichen Verteilungen der klimatischen Triebkräfte Lufttemperatur und Niederschlag wurden die räumlichen Verteilungen für die mittleren Jahressummen von Verdunstung, Sickerwasserbildung und Gesamtabflusshöhe berechnet. Die **Abb. 4.12** zeigt die entspr. Karten zusammen mit den zwischen dem 1,4°C-Klimaänderungsszenarium (2001-2055) und dem Referenzzustand (1951-2000) berechneten Differenzen. Im Fall der Verdunstung ER (Abb. 4.12 oben) zeigt der Vergleich zwischen den beiden klimatischen Zuständen besonders deutlich, dass räumlich differenzierte Ergebnisse einen Informationsgewinn gegenüber einfachen Gebietsmittelwerten darstellen können. So ergibt sich unter der angenommenen Klimaänderung für ganz Brandenburg nach Tabelle

4.1 praktisch keine Veränderung von ER. Regional treten aber sehr wohl Differenzen auf, die von lokalen Erhöhungen von 60 mm oder mehr bis zu Rückgängen in der gleichen Größenordnung reichen. Überproportional hohe Zunahmen der Verdunstung sind dabei für offene Wasserflächen und grundwassernahe Flächen zu verzeichnen.



**Abb. 4.12:** Links: Mittlere Jahressummen der Verdunstung, Sickerwasserbildung und Gesamtabflusshöhe für das 1,4°C-Klimaänderungsszenarium (2001-2055) im Land Brandenburg. Rechts: Differenzen zwischen dem Klimaszenarium und dem „Ist-Zustand“ (vgl. Abb. 4.5).

Während sich im Fall der Verdunstung die Veränderungen zwischen dem Referenz- und dem Klimaänderungsszenarium sowohl in Zunahmen als auch in Abnahmen ausdrücken, zeigt die Sickerwasserbildung SWB unter den geänderten Klimabedingungen flächendeckende und z. T. dramatische Abnahmen (vgl. Abb. 4.12 Mitte). Im langjährigen Mittel sinkt SWB in Brandenburg gegenüber dem Ist-Zustand um etwa 57 % (vgl. auch Tabelle 4.1), und zwar insbesondere auf den Flächen, für die die Verdunstung erheblich ansteigt (Niederungs- und Feuchtgebiete, Seen etc.). Dieser drastische Rückgang beruht im Wesentlichen auf den abnehmenden Niederschlägen bei gleichzeitig zunehmenden Tempera-

turen. Neben der Gesamtabflusshöhe stellt die Sickerwasserbildung deshalb die gegenüber Klimaänderungen empfindlichste Wasserhaushaltskomponente dar.

Die Differenzkarte der Gesamtabflusshöhe QC (Abb. 4.12 unten) zeigt starke Korrelationen zur Karte der Sickerwasserbildung. Während QC für den Referenzzustand fast flächendeckend positive Werte aufweist (nach Tabelle 4.1 beträgt der langjährige Mittelwert 101 mm/Jahr), beobachtet man für das 1,4°C-Klimaänderungsszenarium erhebliche Flächenanteile mit negativen Werten. Dies führt zu einer Differenzkarte, die unter der angenommenen Klimaänderung für das gesamte Land Brandenburg Abnahmen ausweist.

#### 4.6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die hydrologischen Untersuchungen zeigen, dass das Land Brandenburg bereits heute deutliche Spuren eines sich ändernden Klimas aufweist. Die durchgeführten Trendanalysen deuten auf erhebliche Auswirkungen auf den regionalen Wasserhaushalt bereits in den vergangenen Jahren hin, die sich unter der angenommenen Klimaänderung noch erheblich verstärken werden. Deutlich wird vor allem die Auswirkungen vergleichsweise kleiner Änderungen meteorologischer Parameter (insbes. Temperatur und Niederschlag) auf Wasserhaushaltsgrößen wie Verdunstung, Grundwasserneubildung oder Gebietsabfluss (siehe Abb. 4.10) – ein deutliches Indiz für die starken Nichtlinearitäten in natürlichen Systemen und die dort ablaufenden Prozesse.

Zurückgehende Niederschläge und ihre zeitliche Verlagerung vom Sommer- in das Winterhalbjahr sowie gleichzeitig zunehmende Verdunstung werden - insbesondere in den Sommermonaten - zu erheblichen negativen Auswirkungen führen. So ist bei Eintreten der angenommenen klimatischen Veränderungen im Jahre 2055 mit einer Grundwasserneubildung zu rechnen, die sich insbesondere auf Flächen mit oberflächennahem Grundwasser (i.A. besonders schützenswerte Landschaftsräume) erheblich verringern und um mehr als die Hälfte unter der heutigen liegen wird. Die Abnahmen von Sickerwasserbildung und Gebietsabfluss würde insbesondere in den trockenen Sommermonaten dazu führen, dass die Grundwasserstände und die Wasserstände in den Flüssen merklich sinken und damit auch die Wasserqualität erheblich leidet. Viele heute noch vorhandene Moore könnten trocken fallen und Niederungen wie Luchgebiete in ihrer vielfältigen ökologischen Funktion verloren gehen. Gerade diese Gebiete stellen wegen der hohen Verdunstungs- und geringen Grundwasserneubildungsraten die gegenüber Klimaänderungen besonders empfindlichen Naturräume dar.

Da das in dieser Studie verwendete 1,4 °C-Klimaänderungsszenarium als relativ „konservativ“ einzustufen ist, könnten die zu erwartenden Veränderungen im hydrologischen Regime allerdings noch durchaus ungünstiger ausfallen. Deshalb sollte mit dem Gut Wasser in Zukunft noch effizienter umgegangen und die Auswirkungen klimatischer Änderungen bei hydrologisch relevanten, mittel- bis langfristigen politischen Entscheidungsfindungen nicht außer Acht gelassen werden. Zu den wesentlichen Elementen einer zukunftsorientierten Vorsorgestrategie gehört auch die Erhöhung des Gebietswasserrückhaltes, z. B. durch die Rückführung unangepasster Landnutzungen oder die Beendigung der Trockenlegung von Feuchtgebieten, sowie die Renaturierung von Flussläufen und die Beseitigung der weiteren Zweckentfremdung von Retentionsräumen unter dem Aspekt des Hochwasserschutzes, um unerwünschte, auch sozioökonomische Folgen zunehmender Extremereignisse zu mindern.

Will man den wasserbezogenen Problemen, die sich aus den neuen Bedrohungen aufgrund des Klimawandels (aber nicht nur daraus) ergeben, sinnvoll begegnen, so ist insgesamt der Blick zu weiten, und zwar weg von eindimensionalen Problemlösungsansätzen hin zu einer ganzheitlichen Betrachtung komplexer Systeme. Eine wichtige Rolle kann dabei ein disziplinübergreifendes Flusseinzugsgebietsmanagement entsprechend den Vorgaben der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) spielen, wie es gegenwärtig auch in Deutschland in verschiedenen Projekten zum Thema „Flusseinzugsgebietsmanagement“ umgesetzt wird (siehe auch *Lahmer 2003, Stock und Lahmer 2004, Lahmer 2005*). Nur durch solche Ansätze werden sich die komplexen Probleme lösen lassen, de-

nen sich Wissenschaft, Gesellschaft und politisch Verantwortliche in Zukunft stellen müssen.

Detailliertere Informationen zu den in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen können den in der Literaturliste aufgeführten Publikationen entnommen werden, die z.T. unter [www.pik-potsdam.de/~lahmer](http://www.pik-potsdam.de/~lahmer) heruntergeladen werden können.

## 5 Forstwirtschaft

### 5.1 Problemstellung

Auf Grund des großen Flächenanteils an der vegetationsbedeckten Erdoberfläche sind Wälder der wichtigste Kohlenstoffspeicher in der terrestrischen Biosphäre. Dieser Kohlenstoffspeicher ändert sich mit der Assimilation von atmosphärischem CO<sub>2</sub> (Photosynthese), der Freisetzung von Kohlenstoff (Respirationsprozesse), dem Austrag mit dem Versickerungswasser und der Entnahme durch Holzernte und weitere Nutzungen. Photosynthese und Respiration variieren als Funktion des Wetters (bzw. Klimas), der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration, der Nährstoffdeposition und -verfügbarkeit im Boden, der Schadstoffimmission und der Bewirtschaftungsmaßnahmen. Die Kohlenstoffspeicherfunktion von Wäldern gewinnt u.a. in Zusammenhang mit dem Kyoto-Protokoll zunehmend an Bedeutung.

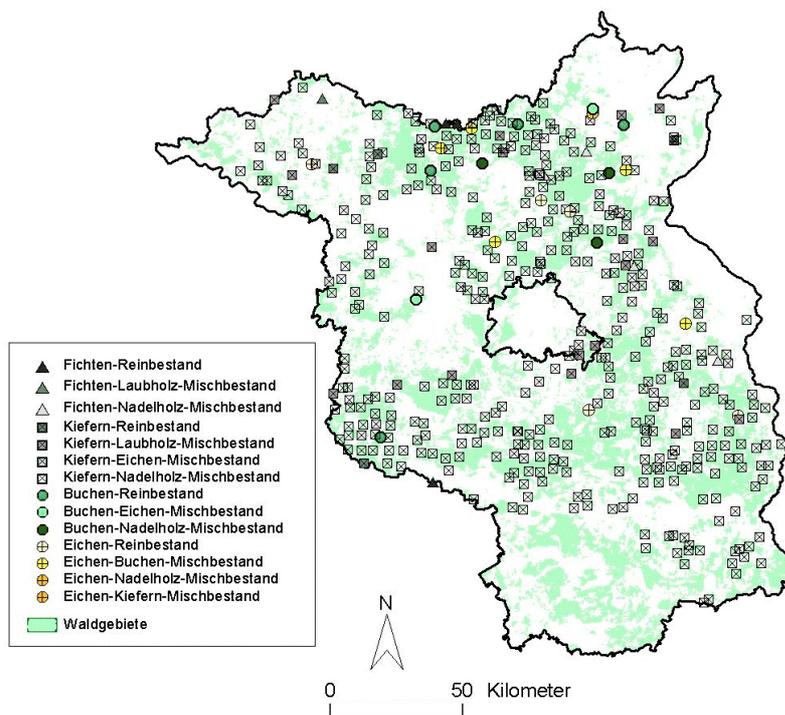
Wälder bedecken fast ein Drittel der Fläche von Brandenburg (ca. 1 Million ha) und beeinflussen die regionale Wasserbilanz erheblich. Die wirtschaftliche Nutzung der Wälder stellt zusammen mit der Bedeutung für den Tourismus einen wichtigen ökonomischen Faktor dar. Klimaänderungen (vor allem solche mit Niederschlagsreduktionen) könnten sich deshalb u.U. negativ auswirken.

### 5.2 Methodik und Daten

Um die Folgen möglicher Klimaänderungen abzuschätzen, wurde das Waldwachstumsmodell 4C (FORESEE - FORESt Ecosystems in a changing Environment) eingesetzt, das die Waldentwicklung unter Klimaeinfluss beschreibt. Damit gewonnene Informationen über Wachstumstrends und Konkurrenzverhältnisse können als Basis für die Planung und

Bewertung von Bewirtschaftungsstrategien dienen. Einzelheiten zum Modell 4C können dem PIK-Report 83 (*Gerstengarbe et al. 2003*) entnommen werden.

Ausgehend vom Ist-Zustand startet das Modell 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) und der Forsteinrichtungsdatenbank mit Angaben zu Bestandes- und Standortverhältnissen verknüpft



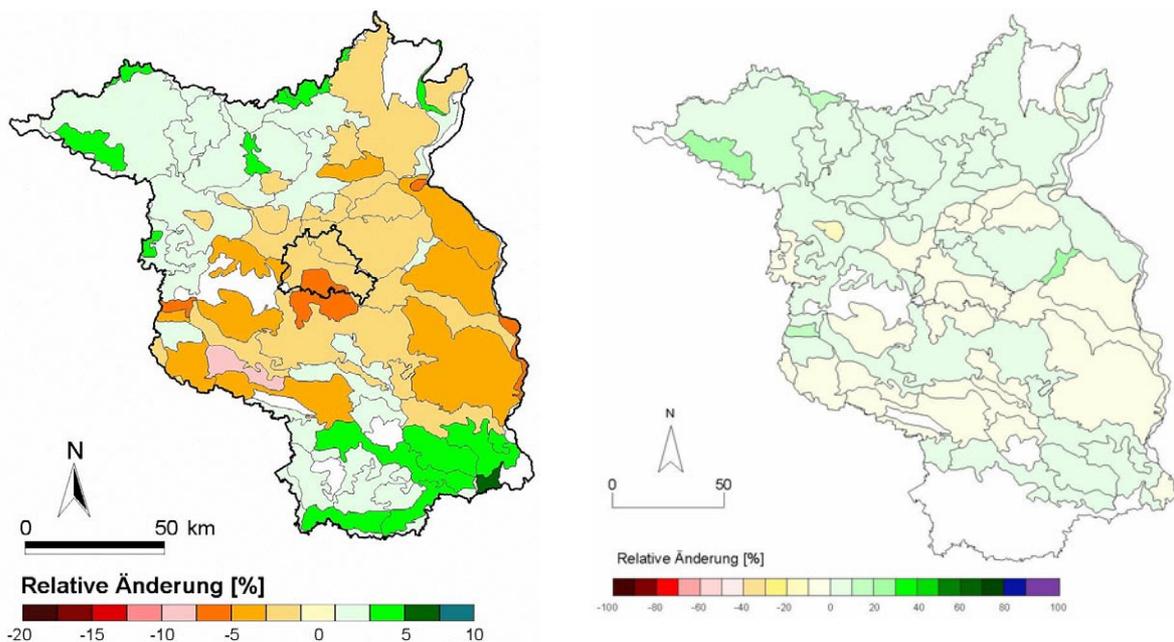
**Abb. 5.1:** Karte der verwendeten ÖWK-Punkte (Ökologische Waldzustandskontrolle) in Brandenburg, die in die Untersuchung des Stoffhaushalts eingehen.

wurde. Die Flächen des ÖWK-Netzes sind für ca. 80% der Standortbedingungen in Brandenburg repräsentativ. In diesem Rasternetz wurden nur Bestände betrachtet, die älter als 40 Jahre sind (ungefähr 70% der Waldbestände Brandenburgs). 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 vorlagen. Als Triebkräfte wurden Zeitreihen für Temperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte und Globalstrahlung verwendet. **Abb. 5.1** zeigt die ausgewählten ÖWK-Flächen und ihren Waldtyp.

Mit 4C wurden an den 461 ÖWK-Punkten Simulationen für das Basisszenarium (Klima 1951-2000) und für das Klimaänderungsszenarium (Klima 2001-2050) durchgeführt. Die Bewirtschaftung der Waldbestände erfolgte in Form von Totholzentnahmen. 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. Weiterhin wurde die mittlere jährliche Netto-Ökosystemproduktion NEP (gemittelt über den Simulationszeitraum) zur Einschätzung der jährlichen C-Speicherungsrate herangezogen. Diese Größe beschreibt die jährliche Nettospeicherung im Ökosystem. Auf der Grundlage einer Wuchsbezirkkarte wurden die Ergebnisse der Einzelsimulationen aggregiert.

### 5.3 Kohlenstoffspeicherung und Produktivität

Die gesamte Kohlenstoffspeicherung der ÖWK-Bestände steigt in 50 Jahren unter heutigem Klima von 214 t C/ha auf 487 t C/ha (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 **Abb. 5.2** ist die absolute Änderung des Kohlenstoffspeichers unter dem Klimaszenarium im Verhältnis zum Basisszenarium als räumliche Verteilung dargestellt. Danach ist die totale C-Speicherung unter den geänderten Klimabedingungen im Norden Brandenburgs überwiegend höher als unter den gegenwärtigen Bedingungen. Im Süden Brandenburgs führt das Klimaszenarium dagegen größtenteils zu einer geringeren C-Speicherung.



**Abb. 5.2:** Darstellung der absoluten Änderung der Kohlenstoffspeicherung unter dem Klimaszenarium verglichen mit dem Basisszenarium.

**Abb. 5.3:** Karte der relativen Änderung der NEP unter dem Klimaszenarium verglichen mit dem Basisszenarium.

Unter dem Klimaszenarium haben die Bestände im Mittel eine geringere Produktivität (NEP) als unter dem Basisszenarium. 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 im Klimaänderungsszenarium. Die relative Änderung der NEP im Verhältnis zum Basisszenarium ist in **Abb. 5.3** dargestellt. Die Karte zeigt, dass unter geänderten Klimabedingungen insbesondere im trockeneren Süden Brandenburgs die Kohlenstoffspeicherung etwas zurück geht, während sie im Norden leicht zunimmt.

#### **5.4 Schlussfolgerungen und Ausblick**

Die Untersuchungen zu den möglichen Auswirkungen einer angenommenen Klimaänderung auf die Produktivität und ausgewählte Funktionen von Waldökosystemen in Brandenburg zeigen einen Zusammenhang zwischen der klimatischen Änderung und der Produktivität der Waldbestände sowie ihrer Funktion im regionalen Wasserhaushalt. Die Auswirkungen des 1,4°C-Klimaszenariums auf den Wasserhaushalt sind gravierender als auf die Kohlenstoffspeicherung, d.h. auf die Produktivität der Bestände. Die moderaten Änderungen von Temperatur und Niederschlag führen aber 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 von der Bestandeszusammensetzung abhängig. Klimaszenarien, die andere Ausprägungen der Klimaänderung realisieren, können zu deutlich anderen Ergebnissen bezüglich der Produktivität führen, insbesondere wenn es zu einer stärkeren Abnahme des Niederschlags kommt.

Die Modellrechnungen 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 Ergebnisse noch nicht ein. Auf Grund geringerer Interzeptions- und Transpirationsverluste außerhalb der Vegetationsperiode gewährleisten Laubwälder einen höheren Grundwassereintrag als Nadelwälder. In einem Klima mit verringerten Niederschlägen würden Laubmischwälder deshalb für eine günstigere Bilanz des Wasserhaushalts zu Gunsten der Grundwasserneubildung sorgen.

In zukünftigen Untersuchungen sollen die Alterstruktur der Bestände sowie die Wirkungen von Bewirtschaftung (z.B. Waldumbau, verschiedene Umtriebszeiten, Durchforstungsstärken- und -formen) und Landnutzungsänderung (z.B. Aufforstungen) berücksichtigt werden. Durch die Simulation von Bewirtschaftungsmaßnahmen können dann verschiedenste Strategien als Reaktion auf mögliche Klimaänderungen untersucht werden. Für die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Wälder 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 von Klimaänderungen über einen längeren Zeitraum noch deutlicher ausprägen. Daneben besteht die Notwendigkeit, in zukünftige Untersuchungen die Auswirkungen extremer Ereignisse wie Stürme, Hochwasser oder Trockenperioden einzubeziehen, um der Forstwirtschaft die Möglichkeit zur modellgestützten Entscheidungsfindung zu geben.

## **6 Landwirtschaft**

### **6.1 Problemstellung**

Die landwirtschaftliche Produktion in Brandenburg ist während der Frühlings- und Sommermonate sehr stark wasserlimitiert. Eine regionale Erwärmung würde diese Limitierung verstärken, wenn sie nicht mit einem gleichzeitigen Anstieg der regionalen Niederschläge verbunden wäre. Ertragsrückgänge bei einer Vielzahl landwirtschaftlicher Kulturen wären die Folge. Allerdings müssen Klimaänderungen 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 Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration direkte, eher positive Folgen für das Pflanzenwachstum hat, da er die Photosynthese stimuliert und die Wassernutzungseffizienz der Pflanzen erhöht.

Durch den Trend zu abnehmenden Sommerniederschlägen bei leicht zunehmenden Winterniederschlägen in den letzten Jahren hat sich die Anfälligkeit der Landwirtschaft gegenüber jahresbedingten Witterungsschwankungen verstärkt. Dem kann zwar teilweise durch Rückstau von Überschusswasser und dessen Nutzung zur Zusatzberegnung begegnet werden, doch erhöhen sich gleichzeitig die Kosten für die landwirtschaftliche Produktion. Folge könnte eine abnehmende Wettbewerbsfähigkeit Brandenburger Agrarproduzenten sein.

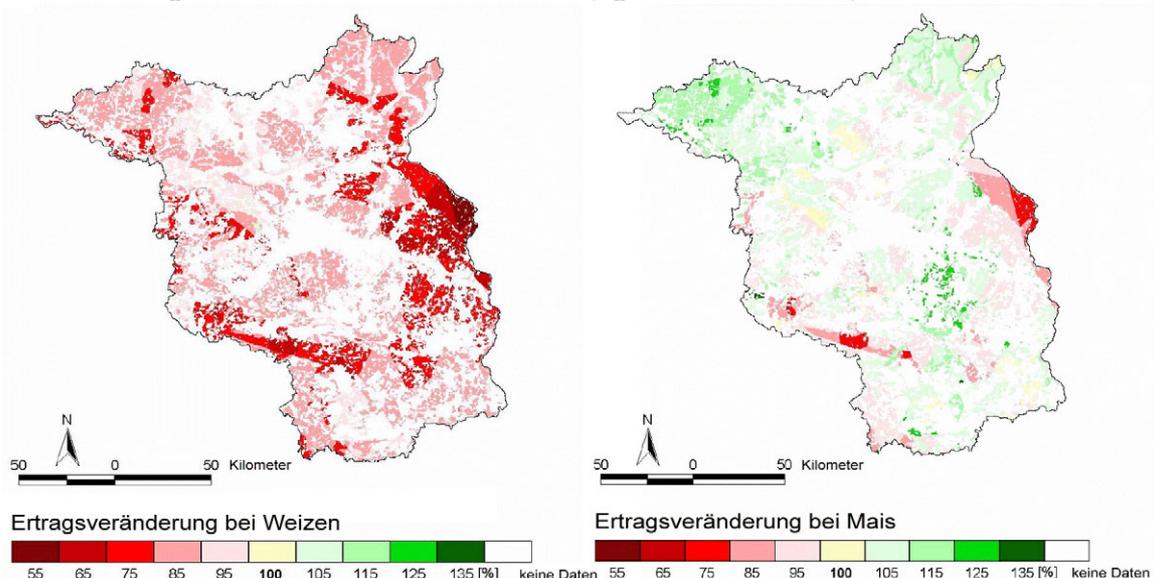
Da die Landwirtschaft in Brandenburg sehr sensitiv auf Änderungen in den hydrologischen Verhältnissen reagiert, bieten regionalisierte Klimaszenarien die Möglichkeit, Umfang und Struktur dieser Reaktion zu untersuchen. Im Folgenden werden die Wirkungen eines möglichen Klimawandels auf den Ertrag der Kulturen Winterweizen, Wintergerste und Mais illustriert (Auswirkungen auf ausgewählte Aspekte des Wasserhaushaltes sind dem PIK-Report 83 zu entnehmen). Dabei werden die Ergebnisse für den Zeitraum 2040-2050 (Klimaszenarium) mit denen der Referenzperiode 1980-1990 (beobachtete klimatische Verhältnisse) verglichen. Für den Zeitraum 2040-2050 steigen die mittleren Jahrestemperaturen gegenüber dem Vergleichszeitraum 1980-1990 um  $1,7^{\circ}\text{C}$ , und der mittlere Jahresniederschlag verringert sich von 552 mm auf 478 mm.

## 6.2 Methodik

Das Modell SWIM (Soil and Water Integrated Model; *Krysanova et al. 1998*) erlaubt es, die Folgen von Klimaänderungen auf den Gebietswasserhaushalt und das Wachstum landwirtschaftlicher und sonstiger Vegetation simultan zu behandeln. SWIM beschreibt die hydrologischen, die Vegetations-, die Nährstoff- (Stickstoff N und Phosphor P) sowie die Sedimenttransportprozesse in Flussgebieten. Auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen wird die Dynamik der Vegetation mit Ansätzen beschrieben, die nicht nur summarisch Wachstum und Entwicklung der Vegetation beschreiben, sondern auch die Entstehung eines Ertrages an Körnern, Knollen oder vegetativer Biomasse. Weitere Einzelheiten zur Methodik und zum Modell SWIM sind wiederum dem PIK-Report 83 zu entnehmen.

## 6.3 Auswirkungen auf die Erträge

Die angenommene Klimaänderung führt in den Monaten Mai bis Juli zu einem Rückgang der Evapotranspiration um 13%. Am stärksten wirkt sie auf die Grundwasserneubildung, die besonders deutlich in den Wintermonaten zurückgeht. Mit dem Rückgang der Evapotranspiration aufgrund des verminderten Bodenwasservorrates verringern sich die mittleren Erträge von Winterweizen um 17% (vgl. **Abb. 6.1** links).



**Abb. 6.1:** Relative Änderungen der durchschnittlichen potentiellen Erträge von Weizen und Mais in der Periode 2040-2050 gegenüber der Referenzperiode 1980-1990 (ohne Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Effektes auf die Photosynthese).

Der Maisertrag steigt leicht an (+2%) (**Abb. 6.1** rechts), was auf die verlängerte Vegetationsperiode zurückzuführen ist. Berücksichtigt man die Photosynthese-Stimulierung des sich abzeichnenden Anstiegs der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration von 346 ppm im Mittel der 80er Jahre auf 436 ppm im Mittel der Periode 2040-2050, so verringern sich die klimabedingten Ertragsverluste beim Weizen auf 10%. Bei Anbau von Gerste und Mais könnten dann sogar leichte Ertragsgewinne realisiert werden (Gerste: +7%, Mais: +8%).

#### **6.4 Schlussfolgerungen und Ausblick**

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 sich der Trend zur Grundwasserabsenkung nach diesem Szenarium fortsetzen wird. Dies schränkt die künftigen Möglichkeiten zur Nutzung von Grundwasser zur Beregnung insbesondere von landwirtschaftlichen Intensivkulturen ein. Die Ergebnisse beruhen auf der Annahme einer mittleren Klimaentwicklung. Nicht berücksichtigt wurden extreme Ereignisse wie Starkniederschläge oder lange Trockenperioden. Da sich Häufigkeit und Intensität solcher Ereignisse aber im Rahmen der zu erwartenden Klimaänderungen verstärken werden, soll die Erforschung der Auswirkungen extremer Wetterlagen in Zukunft stärker in den Mittelpunkt gestellt werden.

### **7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

In der PIK-Studie werden die Auswirkungen einer moderaten globalen Klimaänderung auf den Landschaftswasserhaushalt, die naturnahen Ökosysteme, bewirtschaftete Wälder, die landwirtschaftlichen Erträge und andere wirtschaftliche Aspekte dargestellt. Vielleicht die wichtigste 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 zu Grunde gelegte Veränderung ist als sehr viel wahrscheinlicher anzusehen als die bislang implizit zu Grunde gelegte Annahme alles bliebe „beim Alten“. Das Szenarium stellt keinesfalls die schlimmste anzunehmende Entwicklung dar, sondern eine von hoher Wahrscheinlichkeit, die bereits heute feststellbare Trends in die Zukunft hinein bis 2055 weiterverfolgt.

Die Ergebnisse basieren auf der Annahme einer mittleren Klimaentwicklung. Nicht eingegangen sind extreme Ereignisse wie Starkniederschläge und lange Trockenperioden. Da sich diese aber in ihrer Häufigkeit und Intensität verstärken werden, soll in Zukunft die Erforschung der Auswirkungen von extremen Wetterlagen stärker in den Mittelpunkt gestellt werden. Die sich abzeichnenden Entwicklungen hinsichtlich der langfristigen Trends von Temperatur, Niederschlag und anderen Klimaparametern ergeben andererseits bereits gravierende Auswirkungen. Diese Aussagen sind als sehr viel gesicherter anzusehen als Angaben und Folgerungen hinsichtlich der Schwankungen und Extremwerte.

Sorge machen vor allem 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 1961-1998 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 1,4°C-Szenarium 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.

Die Analyse repräsentativer Waldstandorte in Brandenburg zeigt, dass die Auswirkungen des Klimaänderungsszenariums zu einem drastischen Rückgang des Grundwassereintrags der Wälder führt. Die Auswirkungen auf das Wachstum und damit auf die Kohlenstoffspeicherung fallen in den angenommenen 50 Jahren vergleichsweise moderat aus. Dennoch sollten die von der Forstwirtschaft betrachteten längeren Zeithorizonte und Aspekte der Waldbewirtschaftung in zukünftigen Studien mit einbezogen werden, da die Klimaänderung danach noch erheblich dramatischere Entwicklungen zeigen könnte.

Als wichtigste Maßnahme wird empfohlen, den Aspekt der Klimaänderung bei Waldumbauprogrammen im Zusammenhang mit der Diskussion verschiedener Alternativen der Wald- und Landnutzung zu berücksichtigen. Dadurch kann möglichen negativen Entwicklungen beim Wasserhaushalt und Risiken durch Waldbrand oder Schädlingsbefall begegnet werden. 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 der Studie untersuchten Auswirkungen der Klimaänderung, so wird deutlich, dass sich diese Konflikte zukünftig noch verstärken könnten. Die Abnahme der Grundwasserressourcen hat Auswirkungen auf die landwirtschaftlichen Erträge in Brandenburg. Trotz eines über den Szenarienzeitraum steigenden CO<sub>2</sub>-Düngeeffektes auf die Pflanzen werden sich unter den Szenarienbedingungen die Winterweizenerträge für den Zeitraum 2040-2050 um 17% gegenüber den heutigen Erträgen verringern, während die Maiserträge um 2% steigen (ohne Berücksichtigung von Photosynthese-Stimulierung).

Die Landschaft in Brandenburg ist 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 gering durch den Menschen beeinflussten naturnahen Regionen gerecht wird.

Was das Spannungsfeld Klimaänderungen – Bodenschutz betrifft, so ergibt sich aus der bereits beobachtbaren Klimaänderung, viel mehr noch aber aus der in der PIK-Studie angenommenen klimatischen Entwicklung in den nächsten 50 Jahren ein erweiterter Forschungs- und Entwicklungsbedarf, der letztendlich in praxisnahen Handlungsempfehlungen münden sollte. So werden höhere Temperaturen, geringere Niederschläge und längere Trockenperioden zu einer besonders im Sommer verringerten Bodenfeuchte und zu einer steigenden Erosionsgefahr führen („Versteppung“). Dies hat unmittelbare Auswir-

kungen auf die landwirtschaftliche Nutzung, insbesondere dann, wenn diese auf bereits als „schlecht“ klassifizierten Böden wie beispielsweise in Brandenburg stattfindet. Als vorbeugende Maßnahmen im Bereich der Landwirtschaft käme ein weiterer Ausbau der konservativen Bodenbearbeitung und des Zwischenfruchtanbaus in Frage, die der steigenden Verdunstung auf den genutzten Flächen entgegen wirken. Im Bereich der Forstwirtschaft sollte der begonnene Waldumbau forciert werden, um ebenfalls dem Problem erhöhter Verdunstung entgegenzuwirken, das sich für ausgedehnte Nadelwaldbestände insbesondere in den Wintermonaten verschärfen wird. Grundsätzlich sollte alles getan werden, um der drohenden Wasserknappheit entgegenzuwirken. Zu solchen Maßnahmen gehört die generelle Erhöhung des Wasserrückhaltes in der Landschaft, z.B. in Zusammenhang mit der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie, die den Blick weg von eindimensionalen Betrachtungen und hin zu multidisziplinär angelegten Sichtweisen lenkt.

## 8 Literatur

Für diejenigen Leser, die sich intensiver mit der Klimaänderungsproblematik und deren Auswirkungen beschäftigen wollen, wird im folgenden eine kleine (nicht vollständige Literaturauswahl) angeboten.

- Becker, A., Klöcking, B., Lahmer, W. and 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.
- Bronstert, A., Lahmer, W. und Krysanova, V. (2003). Klimaänderung in Brandenburg und Folgen für den Wasserhaushalt. In: Landesumweltamt Brandenburg (Hrsg.): Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg, Heft 3, 2003, S. 72-79.
- Gerstengarbe, F.-W., Badeck, F., Hattermann, F., Krysanova, V., Lahmer, W., Lasch, P., Stock, M., Suckow, F., Wechsung, F. und Werner, P. C. (2003). Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. Studie im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg. PIK-Report Nr. 83, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., Juni 2003, ISSN 1436-0179.
- Gerstengarbe, F.-W. und Werner, P.C. (1997). Waldbrandentwicklung im Land Brandenburg. Der Wald, 7, 392-394
- IPCC (2001). Climate change 2000, Summary for policy makers. Cambridge University Press, Cambridge UK
- Krysanova, V., Müller-Wohlfel, 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.
- Lahmer, W. (2003). Ein neues Jahrzehnt der „Jahrhundertssommer“?- Klimaänderung, Wasserwirtschaft, Strategien. „Stachlige Argumente“, Zeitschrift von Bündnis 90 / Die Grünen, Landesverband Berlin, Heft 4/2003, Nr. 142, September 2003, 24-27.
- Lahmer, W. (2004a). Hydrologische Auswirkungen sich ändernder Klimabedingungen im Land Brandenburg. GWF Wasser-Abwasser 145, Nr. 6, Oldenbourg Industrieverlag München, ISSN 0016-3651, Juni 2004, S. 400 - 412.
- Lahmer, W. (2004b). Klimawandel - Hochwasser, Dürren, Vorsorgestrategien. Beitrag zum Thema „Hochwasservorsorge und Flussgebietsmanagement in verschiedenen europäischen Ländern mit Blick auf die EU-Osterweiterung“. Tagung der Heinrich Böll-Stiftung Thüringen e.V. in Zusammenarbeit mit BUND Thüringen e.V. und Stadtwerke Jena-Pößneck GmbH am 29.04.2004 in Jena ([http://www.living-rivers.de/hochwassertagung/vortraege/Klimawandel\\_W\\_Lahmer.pdf](http://www.living-rivers.de/hochwassertagung/vortraege/Klimawandel_W_Lahmer.pdf)).
- Lahmer, W. (2005). GIS-basiertes Szenarienanalyse- und Bewertungstool zur Darstellung von Wassermenge und Wasserqualität im Gewässersystem. Endbericht des Teilprojektes 8 des BMBF-Verbundvorhabens „Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel“, BMBF-Förderkennzeichen 0330227, April 2005 (wie alle übrigen Endberichte des Verbundvorhabens integriert in das vom Teilprojekt 8 erstellte Informations- und Entscheidungsfindungssystem „DSS-Havel“)
- Lahmer, W. (2005). Klimaänderung – Mögliche Folgen auf hydrologische Prozesse im Land Brandenburg. UMWELTPanorama, Heft 7, 2005, Berliner Umweltagentur, Berlin, ISSN 1612-5061, S. 5-7.

- Lahmer, W. und Pfützner, B. (2003). Orts- und zeitdiskrete Ermittlung der Sickerwassermenge im Land Brandenburg auf der Basis flächendeckender Wasserhaushaltsberechnungen. PIK-Report Nr. 85, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., September 2003, ISSN 1436-0179.
- Lahmer, W., Steidl, J., Dannowski, R., Pfützner, B., Schenk, R. (2001). Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg. Landesumweltamt Brandenburg (Hrsg.). Studien und Tagungsberichte, Band 27, ISSN 0948-0838, Eigenverlag, Potsdam, Dezember 2000.
- Pfützner, B. (ed.) (2002). Description of ArcEGMO. Official homepage of the modelling system ArcEGMO, <http://www.arcegmo.de>, ISBN 3-00-011190-5.
- Stock, M. und Lahmer, W. (2004). Brandenburg: eine Region im Klimawandel – Seenreichtum und drohender Wassermangel. In: Lozan, J.L., Graßl, H., Hupfer, P., Menzel, L., Schönwiese, C.D. (2004)(Hrsg.): „Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle“? Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, ISBN 3-9809688-0-1, in Kooperation mit GEO Das Reportage Magazin, Hamburg (siehe auch <http://www.rrz.uni-hamburg.de/Wasser/>).
- Stock, M. und Toth, F. (Hrsg.) (1996). Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Land Brandenburg - Pilotstudie. Bericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung e.V. (PIK) für das Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg. PIK, 1996. RoduServ GmbH Verlagsservice, Berlin.
- Werner, P.C., F.-W. Gerstengarbe, M. Baumann, T. Eickhof, A. Fieback, T. Fischer, I. Hartmann, W. Lahmer, P. Lasch, T. Meiritz, H. Munderloh, A. Nauels, T. Schiller, V. Schüler, R. Sprötte, E. Stabler, U. Weddige (2004). Entdeckungen entlang der Märkischen Eiszeitstraße - Das Klima im Gebiet der Märkischen Eiszeitstraße zwischen 1951 und 2055, Eberswalde 2004.

## 9 Verzeichnis der Abbildungen

<b>Abb. 3.1:</b> Bandbreite der möglichen mittleren globalen Temperaturänderungen im 21. Jahrhundert.....	35
<b>Abb. 3.2:</b> Räumliche Verteilung der Differenzen des Jahresmittels der Lufttemperatur 2046/2055 - 1951/2000 .....	36
<b>Abb. 3.3:</b> Räumliche Verteilung der Differenzen der Jahressumme des Niederschlags 2046/2055 - 1951/2000 .....	36
<b>Abb. 4.1:</b> Landnutzungskarte für das Land Brandenburg.....	38
<b>Abb. 4.2:</b> Bodenkarte für das Land Brandenburg .....	38
<b>Abb. 4.3:</b> Grundwasserflurabstandskarte für das Land Brandenburg.....	38
<b>Abb. 4.4:</b> Digitales Höhenmodell und Gefälle für das Land Brandenburg .....	38
<b>Abb. 4.5:</b> Karten der für das Land Brandenburg berechneten Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung, Sickerwasserbildung, Oberflächenabflussbildung und Gesamtabflusshöhe für das Referenzszenarium (beobachtetes Klima im Zeitraum 1951-2000). .....	40
<b>Abb. 4.6:</b> Änderungen der an 350 Messstellen im Zeitraum 1970-1999 in Brandenburg gemessenen Grundwasserstände (Quelle: Landesumweltamt Brandenburg) .....	40
<b>Abb. 4.7:</b> Zeitliche Entwicklung der Größen Niederschlag, mittlere Tagestemperatur, klimatische Wasserbilanz, Verdunstung, Sickerwasserbildung und Gebietsabfluss im Land Brandenburg für den Zeitraum 1961-1998. Neben Regressionsgeraden sind jeweils auch Gleitmittel über 5 bzw. 10 Jahre eingezeichnet. ....	41
<b>Abb. 4.8:</b> Veränderungen der Grundwasserneubildung im Land Brandenburg im Zeitraum 1961-1998.....	42
<b>Abb. 4.9:</b> Lage der Teilflächen, für die eine signifikante Änderung der Sickerwassermenge zwischen 1961 und 1998 berechnet wurde. ....	42
<b>Abb. 4.10:</b> Differenzen der für den Referenzzustand (Periode 1951-2000) und das 1,4°C - Klimaänderungsszenarium (Periode 2001-2055) berechneten mittleren Jahres-, Sommer- und Wintersummen der Größen Niederschlag (PI), mittlere Tagestemperatur (LT), potenzielle Verdunstung (EP), reale Verdunstung (ER), Sickerwasserbildung (SWB), Oberflächenabflussbildung (RO) und Gesamtabflusshöhe (QC) im Land Brandenburg. ....	43
<b>Abb. 4.11:</b> Änderungen der mittleren Tagestemperatur (links) und des Niederschlags (rechts) im Land Brandenburg bei Eintreten des 1,4°C-Klimaänderungsszenariums (2001-2055).....	45
<b>Abb. 4.12:</b> Links: Mittlere Jahressummen der Verdunstung, Sickerwasserbildung und Gesamtabflusshöhe für das 1,4°C-Klimaänderungsszenarium (2001-2055) im Land Brandenburg. Rechts: Differenzen zwischen dem Klimaszenarium und dem „Ist-Zustand“ (vgl. Abb. 4.5). ....	45
<b>Abb. 5.1:</b> Karte der verwendeten ÖWK-Punkte (Ökologische Waldzustandskontrolle) in Brandenburg, die in die Untersuchung des Stoffhaushalts eingehen. ....	47
<b>Abb. 5.2:</b> Darstellung der absoluten Änderung der Kohlenstoffspeicherung unter dem Klimaszenarium verglichen mit dem Basisszenarium. ....	48
<b>Abb. 5.3:</b> Karte der relativen Änderung der NEP unter dem Klimaszenarium verglichen mit dem Basisszenarium. ....	48
<b>Abb. 6.1:</b> Relative Änderungen der durchschnittlichen potentiellen Erträge von Weizen und Mais in der Periode 2040-2050 gegenüber der Referenzperiode 1980-1990 (ohne Berücksichtigung des CO <sub>2</sub> -Effektes auf die Photosynthese). ....	50

# **Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt des Spreewaldes**

Ottfried Dietrich

Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., Institut für Landschaftswasserhaushalt  
Eberswalder Str. 84, D-15374 Müncheberg, [odietrich@zalf.de](mailto:odietrich@zalf.de)

## **1. Problemstellung**

In vielen Teileinzugsgebieten des nordostdeutschen Tieflandes nehmen Feuchtgebiete rund 20 % der Fläche ein. Zum überwiegenden Teil handelt es sich hierbei um Niedermoore, die sich in den Urstromtälern der letzten Eiszeit gebildet haben. In den letzten 200 Jahren änderte sich als Folge der Entwässerung der Moore und ihrer intensiven landwirtschaftlichen Nutzung ihre ursprüngliche Funktion im Landschaftshaushalt. Das Wasserspeichervermögen der Feuchtgebiete wurde verringert und aus Senken für Kohlenstoff, Stickstoff und andere Nährstoffe entwickelten sich Stoffquellen. Veränderte ökonomische Rahmenbedingungen in der EU bieten heute die Chance einer Nutzung der Gebiete mit feuchtgebietstypischerem Wasserhaushalt und stärkerer Berücksichtigung der Interessen des Boden-, Natur- und Umweltschutzes. Die Frage stellt sich, inwieweit können die prognostizierten Klimaänderungen mit steigenden Temperaturen und abnehmenden Sommerniederschlägen den Wasserhaushalt der Feuchtgebiete beeinflussen und den gegenwärtigen Schutzziele entgegenstehen oder vielleicht sogar dienlich sein.

Im folgenden Beitrag wird ausschließlich der Wasserhaushalt von Feuchtgebieten behandelt. Aspekte des Bodenschutzes werden im Zusammenhang mit Klimaänderungen nicht explizit hervorgehoben, wobei klar ist, dass ein standortgerechter Wasserhaushalt auf Feuchtgebietsstandorten die wichtigste Voraussetzung für einen erfolgreichen Bodenschutz ist.

## **2. Wasserhaushalt von Feuchtgebieten im nordostdeutschen Tiefland**

Die Wasserstände in den Gewässern und die Grundwasserstände in vielen Feuchtgebietsflächen des nordostdeutschen Tieflandes werden heute nicht allein von hydrologischen Prozessen bestimmt, sondern vor allem auch durch wasserwirtschaftliche Steuerungshandlungen beeinflusst. Über die vorhandenen Stau- und Wehranlagen können die Wasserstände bei Bedarf geregelt und die Verteilung der verfügbaren Zuflüsse aus oberhalb gelegenen Einzugsgebieten in der Niederung gesteuert werden. In Zeiten mit hohem Wasserbedarf in der Niederung sind die verfügbaren Zuflüsse, die hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters sowie der technische Aufwand und die Kosten für die Wasserbewirtschaftung limitierende Größen für das Erreichen angestrebter Grundwasserstände. Charakteristisch für den Wasserhaushalt dieser Feuchtgebiete sind große innerjährliche Schwankungen der Wasserstände, die von periodischem Überstau in den Wintermonaten bis zu Grundwasserständen von 1,5 m unter Flur in trockenen Sommern reichen können.

Gefahren für den zukünftigen Erhalt der Feuchtgebiete gehen von klimatischen und ökonomischen Veränderungen aus, die auf unterschiedliche Weise auf den Wasserhaushalt wirken können. Klimatische Veränderungen beeinflussen einzelne Komponenten des Wasserhaushalts in der Niederung und im Einzugsgebiet direkt, veränderte wirtschaftliche Rahmenbedingungen wirken indirekt über die Landnutzung und die Wasserbewirtschaftung im Einzugsge-

biet. Besonders in den niederschlagsarmen Regionen Nordostdeutschlands können weiter abnehmende Niederschläge, ansteigende Verdunstung oder niedrigere Zuflüsse aus den Einzugsgebieten zur Veränderung des Landschaftscharakters führen, Feuchtgebiete vollständig verschwinden oder auf marginale Reste zusammenschrumpfen lassen. Die Auswirkungen von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt dieser Feuchtgebiete können mit Hilfe von Modellen prognostiziert und bewertet werden. Ihre Anwendung in Szenariountersuchungen ist eine Voraussetzung, um geeignete Maßnahmen zur Minderung negativer Folgen entwickeln zu können.

Wasserhaushaltsmodelle für Feuchtgebiete mit Wasserbewirtschaftung müssen in der Lage sein, folgende Prozesse abzubilden:

- (1) Den Flächenwasserhaushalt von Niederungsflächen mit Berücksichtigung der Wasserhaushaltskomponenten Niederschlag, Verdunstung, Speicherinhaltsänderung (Wasserstandsänderung), Wasserabgabe bzw. Wasseraufnahme aus dem Gewässersystem (Ent- und Bewässerungsfall).
- (2) Die Steuerung der Grundwasserstände in den Niederungsflächen über die Steuerung von Grabenwasserständen.
- (3) Die Ableitung der Bilanzüberschüsse aus den Flächen und ihre Zusammenführung im Gewässersystem (Entwässerungsfall).
- (4) Die Verteilung der Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet im Gewässersystem in Abhängigkeit von der Steuerung der Wehranlagen und vom Zusatzwasserbedarf der Niederungsflächen (Bewässerungsfall).

In den Untersuchungen zum Wasserhaushalt des Spreewaldes wurde daher das Modell „WBalMo Spreewald“ (Dietrich et al. 2003), eine Modellkombination aus einem Wasserhaushalts-/bewirtschaftungsmodell für Flusseinzugsgebiete WBalMo<sup>®</sup> (WASY 2003) und einem Flächenwasserbilanzmodell für staureguliert Niederungsflächen WABI (Dietrich et al. 1996), aufgebaut und angewendet. Die Untersuchungen hierfür wurden im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes GLOWA-Elbe I (FK: 07 GWK 03) durchgeführt. Eine ausführliche Darstellung aller Projektergebnisse ist in Wechsung et al. (2005) dargestellt.

### **3. Untersuchungsgebiet Spreewald**

Der Spreewald befindet sich rd. 70 km südöstlich von Berlin. Die rd. 320 km<sup>2</sup> große Niederung im Einzugsgebiet der Spree gehört zu den bedeutendsten Feuchtgebieten in Deutschland und wurde 1991 in die Liste der UNESCO-Biosphärenreservate aufgenommen und damit zusätzlich unter einen besonderen internationalen Schutzstatus gestellt. Das Gebiet liegt bereits im Übergangsbereich zum kontinentaleren Klima Osteuropas in einer der niederschlagsärmsten Regionen Deutschlands (mittlerer Jahresniederschlag 530 mm/a, FAO-Gras-Referenz-Verdunstung 610 mm/a, HAD 1998). Im Spreewald, einer von einer Vielzahl verästelter Fließgewässer durchzogenen Verflechtung von Flussauen und großen vermoorten Bereichen, überwiegen die grundwassernahen Sande (49 %), gefolgt von Niedermooren (33 %) und Auenlehmen (18 %). Die Landnutzung ist an die Besonderheiten des Wasserhaushalts mit

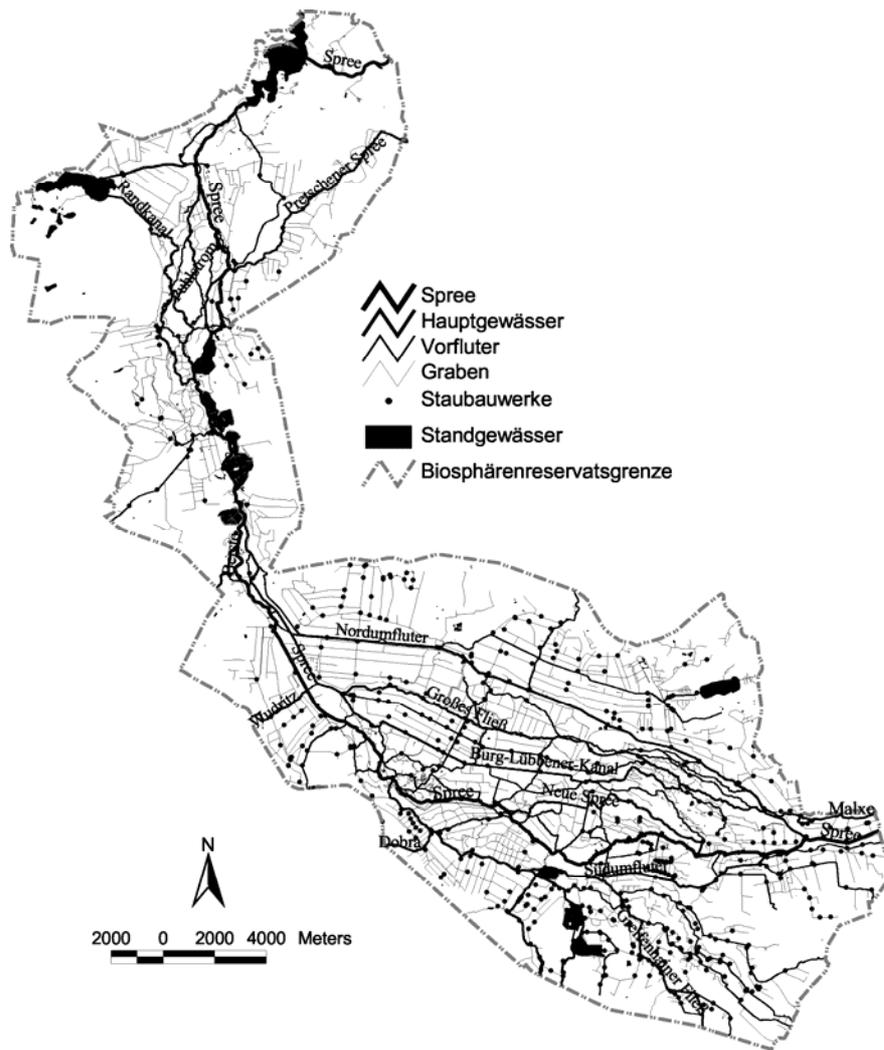


Abb. 1: Verzweigtes Gewässersystem des Spreewaldes mit Stauanlagen in den Grenzen des Biosphärenreservats Spreewald

Grundwassernahen Standortverhältnissen angepasst. Es dominiert die Graslandnutzung (44 %) mit Mähweiden und Wiesen, aber auch Ackernutzung (23 %) auf den höher gelegenen Flächen und forstwirtschaftliche Nutzung (20 %) spielen eine wichtige Rolle im Gebiet.

Der Wasserhaushalt des Gebietes wird durch das dichte Fließgewässersystem bestimmt. Es hat insgesamt eine Länge von mehr als 1.600 km (Abb. 1). Das Abflussgeschehen der Gewässer und damit auch die Grundwasserverhältnisse in den Niederungsflächen können mit fast 600 Wehr- und Staubauwerken reguliert werden. Gespeist wird der Spreewald von Zuflüssen aus den oberhalb gelegenen Einzugsgebieten, die alle zum Lausitzer Braunkohlenrevier gehören, dessen Wasserhaushalt durch die jahrzehntelange Kohleförderung geprägt ist. Die Zuflüsse aus Spree (2.535 km<sup>2</sup>) und Malxe (345 km<sup>2</sup>) verteilen sich im Oberspreewald auf weitere Gewässer, von denen Nordumfluter, Burg-Lübbener-Kanal, Neue Spree und Südumfluter die Hauptgewässer sind (Abb. 1). Die Zuflüsse aus den südlichen Teileinzugsgebieten (1.160 km<sup>2</sup>) münden direkt in Südumfluter oder Spree. Aus diesen Hauptgewässern können kleinere Fließe und Gräben gespeist und Wasser für die Bewässerung angrenzender Flächen entnommen werden. Nachdem fast alle Gewässer am Ausgang des Oberspreewald wieder in die Spree gemündet sind, verzweigt sich die Spree im Unterspreewald erneut. Die wichtigsten Gewässer hier sind Wasserburger Spree, Randkanal, Puhlstrom, Zerniasfließ und Pretschener Spree. Das Wasser verlässt den Spreewald hauptsächlich über die Spree. Es kann aber auch über den Randkanal und den Dahme-Umflut-Kanal in Richtung Köthener See abfließen oder über die Pretschener Spree, die dann weiter unterhalb wieder in die Spree einmündet.

grundwassernahen Standortverhältnissen angepasst. Es dominiert die Graslandnutzung (44 %) mit Mähweiden und Wiesen, aber auch Ackernutzung (23 %) auf den höher gelegenen Flächen und forstwirtschaftliche Nutzung (20 %) spielen eine wichtige Rolle im Gebiet.

Der Wasserhaushalt des Gebietes wird durch das dichte Fließgewässersystem bestimmt. Es hat insgesamt eine Länge von mehr als 1.600 km (Abb. 1). Das Abflussgeschehen der Gewässer und damit auch die Grundwasserverhältnisse in den Niederungsflächen können mit fast 600 Wehr- und Staubauwerken reguliert werden. Gespeist wird der Spreewald von Zuflüssen aus den oberhalb gelegenen Einzugsgebieten, die alle zum Lausitzer Braunkohlenrevier gehören, dessen Wasserhaushalt durch die jahrzehntelange Kohleförderung geprägt ist. Die Zuflüsse aus Spree (2.535 km<sup>2</sup>) und Malxe (345 km<sup>2</sup>) verteilen sich im Oberspreewald auf weitere Gewässer, von denen Nordumfluter, Burg-Lübbener-Kanal, Neue Spree und Südumfluter die Hauptgewässer sind (Abb. 1). Die Zuflüsse aus den südlichen Teileinzugsgebieten (1.160 km<sup>2</sup>) münden direkt in Südumfluter oder Spree. Aus diesen Hauptgewässern können kleinere Fließe und Gräben gespeist und Wasser für die Bewässerung angrenzender Flächen entnommen werden. Nachdem fast alle Gewässer am Ausgang des Oberspreewald wieder in die Spree gemündet sind, verzweigt sich die Spree im Unterspreewald erneut. Die wichtigsten Gewässer hier sind Wasserburger Spree, Randkanal, Puhlstrom, Zerniasfließ und Pretschener Spree. Das Wasser verlässt den Spreewald hauptsächlich über die Spree. Es kann aber auch über den Randkanal und den Dahme-Umflut-Kanal in Richtung Köthener See abfließen oder über die Pretschener Spree, die dann weiter unterhalb wieder in die Spree einmündet.

Ein besonderes Wasserhaushaltsproblem ist mit dem Einzugsgebiet des Spreewaldes verbunden. Infolge des Braunkohleabbaus im Einzugsgebiet während der vergangenen Jahrzehnte hatte das Feuchtgebiet insbesondere in den 1980er Jahren eine übernatürlich gute und stabile Wasserversorgung für nordostdeutsche Klimaverhältnisse. Mit Rückgang der Kohleförderung und steigendem Wasserbedarf im Einzugsgebiet für die Flutung der Tagebaurestseen gingen die Zuflüsse zum Spreewald bereits in den letzten 15 Jahren deutlich zurück und werden bis zum Abschluss der Rekultivierung noch weitere Jahre rückläufig sein, ehe sich wieder stabilere Wasserhaushaltsverhältnisse einstellen (Grünewald 2001). Der Klimawandel wird somit zusätzlich zum ökonomischen Wandel im Spreeeinzugsgebiet nur eine weitere Einflussgröße sein, die auf den Wasserhaushalt des Feuchtgebietes wirkt.

Das im Projekt zu modellierende Gebiet beschränkte sich ausschließlich auf die Niederung, deren Wasserhaushalt durch das Gewässersystem bestimmt wird und die durch grundwasser-nahe Bedingungen charakterisiert ist. Alle außerhalb liegenden Bereiche werden als Einzugsgebiet betrachtet, die einen Zufluss in die Niederung abgeben.

#### **4. WBalMo Spreewald**

Das Basismodel WBalMo bildet die hydrologischen Prozesse und die Wasserbewirtschaftung in einem Flussgebiet ab. Ein häufiger Anwendungsfall ist die Ermittlung langfristig optimaler Betriebsweisen wasserwirtschaftlicher Steuerungselemente eines Flussgebietes über Variantenrechnungen (WASY 2003). Kurzfristige Ereignisse, welche die aktuelle Steuerung eines wasserwirtschaftlichen Systems beeinflussen, bleiben unberücksichtigt. WBalMo löst das an sich stochastische Problem der Bewirtschaftung eines Flussgebiets über

- eine stochastische Simulation der Eingangsgrößen (Abflüsse, Niederschlag, potenzielle Verdunstung) auf der Grundlage einer Monte-Carlo-Simulation,
- eine deterministische Nachbildung der Nutzungsprozesse (Entnahmen und Rückleitungen von Wassernutzern, Überleitungen, usw.),
- eine lagegerechte Bilanzierung von Wasserdargebot und Wasserbedarf innerhalb des Fließgewässersystems unter Einbeziehung von Speichern und
- eine Registrierung interessierender Systemgrößen im Flussgebiet (Defizite bei der Wasserbereitstellung, Speicherabgaben und -füllungen, Abflüsse an ausgewählten Profilen usw.).

Wird die Simulation oft genug wiederholt, wofür eine Vielzahl von Realisierungen der Dargebotsreihen bereitgestellt werden, nähern die sich aus der Registrierung ergebenden Häufigkeitsverteilungen den gesuchten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Systemgrößen. Aus ihnen ist dann eine Einschätzung der Effektivität einer gewählten Bewirtschaftungskonzeption möglich. Modelle der Art des WBalMo werden auch als Langfristbewirtschaftungsmodelle bezeichnet. Der Berechnungszeitschritt von einem Monat hat sich hierbei als vorteilhaft erwiesen (Kaden et al. 2004).

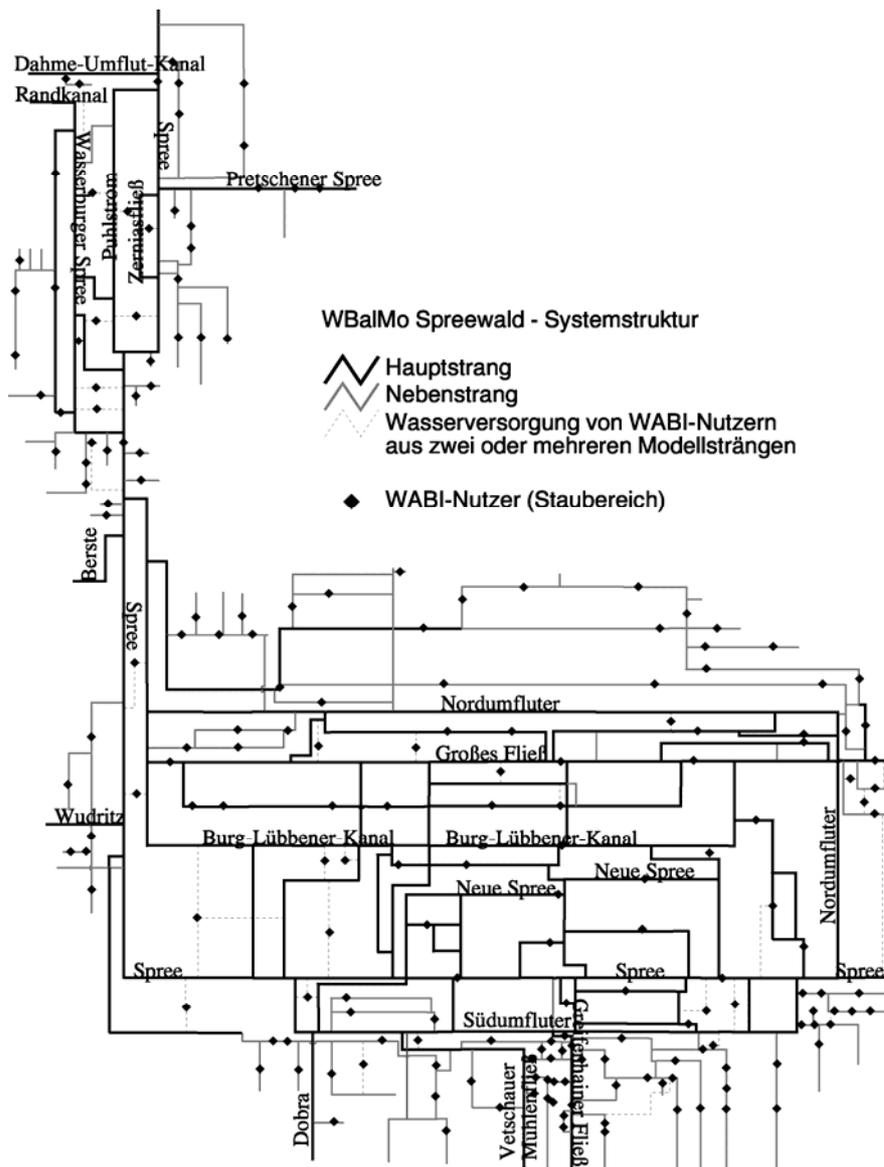


Abb. 2: Modellstruktur des Modells WBalMo Spreewald bestehend aus Strangschema mit Wasser-Nutzern

Abbildung 2 zeigt das reduzierte und vereinfacht abgebildete Gewässerschema des Spreewaldmodells. Es werden ausschließlich die für die Zuflussverteilung und für die Ableitung von Bilanzüberschüssen benötigten Hauptgewässer im Modell abgebildet. Wassernutzer können an Bilanzprofilen Wasser entnehmen oder einleiten. In Feuchtgebieten mit negativer klimatischer Wasserbilanz sind die Feuchtgebietsflächen mit ihrer Vegetation als Wassernutzer zu betrachten. Aufgrund der Verdunstung in den Flächen, die von den vorherrschenden Standortverhältnissen (Klima, Grundwasserflurabstand, Boden, Vegetation) bestimmt wird, sinken die Grundwasserstände unter das Niveau der Grabenwasserstände ab. Es kommt zur Wassernachlieferung aus den Gewässern in die Flächen. Ist der Niederschlag zeitweilig höher als die Verdunstung und steigen die Flächenwasserstände über die Grabenwasserstände an, kehrt sich die Fließrichtung um. Wasser aus den Flächen wird in das Gewässersystem abgegeben. Zusätzlich wird der Wasseraustausch zwischen Graben und angrenzender Fläche durch die Steuerung der Grabenwasserstände mittels der vorhandenen Stauanlagen beeinflusst. Um diese Art der Wassernutzung in einem WBalMo Modell zu berücksichtigen, wurde ein Flächenwasserbilanzmodell für Niederungsflächen (WABI) als Modul integriert. WABI benötigt ein digitales Geländemodell, eine Einteilung des Untersuchungsgebietes in Staubereiche mit Stauzielen für jeden Staubereich sowie Monatssummen für Niederschlag und nutzbaren Gesamtzufluss, welcher nicht in eine ober- und unterirdische Komponente aufgeteilt wird. Für das Zeitintervall von einem Monat wird das System stationär betrachtet. Die Grundwasseroberfläche wird für jeden Staubereich

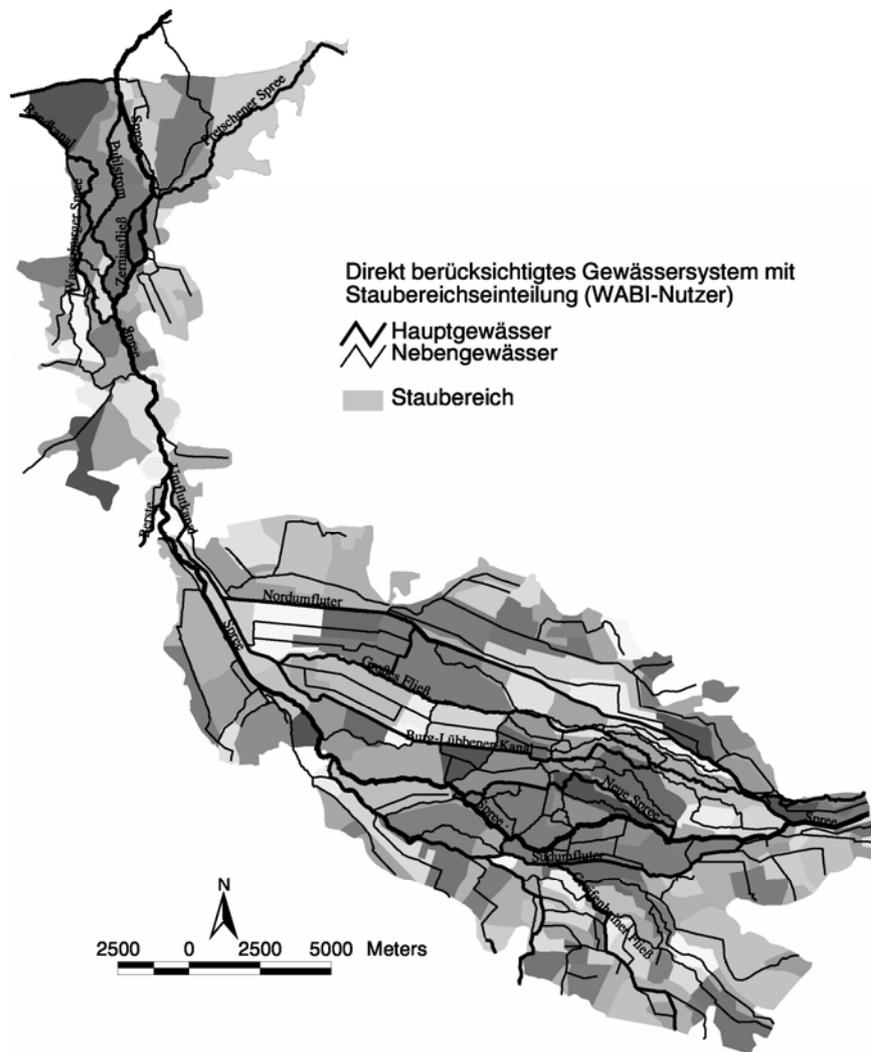


Abb. 3: Aufteilung der Spreewald - Niederung in Staubereiche und im Modell WBalMo Spreewald berücksichtigte Gewässer der Spreewald - Niederung

horizontal angenommen. Die Bilanzgrößen werden am Ende des Zeitschrittes (Monat) zu Staubereichssummen zusammengefasst.

Für die Anwendung des WABI-Modells wurde das Untersuchungsgebiet in 197 Staubereiche unterteilt (Abb. 3). Diese werden im WBalMo Spreewald als Wasser-Nutzer abgebildet (Abb. 2). Jeder Staubereich wird durch Parametersätze zu Böden, Hauptlandnutzungen, Geländehöhen, eine Flächenspeicherkennlinie und Stauzielen für jeden Monat charakterisiert. Niederschlag, potenzielle Verdunstung und die

Gebietszuflüsse werden als Datenreihen vorgegeben. Die Gebietszuflüsse werden nach Verteilungsregeln auf die einzelnen Stränge (Gewässer) so aufgeteilt, dass jeder Wasser-Nutzer entsprechend seinem Bedarf und der Verfügbarkeit im ihn versorgenden Strang einen Zufluss aus dem Einzugsgebiet erhält und seine monatliche Wasserbilanz aufgestellt werden kann.

WBalMo Spreewald kann direkt mit dem Wasserbewirtschaftungsmodell des Einzugsgebietes WBalMo GLOWA (Kaltoven et al. 2004) gekoppelt werden oder offline arbeiten und Datenreihen für die Feuchtgebietszuflüsse aus WBalMo GLOWA übernehmen, so dass jeweils auch Veränderungen im Wasserhaushalt des Einzugsgebietes berücksichtigt werden.

Eine Modellvalidierung erfolgte anhand von monatlichen Messwerten für Niederschlag, potenzielle Verdunstung, Zu- und Abflüsse sowie Grundwasserständen des Spreewaldes der Jahresreihe 1989/99. Tabelle 1 zeigt den Vergleich von gemessenen und berechneten monatlichen Abflusswerten am Gebietsausgang sowie der Dargebotsänderung als Differenz aus Gesamtabfluss minus korrigierter Niederschlag minus Gesamtzufluss.

Tab. 1: Mittelwert, Varianz und Nash & Sutcliffe-Index für den Gesamtabfluss unterhalb des Feuchtgebietes und die Dargebotsänderung in den Perioden 1990/94 und 1995/99

	Gesamtabfluss unterhalb des Feuchtgebietes in m <sup>3</sup> /s			
	11/1989 – 10/1994		11/1994 – 10/1999	
	Messwert	Modell	Messwert	Modell
Mittelwert	22,97	22,63	18,28	18,93
Varianz	129,33	120,71	81,55	86,31
Nash & Sutcliffe - Index	0,90		0,90	
	Dargebotsänderung <sup>1</sup> im Feuchtgebiet in m <sup>3</sup> /s			
	11/1989 – 10/1994		11/1994 – 10/1999	
	Messwert	Modell	Messwert	Modell
Mittelwert	-6,53	-6,86	-7,25	-6,60
Varianz	37,12	17,55	26,50	20,57
Nash & Sutcliffe - Index	0,64		0,70	

<sup>1</sup> Dargebotsänderung = Gesamtabfluss minus korrigierter Niederschlag minus Gesamtzufluss

## 5. Szenarien, Randbedingungen und Handlungsoptionen

Für das Untersuchungsgebiet wurden Szenarien als Kombination aus Randbedingungen und wasserwirtschaftlichen Handlungsoptionen erarbeitet und hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Wasserhaushalt des Feuchtgebietes untersucht. Die Randbedingungen bilden das Klima und die Zuflüsse aus den oberhalb des Spreewaldes liegenden Teileinzugsgebieten. Als mögliche Handlungsoptionen zur langfristigen Einflussnahme auf den Wasserhaushalt und zur Minderung negativer Auswirkungen des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt wurden die Höhe der Stauziele in Verbindung mit der Flächennutzung und die Steuerung der Zuflussverteilung im Niederungsgebiet identifiziert.

Im weiteren werden Ergebnisse von drei Szenarien vorgestellt. Dabei wird ein Klimawandelszenario mit der gegenwärtig im Einzugsgebiet der Spree geplanten Wasserbewirtschaftung (Randbedingungen) und drei Wassermanagementoptionen für das Feuchtgebiet miteinander kombiniert.

Das Klimawandelszenario basiert auf den Ergebnissen von Gerstengarbe & Werner (2004). Hierbei wurde von einem mittleren Temperaturanstieg von 1,4 K bis 2050 ausgegangen. Der Untersuchungszeitraum von 2003 bis 2052 wird in der Ergebnisauswertung in 10 Perioden à 5 Jahre unterteilt. Für jedes der 50 Jahre standen 100 Realisierungen zur Verfügung. Die Ergebnisse der Klimamodellierung zeigen für das Untersuchungsgebiet einen Anstieg der potenziellen Evapotranspiration und abnehmende Niederschläge, insbesondere im Sommer.

Als Zufluss aus dem Einzugsgebiet wurden Ergebnisse der BTU Cottbus genutzt, die ebenfalls auf der Basis des o.g. Klimaszenarios errechnet wurden (Kaltoven et al. 2005). We-

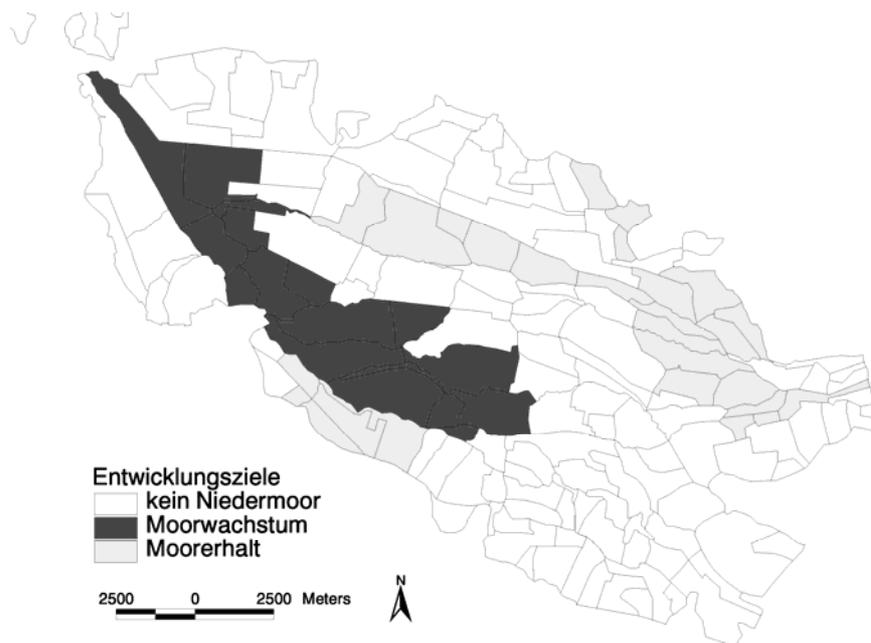


Abb. 4: Staubereiche mit Stauzielanhebung im Moorschutz-Szenario im Oberspreewald

sentlich für das Feuchtgebiet ist, dass sich unterschiedliche Entwicklungen in den einzelnen Teileinzugsgebieten zeigen. Bis 2050 ist die Tagebaurekultivierung in einigen Teileinzugsgebieten bereits abgeschlossen, so dass hier die Abflüsse bereits wieder ansteigen können. In anderen Teileinzugsgebieten wurden voraussichtlich erst die letzten aktiven Tage-

baue geschlossen, so dass hier die Flutung der Restlöcher noch nicht abgeschlossen sein wird.

Die erste Wassermanagementoption im Spreewald geht von der gegenwärtigen Wasserbewirtschaftungspraxis aus (Status quo–Szenario, SQ). Bei der zweiten Handlungsoption (Moorschutz-Szenario, MS) wird die Nutzung auf den Niedermoorflächen (Abb. 4) aufgegeben (Moorregenerierung) bzw. stark extensiviert (Moorerhalt) und die Zielwasserstände auf diesen Flächen angehoben. Die Zielwasserstände liegen bei Moorregenerierung (ca. 4.000 ha) 0,1 m über Flur im Winter und 0,2 m unter Flur im Sommer sowie bei Moorerhalt (ca. 3.800 ha) im Winter in Geländehöhe und bei 0,3 m unter Flur im Sommer. Bei der dritten Option (Umverteilungs-Szenario, UV) wird die Zuflussverteilung innerhalb des Spreewaldes verändert. Die Zuflüsse der Spree werden stärker als im SQ auch für die Versorgung von Flächen im nördlichen Oberspreewald genutzt. Die Zuflüsse der Malxe dienen ausschließlich der Versorgung der Flächen im Bereich des Großen Fließes. Die Zielgrundwasserstände bleiben gegenüber dem SQ unverändert.

## 6. Ergebnisse

### 6.1 Zusatzwasserbedarf

Der Zusatzwasserbedarf ist die Wassermenge, die zusätzlich zum Niederschlag benötigt wird, um Verdunstung und durch Stauzielunterschreitung im Vormonat entstandene Defizite im Flächenwasserspeicher auszugleichen und die vorgegebenen Stauziele in den Staubereichen einzuhalten. Die Juli-Werte weisen im Jahresverlauf immer die größten Monatssummen auf und sind in Abb. 5 jeweils als 20. und 50. Perzentile dargestellt.

Der Vergleich zeigt für alle Szenarien sowohl in mittleren Jahren (50. Perzentil) als auch in den trockeneren Jahren (20. Perzentil) eine Zunahme des Zusatzwasserbedarfs im Juli um rd. 20 mm von der Periode 2003/07 zur Periode 2048/52. Ursachen sind der leichte Rückgang der

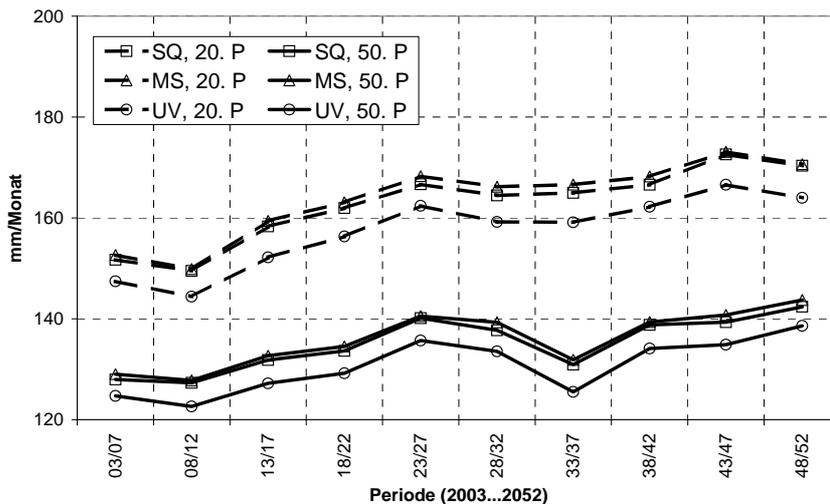


Abb. 5: Zusatzwasserbedarfs im Juli in mittleren Jahren (50. Perzentil) und in trockenen Jahren (20. Perzentil), (SQ – Status Quo, MS – Moorschutz, UV – Umverteilung, P. – Perzentil)

Sommerniederschläge und der Anstieg der potenziellen Verdunstung, der sich bei weiterhin gegebener Wassernachlieferung aus dem Grundwasser auch in einem Anstieg der realen Verdunstung niederschlägt. Die Verbesserung des Wasserrückhalts im Feuchtgebiet durch Stauzielanhebung im MS reduziert den

Zusatzwasserbedarf des Gesamtgebietes gegenüber SQ nicht. Eine andere Verteilung der Zuflüsse in der Niederung (UV) kann in den Vormonaten zu kleineren Defiziten im Flächenwasserspeicher beitragen, so dass damit der dargestellte Juli-Bedarf im UV kleiner ausfällt und ein Teil der klimabedingten Bedarfssteigerung kompensiert wird.

## 6.2 Zusatzwasserdefizit

Das Zusatzwasserdefizit ist der Teil des Zusatzwasserbedarfs, der auch nach der Versorgung der Niederungsflächen mit den Einzugsgebietszuflüssen nicht gedeckt werden kann. Im Vergleich mit dem Zusatzwasserbedarf zeigt es, inwieweit auch der Wasserhaushalt im Einzugsgebiet von Veränderungen betroffen ist. Ausgewertet wurden wieder die Perzentile der Monatswerte aller Perioden.

In Abbildung 6 wird der Vergleich des Jahresgangs der Periode 2003/07 des SQ mit der Periode 2048/52 aller Szenarien dargestellt. Das Zusatzwasserdefizit der Sommermonate steigt nach den Modellrechnungen im Median bis 2048/52 im SQ und MS um rd. 20 mm an. In den trockeneren Jahren (20. Perzentil) liegt der Anstieg mit rd. 30 mm noch etwas höher. In trockenen Jahren überlagern sich also erhöhter Bedarf und niedrigere Zuflüsse noch ungünstiger als bisher. Die Unsicherheiten in der Bedarfsdeckung der Niederungsflächen steigen damit weiter an und führen in der Folge häufiger zu tiefer absinkenden Grundwasserständen.

Bei der Betrachtung der Jahresgänge der Perioden 2003/07 und 2048/52 wird deutlich, dass der Median in 2048/52 noch die Werte des 20. Perzentils 2003/07 erreicht (Abb. 6). Das bedeutet, dass das Defizit in der Periode 2048/52 durchschnittlich in jedem zweiten Jahr so groß ist, wie in der Periode 2003/07 nur in trockeneren Jahren (in einem von 5 Jahren). Diese Zunahme der Häufigkeit im Zusatzwasserdefizit wäre mit gravierenden Folgen für die Ökologie und Ökonomie im Gebiet verbunden.

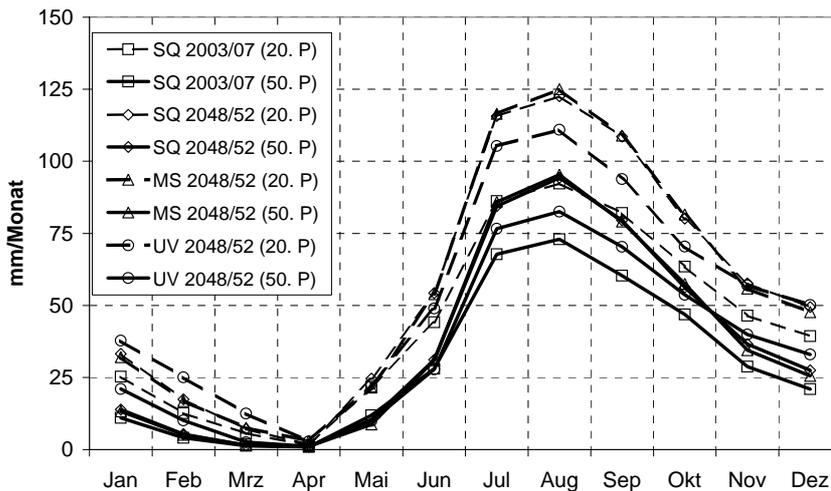


Abb. 6: Zusatzwasserdefizit des Status quo – Szenarios der Perioden 2003/07 und 2048/52 im Vergleich zum Moorschutz- und Umverteilungsszenario der Periode 2048/52 in mittleren Jahren (50. Perzentil) und in trockenen Jahren (20. Perzentil), (SQ – Status Quo, MS – Moorschutz, UV – Umverteilung, P. – Perzentil)

Etwas geringer sind die Defizitzunahmen im UV. Die Verbesserung der Versorgungssicherheit der Feuchtgebietsflächen durch eine Veränderung der Wasserverteilung in der Niederung geht aber in jedem Fall zu Lasten der Unterlieger des Spreewaldes, da die insgesamt im Spreengebiet verfügbaren Abflüsse unverändert bleiben.

### 6.3 Auswirkungen auf Grundwasserstände

Die Folgen eines erhöhten Wasserbedarfs und verminderten Wasserdargebots schlagen sich im Feuchtgebiet in veränderten Grundwasserverhältnissen nieder. Abb. 7 zeigt die Differenz der 50. Perzentile der berechneten Grundwasserstände des SQ der Periode 2003/07 und 2048/52 für jeden einzelnen Staubereich. Es wird deutlich, dass sich das veränderte Wasserdargebot nicht gleichmäßig im gesamten Niederungsgebiet auf die Grundwasserverhältnisse auswirkt. Die zentralen Spreewaldbereiche, welche vorrangig vom Spreezufluss versorgt werden, sind weniger von sinkenden Grundwasserständen betroffen, als der Versorgungsbereich des Großen Fließes (schraffierte Fläche) oder die Randbereiche mit 25 cm bis 50 cm tieferen Grundwasserständen im Median der Periode 2048/52 gegenüber 2003/07.

Die Gründe: Das Große Fließ wird vom Einzugsgebiet der Malxe mit Wasser versorgt. Der Abfluss der Malxe besteht auch heute noch zu einem großen Anteil aus Sumpfungswässern von Tagebauen. Mit Auslaufen dieser Tagebaue nach 2030 und der dann anstehenden Flutung der Restlöcher werden sich die Abflussmengen in der Malxe stark reduzieren, was sich in den von ihr zu versorgenden Teilen der Spreewaldniederung auswirkt. Bei den Randbereichen ist das Verhältnis von zu versorgender Niederungsfläche zu dargebotsbildender Einzugsgebietsfläche sehr ungünstig, so dass sich eine Verringerung der Sommerabflüsse aus den kleinen Teileinzugsgebieten in einem verstärkten Absinken der Grundwasserstände niederschlägt.

In Abb. 8 (links) werden die Medianwerte der Juli-Grundwasserstände der Periode 2048/52 des MS mit dem SQ verglichen. Sie veranschaulichen, welche Wirkung die Anhebung der Zielgrundwasserstände auf den Niedermoorflächen im Oberspreewald hat. Eine Anhebung der Sommergrundwasserstände wird vor allem in den östlichen Staubereichen erreicht, die

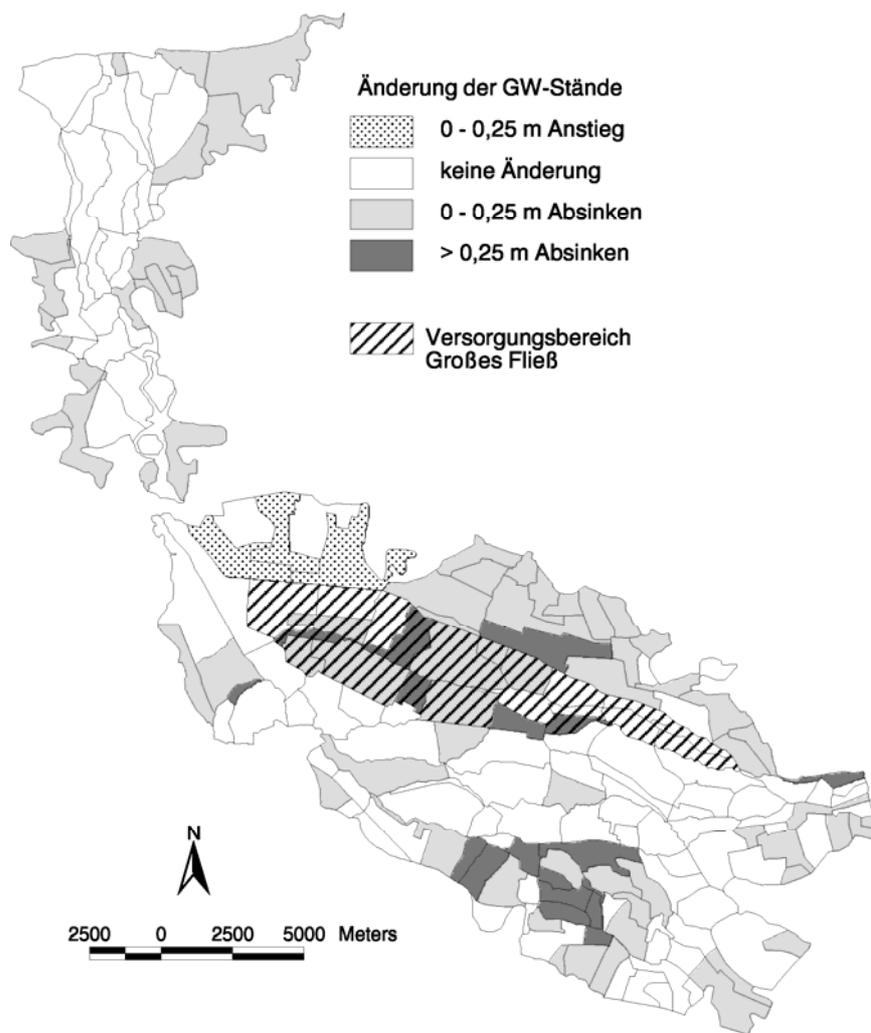


Abb. 7: Vergleich der Juli-Grundwasserstände der Perioden 2003/07 und 2048/52 (50. Perzentil) des Status quo - Szenarios

unter das Entwicklungsziel „Moorerhalt“ fallen. Hier wurden die Zielgrundwasserstände gegenüber dem Ausgangsszenario um durchschnittlich 30 cm angehoben und somit auch eine erkennbarere Verbesserung der Sommergrundwasserstände erreicht.

Die Umverteilung der Spree-Zuflüsse in den nördlichen Oberspreewald und die ausschließliche Verwendung der Malxe-Zuflüsse für den Versorgungsbereich Großes Fließ verbessert unter mittleren Bedingungen (50. Perzentil) in den bevorteilten Gebieten

die Situation, ohne Nachteile in den von der Spree versorgten Gebieten (Abb. 8, rechts). Bei der Betrachtung der trockeneren Jahre (hier nicht dargestellt) sind durch die höheren Wasserentnahmen aus der Spree im Oberspreewald tiefere Grundwasserstände im Unterspreewald erkennbar, so dass hier Vor- und Nachteile abgewogen werden müssten.

## 7. Zusammenfassung

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass der Wasserbedarf des Feuchtgebietes Spreewald in den Sommermonaten unter sich ändernden klimatischen Verhältnissen bis 2050 weiter ansteigen wird. Die Ursachen hierfür sind abnehmende Niederschläge und steigende Verdunstung, die in den Klimaszenarien für diese Region berechnet wurden. Das verfügbare Wasserdargebot aus den oberhalb liegenden Einzugsgebieten wird nicht ausreichen, den erhöhten Bedarf insgesamt zu decken, da auch die Einzugsgebiete von Folgen des globalen Wandels betroffen sein werden. Diese Betroffenheit wird aufgrund der Entwicklung der Braunkohleförderung und Tagebaurekultivierung bis 2050 innerhalb des Spree-Einzugsgebietes jedoch differenziert ausfallen. Diese Tatsache und die im Vergleich zur zu versorgenden Feuchtgebietsfläche un-

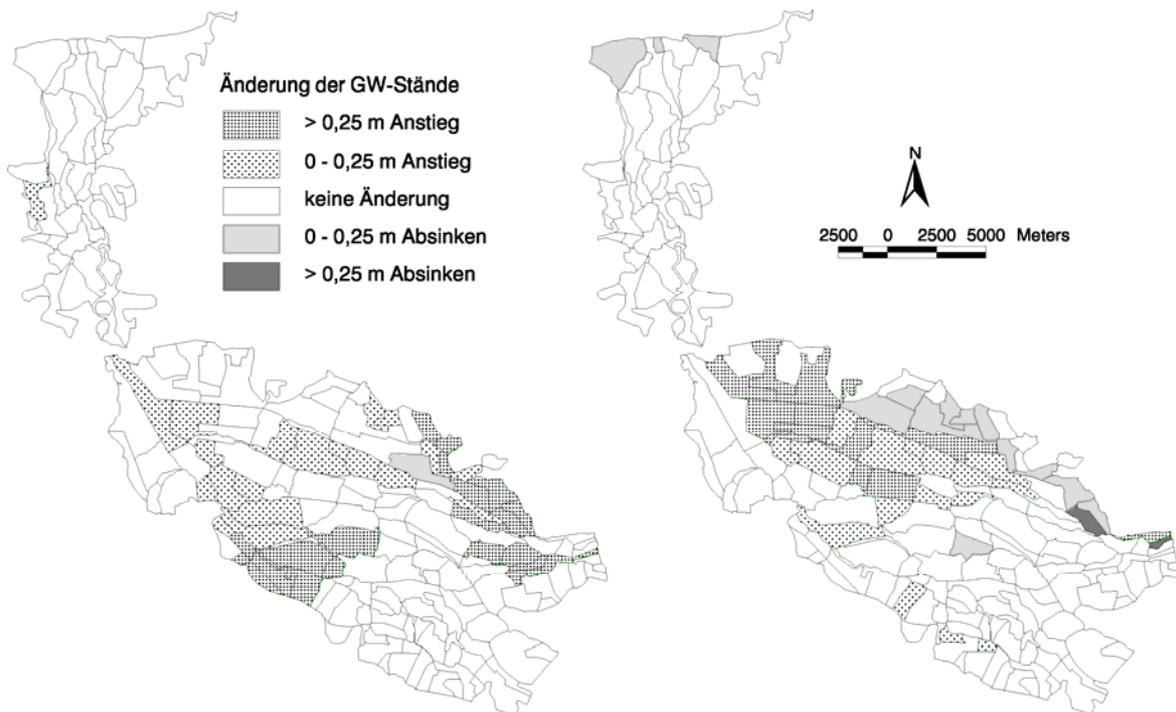


Abb. 8: Vergleich der Juli-Grundwasserstände des Moorschutz (links) und Umverteilungs - Szenarios (rechts) der Periode 2048/52 mit dem Status quo – Szenario der Periode 2048/52 (50. Perzentil)

terschiedlich große Einzugsgebietsfläche führen innerhalb des Spreewaldes zu einer differenzierten Betroffenheit. Insbesondere die Randbereiche und die von der Malxe versorgten Bereiche im inneren Spreewald können stärker von den Veränderungen betroffen sein als die zentralen, von der Spree versorgten Spreewald-Bereiche.

Die langfristig zu erwartenden Veränderungen im Wasserhaushalt sollten auch heute schon stärker in die Entwicklungsplanungen von Feuchtgebieten einbezogen werden. Ein verbesserter Wasserrückhalt im Feuchtgebiet hilft nicht nur bei der Stabilisierung des Wasserhaushalts, er verbessert auch den Schutz der Böden und feuchtgebietstypischer Lebensräume für seltene Tier- und Pflanzenarten. Da dieses aber auch in Einklang mit der bestehenden Landnutzung geschehen muss, wird langfristig gesehen der Aufwand für die kleinräumige Wasserbewirtschaftung in der Niederung wieder steigen müssen, um den Wasserrückhalt insgesamt zu verbessern.

Die bisher für das Untersuchungsgebiet untersuchten Handlungsoptionen zur Minderung negativer Folgen des globalen Wandels reichen noch nicht aus, um daraus schon Handlungsstrategien abzuleiten. Weitere Handlungsoptionen müssen in Abstimmung mit den Stakeholdern untersucht und diskutiert werden. Mit dem Modell WBalMo Spreewald wurde ein geeignetes Werkzeug im Rahmen des GLOWA-Elbe-Projektes geschaffen. Weitere, noch zu untersuchende Handlungsoptionen wären z. B. die gezielte Veränderung der Landnutzung mit den daran gebundenen Stauzielen, eine Bevorteilung ausgewählter Bereiche des Spreewaldes durch Veränderung der Prioritäten in der Verteilung der Zuflüsse, um so diese Bereiche langfristig im Bestand zu sichern, oder eine Wasserbewirtschaftung im Einzugsgebiet mit der be-

vorzuzugten Einbeziehung der Speicher für die Versorgung des Feuchtgebietes in den Sommermonaten.

Was für die möglichen Veränderungen des Wasserhaushalts innerhalb des Spreewaldes gilt, nämlich eine unterschiedlich starke Betroffenheit der Teilbereiche von veränderten Rahmenbedingungen für den Wasserhaushalt, gilt auch für die Übertragung der Ergebnisse auf andere Feuchtgebiete im nordostdeutschen Tiefland. Eine pauschale Aussage, was die Bedrohung der Feuchtgebiete betrifft, ist nicht möglich. Der Grad der Beeinflussung des Wasserhaushalts einzelner Gebiete wird immer von den jeweils konkreten Bedingungen abhängen und kann positive wie auch negative Folgen für die Gebiete haben. Die größte Gefahr für den zukünftigen Erhalt der Feuchtgebiete bzw. ihre Wiederherstellung wird jedoch nicht der Klimawandel sein. Die historischen, gegenwärtigen und zukünftigen Einflüssen der Nutzung in den Feucht- und ihren Einzugsgebieten, verbunden mit Eingriffen in den Wasserhaushalt und mit irreparablen Veränderungen des Bodens und der Ökosysteme, werden auch zukünftig die größere Bedrohung für Feuchtgebiete darstellen.

### **Danksagung**

Die Autoren danken dem BMBF für die Förderung der Arbeiten im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes GLOWA-Elbe (FK: 07 GWK 03) und den Landesbehörden von Brandenburg für die Bereitstellung der Datengrundlagen.

### **Literatur**

- Dietrich, O., Dannowski, R. & Quast, J. (1996) GIS-based water balance analyses for fen wetlands. Internat. Conf. on Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, HydroGIS '96. 16-19 April, Vienna, Vol. of Poster Papers: 83-90; Vienna.
- Dietrich, O., Quast, J. & Redetzky, M. (2003) ArcGRM Spreewald - ein Modell zur Analyse der Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt eines Feuchtgebietes mit Wasserbewirtschaftung. In: Kleeberg, H.-B. (Hrsg.) Klima – Wasser – Flussgebietsmanagement im Lichte der Flut. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 4 S. 215-223.
- Gerstengarbe, F.-W. & Werner, P.C. (2004) Simulationsergebnisse des regionalen Klimamodells STAR. In: Wechsung, F., Becker, A. & Gräfe, P. (Eds.) Integrierte Analyse der Auswirkungen des Globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. PIK-Report 95, Potsdam, S. 106-112.
- Grünewald, U. (2001) Water resources management in river catchments influenced by lignite mining. *Ecological Engineering* 17: 143-152.
- HAD (1998) Hydrologischer Atlas von Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrg.).
- Kaden, S., Schramm, M. & Redetzky, M. (2004) ArcGRM: interactive simulation system for water resources planning and management in river basins. In *Research Basins and Hydro-*

- logical Planning, Xi R-Z, Gu W-Z, Seiler K-P. (eds). Taylor & Francis Group: London; 185-192.
- Kaltofen, M., Koch, H., Schramm, M., Grünewald, U. & Kaden, S. (2004) Anwendung eines Langfristbewirtschaftungsmodells für multikriterielle Bewertungsverfahren – Szenarien des globalen Wandels im bergbaugeprägten Spreegebiet. *Hydrologie und Wasser Bewirtschaftung* 48: 60-70.
- Kaltofen, M., Koch, H. & Schramm, M. (2005) Wasserwirtschaftliche Handlungsstrategien im Spreegebiet oberhalb Berlins. In: Wechsung, F., Becker, A. & Gräfe, P. (Eds.) *Integrierte Analyse der Auswirkungen des Globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet*. Weissensee-Verlag, Berlin, S. 255-272.
- WASY (2003) *WBalMo 2.0 – Interaktives Simulationssystem für Planung und Bewirtschaftung in Flussgebieten*. Benutzerhandbuch, WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH, Berlin, 136 S.
- Wechsung, F., Becker, A. & Gräfe, P. (Eds.) (2005) *Integrierte Analyse der Auswirkungen des Globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet*. Weissensee-Verlag, Berlin, 408 S.

# Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Vegetationsentwicklung

*Frank-M. Chmielewski*

Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Pflanzenbauwissenschaften, Lehrgebiet  
Agrarmeteorologie, Albrecht-Thaer-Weg 5, 14195 Berlin

chmielew@agrار.hu-berlin.de, [www.agrar.hu-berlin.de/pflanzenbau/agrarmet](http://www.agrar.hu-berlin.de/pflanzenbau/agrarmet)

## Einleitung

Phänologische Daten ermöglichen die Saisonalität von Pflanzen zu beschreiben, die natürliche Vegetationszeit einer Region zu definieren und den jährlichen Entwicklungsverlauf der Vegetation darzustellen. Da die Entwicklungsprozesse der Pflanze in einem hohen Maße temperaturabhängig sind, werden phänologische Beobachtungen zu sensitiven Bioindikatoren von Klimaänderungen in den mittleren und höheren Breiten.

## Material und Methoden

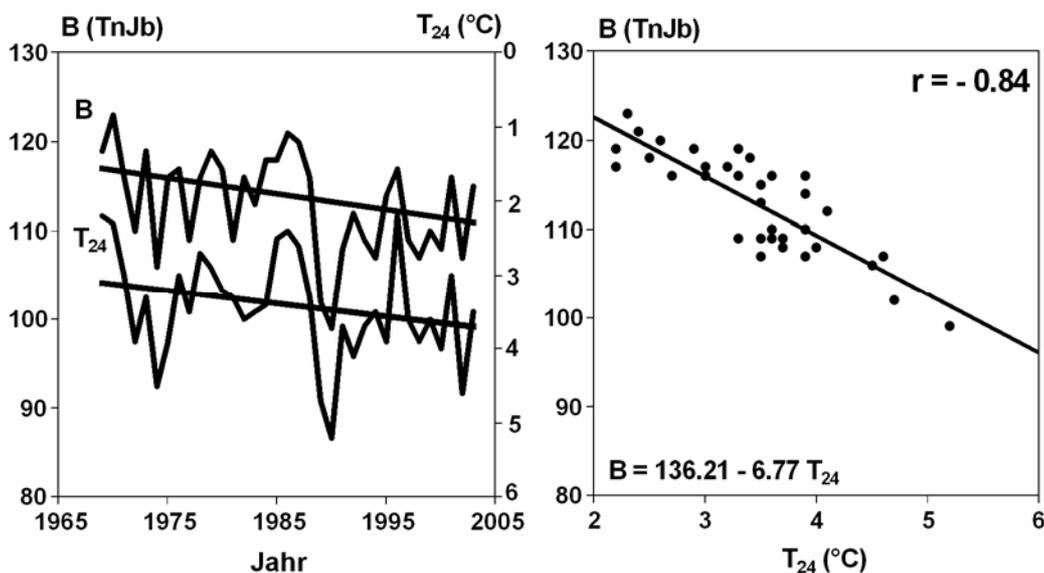
Die Definition der Vegetationsperiode kann auf vielfältige Art und Weise erfolgen. In der hier vorliegenden Studie wurde dieser Zeitraum mit Hilfe phänologischer Beobachtungen aus der natürlichen Vegetation abgegrenzt. Der Beginn der Vegetationsperiode wurde mit Hilfe der Blattentfaltung verschiedener Gehölzarten, das Ende der Vegetationszeit entsprechend mit dem Blattfall definiert.

Für die Untersuchungen wurden phänologische Beobachtungen der Internationalen Phänologischen Gärten Europas (IPG: [www.agrar.hu-berlin.de/pflanzenbau/agrarmet/ipg.html](http://www.agrar.hu-berlin.de/pflanzenbau/agrarmet/ipg.html)) und Daten des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Zur Beschreibung der Beziehungen zwischen Klimaänderung und Pflanzenentwicklung wurden zusätzlich Beobachtungsdaten der Lufttemperatur für Europa (NCEP/Re-Analyse Daten) sowie für Deutschland (Klimastationen) herangezogen.

## Ergebnisse und Diskussion

Im Zeitraum 1961-2004 die Lufttemperatur hat in ganz Europa stetig zugenommen. Der lineare Trend in diesem 44jährigen Abschnitt beträgt für Europa + 0.15 K/ Jahrzehnt ( $p < 0.05$ ), für Deutschland sogar + 0.36 K/Jahrzehnt ( $p < 0.01$ ). Sehr auffällig ist hierbei die markante Erwärmung seit dem Ende der 1980er Jahre. Somit zählen die 1990er Jahre sowohl im globalen Maßstab als auch regional und lokal zu dem wärmsten Jahrzehnt seit dem Beginn instrumenteller Aufzeichnungen. Veränderungen in der Niederschlagshöhe sind größtenteils nicht signifikant, weisen jedoch tendenziell auf eine Zunahme der winterlichen und eine Abnahme der sommerlichen Niederschläge hin.

Analysen phänologischer Zeitreihen belegen, dass sowohl die natürliche Vegetation, als auch Obstgehölze und landwirtschaftliche Nutzpflanzen eindeutig auf die höheren Temperaturen reagiert haben. Ein anschaulicher Beleg hierfür ist die Verlängerung der Vegetationsperiode in Europa, die im Wesentlichen auf den zeitigeren Vegetationsbeginn zurückzuführen ist. Im Mittel hat sich die Vegetationszeit in Europa in den letzten 35 Jahren signifikant ( $p < 0.01$ ) um 10 Tage verlängert. Für den Beginn der Vegetationsperiode ist der Temperaturverlauf zwischen Februar und April entscheidend (Abb. 1). Eine Erwärmung um 1 K führt zu einer Verfrühung des Vegetationsbeginns um eine etwa Woche (s. auch Chmielewski und Rötzer 2001).

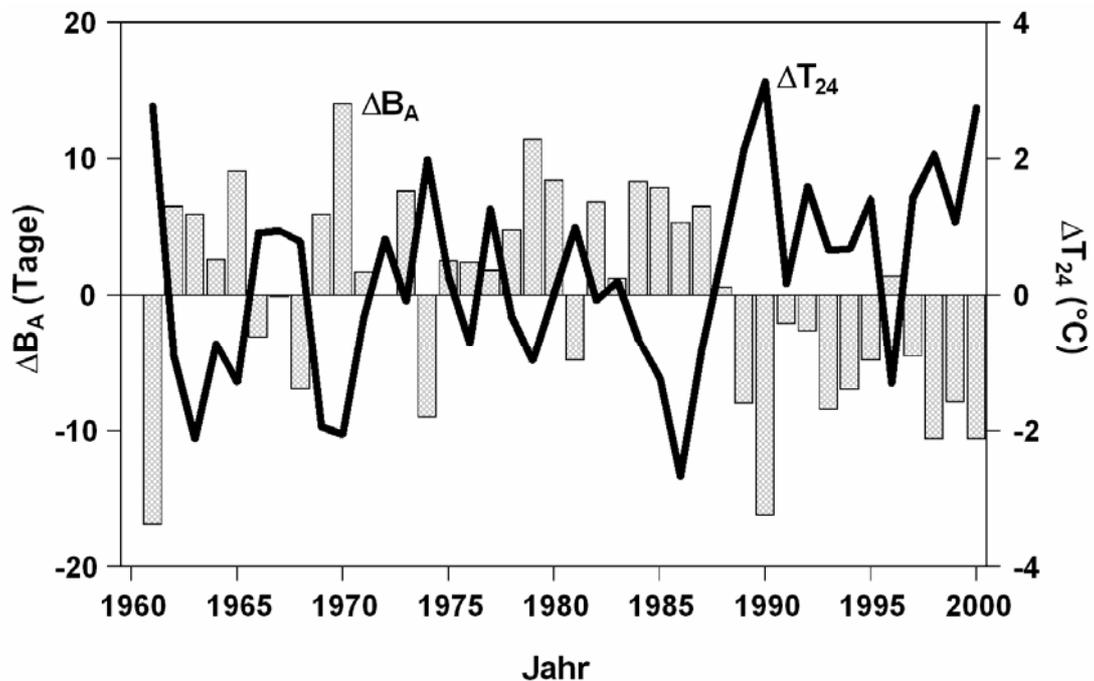


**Abb. 1:** Beginn der Vegetationsperiode (B) und mittlere Lufttemperatur von Februar bis April ( $T_{24}$ ) in Europa, 1969-2003, Daten: IPG

Das Ende der Vegetationszeit (Blattfall) zeigt hingegen nur geringe Veränderungen, die sich in den letzten 35 Jahren in Europa auf +3 Tage ( $p < 0.10$ ) belaufen. Die interannuelle Variabilität ist im Vergleich zum Vegetationsbeginn ebenfalls deutlich geringer.

Auf Deutschland sind diese Befunde uneingeschränkt übertragbar. Hier hat sich der Vegetationsbeginn in den letzten 40 Jahren (1961-2000) gleichfalls um 9 Tage verfrüht. Phänophasen von Obstgehölzen wie der Beginn der Kirsch- und Apfelblüte zeigen vergleichbare Veränderungen in der Entwicklung, die im eindeutigen Zusammenhang zum Anstieg der Lufttemperatur stehen. Der Blühbeginn des Apfels hat sich in den 1990er Jahren, gegenüber dem vorangehenden Zeitraum 1961-1990 um 7 Tage verfrüht (Abb. 2). Eine Zunahme der Lufttemperatur zwischen Februar und April von 1 °C führt bei Obstgehölzen zu einer Verfrühung der Blüte um 5 Tage. Selbst die phänologischen Phasen von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen, beispiels-

weise die vom Winterroggen, zeigen einen adäquaten Trend zur Verfrühung (Chmielewski et al. 2004a).



**Abb. 2:** Anomalien der mittleren Lufttemperatur von Februar bis April ( $T_{24}$ ) und dem Beginn der Apfelblüte ( $\Delta B_A$ ) in Deutschland 1961-2000, nach Chmielewski et al. 2004, Daten: Phänologische Beobachtungen des DWD

Der weitere Verlauf der Erwärmung in den verschiedenen Regionen der Erde wird maßgeblich von der künftigen Freisetzung der Treibhausgase abhängen. Auf der Basis verschiedener Emissionsszenarien wurden mit Hilfe von Klimamodellen Veränderungen der globalen Mitteltemperatur von 1.4 bis 5.8 K berechnet (IPCC 2001). Das Ausmaß der möglichen Folgen einer Klimaänderung auf die verschiedenen natürlichen und gestalteten Ökosysteme wird davon abhängen, wie schnell und wie stark sich die globale Erwärmung tatsächlich vollziehen wird.

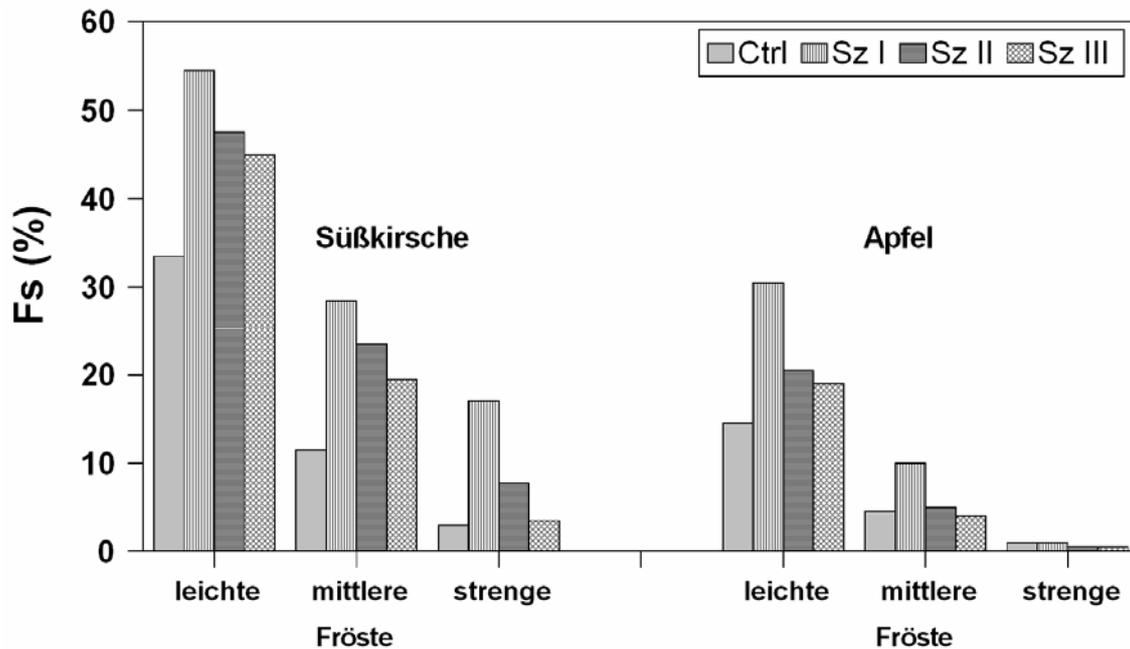
Abschätzungen zu den Auswirkungen künftiger Klimaänderungen auf die regionale Vegetationsentwicklung in Deutschland wurden erstmals für den Maitrieb der Fichte und dem Beginn der Holunderblüte im Rahmen des Bayrischen Klimaforschungsprogramms vorgenommen (Rötzer et al. 1997). In jüngster Zeit wurde, auf der Basis hoch aufgelöster regionaler Klimaszenarien (Enke et al. 2005) eine umfassende Studie zu möglichen Veränderungen in der Vegetationsentwicklung für Sachsen durchgeführt (Chmielewski et al. 2004b, Küchler und Sommer 2005, Chmielewski et al. 2005). Auf der Basis von 40jährigen phänologischen Beobachtungsreihen des DWD wurden phänologische Modelle (Thermal-Time Modelle) aufgestellt, die eine Abschätzung in der Verschiebung der Phänophasen ermöglichen. Die Ergebnisse

zeigen, dass die Pflanzen auf die zunehmend milderen Winter mit einem zeitigeren Austrieb reagieren werden. Die stärksten Veränderungen in den Eintrittsterminen, sind bei den frühen Phänophasen zu erwarten. So könnte sich bis 2050 der Blühbeginn der Salweide im Mittel um nahezu einen Monat verfrühen. Begrenzend könnte hier lediglich die Tageslänge (Fotoperiode) wirken. Für den Beginn der Apfelblüte, der den Beginn des Vollfrühlings markiert, wurde immerhin noch eine Verschiebung um -10 Tage berechnet. Der im Frühjahr vorhandene Vorsprung in der Entwicklung wird durch die ansteigenden Sommertemperaturen teilweise wieder kompensiert. Für Obstgehölze wie die Kirsche und den Apfel würden sich somit kaum nennenswerte Veränderungen in der Länge der Reifephase ergeben. Der gesamte Entwicklungszeitraum wird lediglich weiter zum Jahresanfang hin verschoben.

Steigende Temperaturen und die hierdurch verbundene Verlängerung der Vegetationszeit können die Produktivität und das Wachstum der Wälder, vor allem in den nördlichen Regionen der Erde erhöhen. Hierbei ist hauptsächlich der zeitigere Vegetationsbeginn von Bedeutung. Im Pflanzenbau würde eine Verlängerung der allgemeinen Vegetationsperiode neue Möglichkeiten für die Sortenwahl, den Zwischenfruchtanbau und die Gestaltung der Fruchtfolge eröffnen. Andererseits könnten höhere Temperaturen innerhalb der Vegetationszeit bei landwirtschaftlichen Kulturen zu einer Verkürzung individueller Phasenlängen führen, wodurch die Ertragsbildung der Nutzpflanzenarten negativ beeinflusst werden kann. Abnehmende Niederschlagshöhen in der Vegetationszeit bzw. eine Umverteilung der Niederschläge zwischen dem Sommer- und Winterhalbjahr werden ebenfalls Probleme in der Land- und Forstwirtschaft aufwerfen.

Klimaänderungen können darüber hinaus Störungen im Wachstumsrhythmus der Pflanzen zur Folge haben. Ungewöhnlich milde Witterungsabschnitte im Winter, beispielsweise im Januar und Februar, könnten zu einer Enthärtung der Gehölze führen, wodurch in nachfolgenden Kälteperioden die Gefahr von Frostschäden an Bäumen zunehmen kann (u.a. Leionen et al. 1997, Leinonen und Hänninen 2002). Ein zeitiger Blattaustrieb oder der früher Blühbeginn birgt ebenfalls die Gefahr eines erhöhten Spätfrosttrisikos für die Pflanzen. Wenngleich unter wärmeren Klimabedingungen die mittlere jährliche Anzahl von Frosttagen abnehmen wird, sind immer noch Wetterlagen möglich, die Spätfröste herbeiführen. Hierbei sind vor allem auch regionale Besonderheiten zu berücksichtigen. Die beispielsweise im Klimaszenario für Sachsen (Enke et al. 2005) gefundene Verlängerung der frostfreien Periode war im Wesentlichen durch das spätere Auftreten von Frühfrost im Herbst begründet. Veränderungen in der Häufigkeit von Spätfrösten waren hingegen nicht erkennbar. Hierdurch ergibt sich bereits mit der ersten markanten Erwärmung im Zeitraum 2021-2030 eine Zunahme der leichten und mittleren Fröste während der Obstblüte. Zur Zeit der Kirschblüte steigt sogar der Anteil der strengen Fröste unter  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  noch an (Abb. 3). Diese Obststart könnte damit stark von

Ertragsausfällen bedroht sein. Beim Apfel, der einen großen Stellenwert im sächsischen Obstanbau einnimmt, ist möglicherweise mit einer Verdoppelung der mittelschweren Fröste (-2 bis -4 °C) während der Blüte zu rechnen. Obwohl das Frostrisiko für alle Fruchtarten im weiteren Verlauf der Erwärmung wieder abnimmt, liegt es in vielen Fällen im Zeitraum 2041-2050 immer noch höher im Vergleich zu heutigen Verhältnissen.



**Abb. 3:** Änderungen in der relativen Häufigkeit von leichtem ( $0 > T_n \geq -2$  °C), mittlerem ( $-2 > T_n \geq -4$  °C) und strengem ( $T_n < -4$  °C) Frost bis 10 Tage nach Beginn der Obstblüte in Sachsen ( $F_s$ ), Ctrl.: Kontrolllauf 1981-2000, Klimaszenario Sz I: 2021-2030, Sz II: 2031-2040, Sz III: 2041-2050

Um die Zunahme von Spätfrostschäden bei Obstgehölzen letztendlich zweifelsfrei beantworten zu können, sind weitere vergleichende Untersuchungen für die Hauptobstanbauregionen Deutschlands erforderlich. Hierbei sind die phänologischen Modelle zu verbessern, wobei vor allem der Zeitraum der Dormanz (winterliche Ruhephase der Gehölze) mit zu berücksichtigen ist. Die Entwicklung dieser komplexeren Modelle erfordert jedoch eine sehr solide Datenbasis (möglichst Daten aus experimentellen Untersuchungen oder Obstbauversuchen), um den Zeitpunkt der Beendigung der Winterruhe bei den Gehölzen möglichst exakt bestimmen zu können. Hier ist weiterer Forschungsbedarf dringend notwendig.

## Literatur

- Chmielewski, F.-M., Müller, A., Küchler, W., 2005: Possible Impacts of climate change on natural vegetation in Saxony (Germany). *Int. J. Biometeorol.* DOI 10.1007/s00484-005-0275-1 (im Druck).
- Chmielewski, F.-M., Müller, A., Bruns, E. 2004a: Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crop in Germany, 1961-2000, *Agricultural and Forest Meteorology* 121(1-2), 69-78.
- Chmielewski, F.-M., Müller, A., Küchler, W. 2004b: Mögliche Auswirkungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, gefördert durch das SLfUG, Eigenverlag HU, 106 S.
- Chmielewski, F.-M.; Rötzer, T. 2001: Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108, 101-112.
- Enke, W., Deutschländer, T., Schneider, F., 2005: Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulations. *Meteorologische Z.*, 14, 247-257.
- IPCC 2001: Third Assessment Report: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, 83 S.
- Leininen, I., Hänninen, H., 2002: Adaptation of the timing of bud burst of Norway spruce to temperate and boreal climates. *Silva Fennica* 36 (3), 695-701.
- Leinonen, I., Tapani, R., Hänninen, H., 1997: Changing environmental effects on frost hardiness of Scots pine during dehardening. *Annals of Botany* 79, 133-138.
- Rötzer, T., Häckel, H., Würländer, R., 1997: Agrar- und Umweltklimatologischer Atlas von Bayern. Selbstverl. DWD, Weihenstephan, Zolling, CD-ROM.

**Klimafolgenforschung anhand von Pflanzenwurzeln**  
**Forschungsergebnisse des Forstbotanischen Gartens Eberswalde**  
Bernhard Götz, Ute Krakau

Teil 1

**Einfluß einer (ehemals stickstoffinduzierten) Vergrasung mit Sandrohr (*Calamagrostis epigejos*) auf Wurzelmasse, -struktur und –tiefenverteilung von Kiefernfeinwurzeln sowie auf bodenchemische Parameter**

Ute Krakau

Forstbotanischer Garten der Fachhochschule Eberswalde und Institut für Ökologie der Technischen Universität Berlin

**Einleitung**

In den Wäldern des nordostdeutschen Tieflandes hat sich in den letzten Jahrzehnten bedingt durch anthropogene Immissionen ein deutlicher Standorts- und Vegetationswandel vollzogen (HOFMANN 1996 und 2002, ANDERS und HOFMANN 1998). Dabei wird die ursprüngliche Waldbodenvegetation tendenziell von stickstoffliebenden Arten verdrängt.

Gerade auf trockenen Standorten und bei beginnender Verlichtung finden Gräser wie Drahtschmielen (*Deschampsia flexuosa*) und Sandrohr (*Calamagrostis epigejos*) mit eher ost-europäisch-kontinentaler Verbreitungstendenz günstige Bedingungen.

Das Sandrohr, früher nur sporadisch als Pionier- und Erstbesiedler auf armen Standorten bekannt, bereitet der Forstwirtschaft Brandenburgs zunehmend Probleme für die Bestandesstabilität und bei der Wiederaufforstung (BERGMANN 1998). Der dichte Wurzelfilz der Gräser wird für die Kiefernfeinwurzeln zu einer starken Konkurrenz um das verfügbare Bodenwasser. So kann eine Sandrohrdecke nach Untersuchungen von MÜLLER (2002) bis zu 50% der jährlichen Niederschlagssumme verbrauchen, eine Blaubeer-Drahtschmielendecke dagegen ca. 28% und eine Himbeer-Drahtschmielendecke etwa 33%.

Anhand des Vergleiches mit solch einer Blaubeer-Drahtschmielen- und einer Himbeer-Drahtschmielendecke soll im folgenden die Wirkung des Sandrohrs auf die Kiefernfeinwurzeln und die bodenchemischen Verhältnisse beschrieben werden.

Die Relevanz für das Thema dieses Workshops besteht zum einen in dem nach wie vor anhaltenden Stickstoffeintrag in unsere Wälder, zum anderen in den Vergrasungen an sich, die durch die für Brandenburg prognostizierten Klimaänderungen weiter gefördert werden könnten. Durch den hohen Wasserverbrauch der Sandrohrdecke sind die Kiefernfeinwurzeln bereits jetzt, ohne die prognostizierte Reduzierung der Niederschläge, einem höheren Wasserstress ausgesetzt und stellen somit ein Freilandmodell für die Reaktion des Feinwurzelsystems auf eine geringere Bodenwasserverfügbarkeit dar.

Die Untersuchungen waren Bestandteil des an der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Forstökologie und Walderfassung Eberswalde angesiedelten, vom BMBF geförderten Verbundprojektes „Waldökosystemforschung Eberswalde – Einfluß von Niederschlagsarmut und erhöhtem Stickstoffeintrag auf Kiefern-, Eichen- und Buchen-Wald- und Forstökosysteme des nordostdeutschen Tieflandes“ während der Jahre 1994 bis 1999. Die sehr zeitaufwendigen Feinwurzeluntersuchungen konnten jetzt am Forstbotanischen Garten der Fachhochschule Eberswalde beendet und durch Bodenanalysen ergänzt werden.

**Untersuchungsflächen und Methoden**

Bei allen der insgesamt sechs Untersuchungsflächen handelt es sich um ca. 74 jährige Kiefernreinbestände auf grundwasserfernen Sandstandorten.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die drei Bestände, die im folgenden näher beschrieben werden.

Tab.1: Charakteristik der Untersuchungsflächen

Flächenbezeichnung	<b>Kienhorst</b>	<b>Hubertusstock</b>	<b>Bayerswald</b>
Vegetationstyp	Blaubeer-Kiefernforst	Himbeer-Drahtschmielen-Kiefernforst	Sandrohr-Kiefernforst
Stammstandortsformengruppe nach KOPP	Z2	M2	K2
Morphologische Humusform	Rohhumus	Rohhumusartiger Moder	Rohhumusartiger Moder bzw. Graswurzelfilzmoder
Bodentyp	Eisenpodsol	Podsol-Braunerde	Schwach podsolierte Braunerde über Bänderparabraunerde
Stammzahl (Anzahl/ha)	916	673	396
Bestockungsgrad	1,03	0,90	0,66
Vorrat an Baumholz (t/ha)	172,9	178,5	124,3
Nettoprimärproduktion (NPP) an Baumholz (/ha*a)	4,10	5,03	3,15

Bei der Fläche Kienhorst stockt die Kiefer auf einem nahezu natürlichen Standort. Charakteristisch für solch arme Standorte ist die hohe Stammzahlhaltung von hier 916 Bäumen pro ha. Die Bodenvegetation wird fast ausschließlich von Blaubeere und Drahtschmielen gebildet.

Bei der Fläche Hubertusstock deutet schon die Änderung der Bodenvegetation zur anspruchsvolleren Himbeere auf die etwas besseren Bodenverhältnisse hin. Als mittlerer Standort (Standortsformengruppe M2) steht diese Fläche exemplarisch für große Teile des nordostdeutschen Tieflandes. Vorrat an Baumholz und NPP steigen im Vergleich zu Kienhorst an.

Beide Flächen liegen innerhalb des Biosphärenreservates Schorfheide-Chorin und sind geringen bis mittleren Immissionen ausgesetzt (ANDERS et al. 2002).

Die Fläche Bayerswald, vom Vegetationstyp und von den Bodenverhältnissen her ursprünglich mit Hubertusstock vergleichbar, war Jahre bis Jahrzehnte einseitigen Stickstoffeinträgen aus einem nahe gelegenen Stickstoffdüngemittelwerk bei Schwedt/Oder ausgesetzt. Durch die damit einhergehende Verlichtung des Bestandes hat sich hier eine starke Sandrohrdecke entwickelt. Aufgrund des niedrigen Bestockungsgrades sind Vorrat und NPP auf dieser Fläche stark erniedrigt.

Alle drei Flächen sind gleichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt; der Jahresniederschlag im Untersuchungs-jahr betrug für Kienhorst und Hubertusstock 531mm und für Bayerswald 488 mm.

Mit Hilfe der Bohrstockmethode wurden im Jahr 1996 drei Beprobungen (Mai, August, Oktober) bis 70 cm Tiefe mit je 12 Wiederholungen durchgeführt. Die Proben wurden getrennt nach Tiefenstufen in lebende und tote Feinwurzeln der verschiedenen Durchmesserfraktionen und in lebende Bodenvegetationswurzeln differenziert.

Bei den lebenden Kiefernfeinwurzeln wurden desweiteren unter dem Binokular Wurzellänge und Wurzelspitzenanzahl ermittelt. Der nach dem Aussammeln der Wurzeln verbliebene Boden aus der Herbstbeprobung wurde nach der Bildung von je drei Mischproben je Tiefen-

stufe lufttrocken gelagert. Je zwei dieser Proben konnten im Jahr 2004 im Labor der Fachhochschule Eberswalde analysiert werden. Neben pH- Ermittlung sowie C- und N-Messung am Elementaranalysator wurden die löslichen Nährelemente K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn und Al nach Ammoniumchloridextraktion am ICP bestimmt. P und K wurden als lactatlösliche Nährstoffe am AAS gemessen.

## Ergebnisse

Trotz der sowohl saisonal als auch methodisch bedingten Streuungen ergeben sich deutliche Abstufungen in den Feinwurzelmassen der drei Flächen (Abb.1). Kienhorst und Bayerswald liegen auf etwa demselben Niveau, während Hubertusstock höhere Werte aufweist. Abbildung 2 macht deutlich, dass die Bodenvegetationswurzeln (ebenfalls in der Durchmesserfraktion 0-1mm ausgeschieden) gleiche bzw. höhere Größenordnungen erreichen. So beträgt der Mittelwert auf der Fläche Bayerswald für die Sandrohrwurzeln umgerechnet 1,32 t/ha.

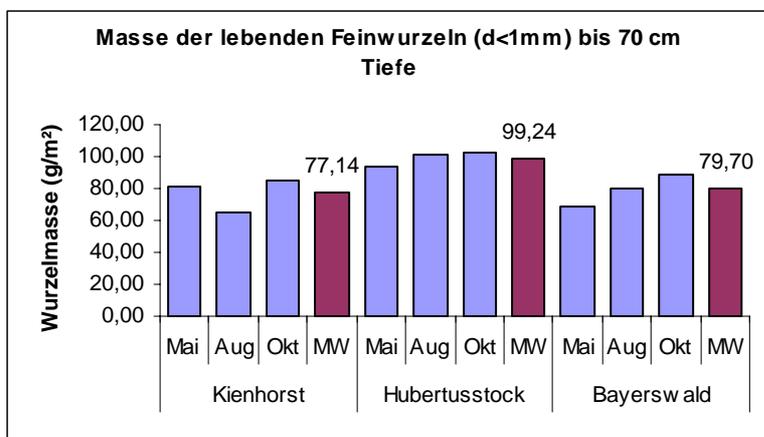


Abb.1: Vergleich der Kiefernfeinwurzelbiomassen der drei Flächen zu den Beprobungsterminen sowie Vergleich der Mittelwerte

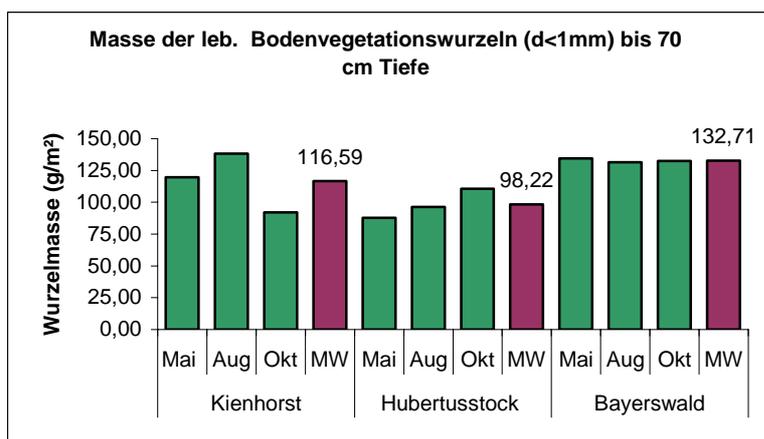


Abb.2: Vergleich der Bodenvegetationsfeinwurzelmassen der drei Flächen zu den Beprobungsterminen sowie Vergleich der Mittelwerte

Aufgrund der bereits erwähnten unterschiedlichen Bestockungsgrade ist es wichtig, die Wurzelmassen mit der oberirdischen Biomasse in Beziehung zu setzen. In Ermangelung der Nadelmassen wurden der Holzvorrat und die Nettoprimärproduktion an Baumholz dazu verwendet und so etwas modifizierte Spross/Wurzelrelationen gebildet (Abb. 3 und 4).

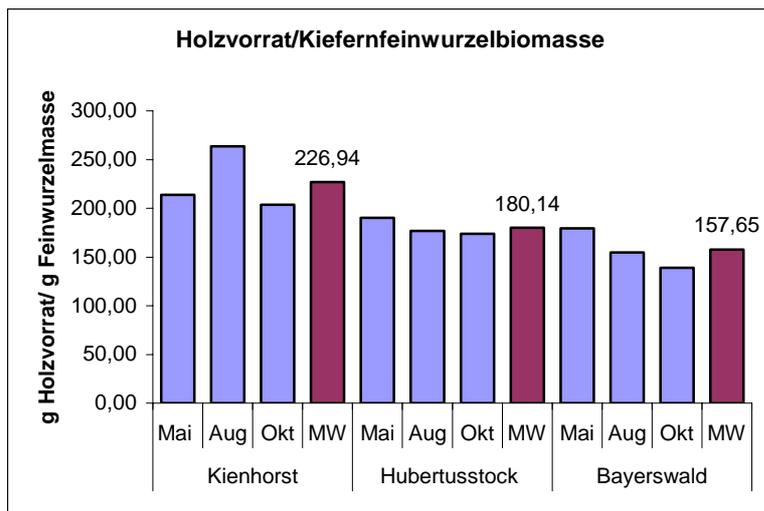


Abb. 3: Verhältnis von Holzvorrat zur Kiefernfeinwurzelbiomasse ( $d=0-1\text{mm}$ ) der drei Flächen zu den Beprobungsterminen sowie Vergleich der Mittelwerte

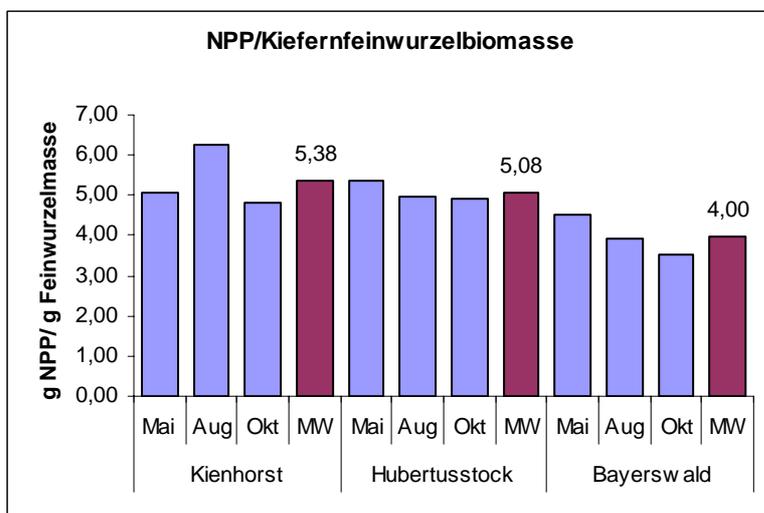


Abb. 4: Verhältnis von Netto-primärproduktion an Baumholz zur Kiefernfeinwurzelbiomasse ( $d=0-1\text{mm}$ ) der drei Flächen zu den Beprobungsterminen sowie Vergleich der Mittelwerte

In beiden Fällen zeigt die Sandrohrfläche Bayerswald das geringste Spross/Wurzelverhältnis, d.h. pro oberirdischer Biomasse werden mehr Feinwurzeln gebildet.

Für die Beschreibung der Wurzelstruktur wurden in Tabelle 2 der Quotient aus Wurzellänge und Wurzelmasse (=Spezifische Wurzellänge) und aus der Anzahl der Wurzelspitzen und der Wurzellänge (=Verzweigung) für die dünnste Feinwurzelfraktion mit einem Durchmesser bis zu 0,5mm gebildet.

Tab. 2: Strukturparameter der Kiefernfeinstwurzeln ( $d<0,5\text{mm}$ ), Mittelwerte der drei Termine

		Kienhorst	Hubertusstock	Bayerswald
Spezifische Wurzellänge (m/g)	Auflage	19,09	18,61	20,93
	Mineralboden	10,52	11,64	15,14
Feinstwurzelverzweigung (Spitzen/m)	Auflage	419,8	434,9	423,6
	Mineralboden	518,6	522,9	497,8

Unterschiede zwischen den Flächen sind hier weniger ausgeprägt, was auf ein relativ starres, durch Umweltveränderungen kaum beeinflussbares Strukturmuster der Kiefernfeinwurzeln schließen lassen könnte. Nur im Mineralboden der Sandrohrfläche Bayerswald zeigt sich eine

Tendenz zu dünneren und weniger verzweigten Feinwurzeln, also eine Tendenz zur extensiveren Bodenerschließung.

Die Tiefenverteilung der Feinwurzeln zu den drei Terminen ist in Abbildung 5 dargestellt. Zwischen den Flächen treten deutliche Unterschiede im Verteilungsmuster auf, während sich das Bild saisonal kaum ändert. Bei Fläche Kienhorst tritt die starke Erschließung der Auflage hervor. Dieses Verhalten ist typisch für Kiefern auf armen Sandflächen. Aufgrund der schlecht abbaubaren Kiefernstreu konnte sich im Laufe der Bestandesentwicklung oberhalb des Mineralbodens eine deutlich abgegrenzte, 5 bis 7 cm hohe, organische Aufлагeschicht anreichern. Wasserspeicherkapazität und Nährstoffangebot sind hier gegenüber dem Mineralboden günstiger. Im Mittel aller untersuchten Proben ist die Auflage in Kienhorst mit 12,3 kg/m<sup>2</sup> Trockenmasse die mächtigste gegenüber 9,4 für Hubertusstock und immerhin 10,4 für Bayerswald.

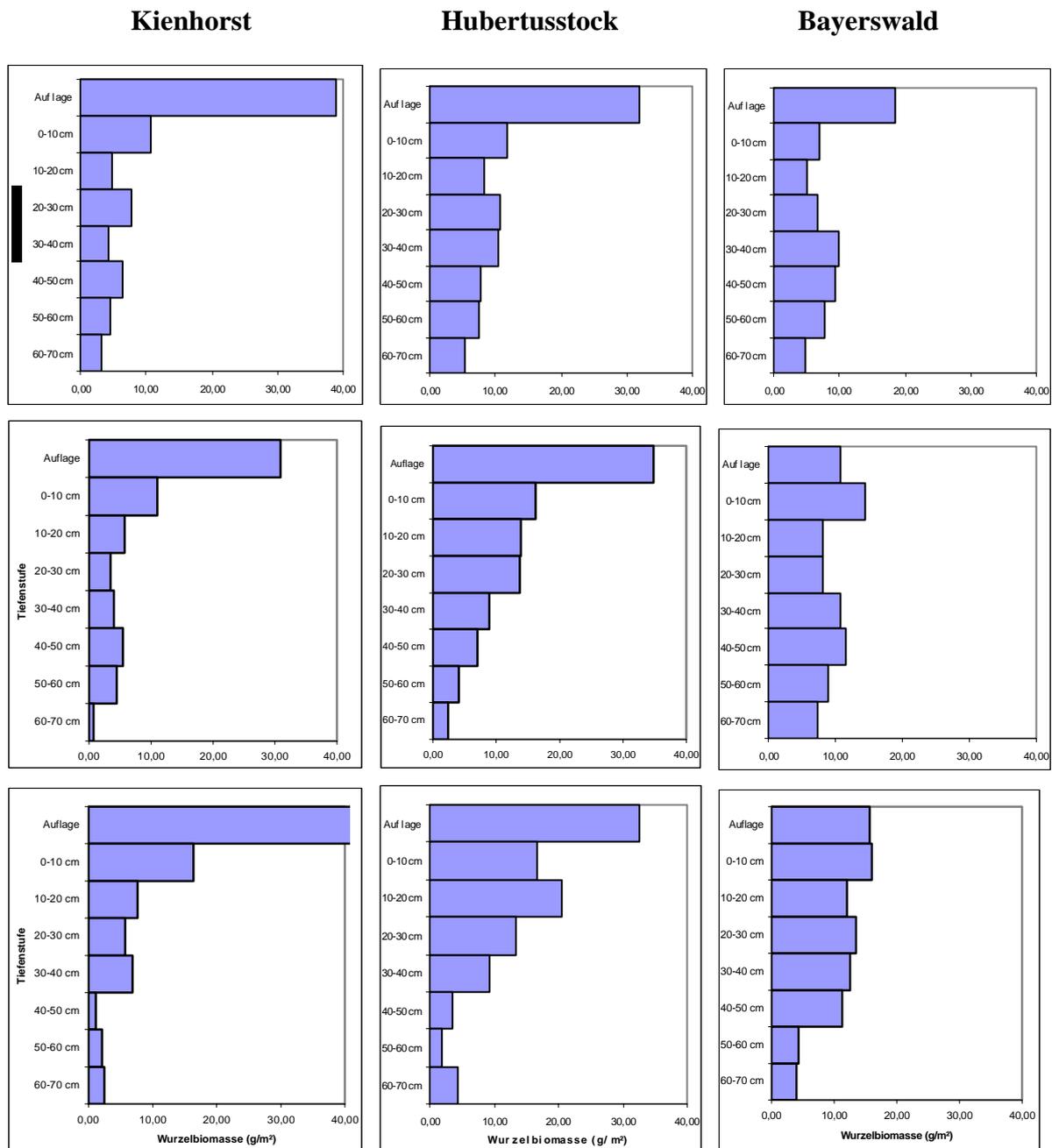


Abb. 5: Tiefenverteilung der Feinwurzelmassen ( $d < 1\text{mm}$ ) zu den drei Beprobungsterminen: oben: Mai, Mitte: August, unten: Oktober

In Hubertusstock ist ebenfalls eine intensive Auflagendurchwurzelung festzustellen, der obere Mineralboden ist auf der etwas nährstoffreicheren Fläche aber besser durchwurzelt.

Der markanteste Befund in Abbildung 5 ist die schwache Auflagendurchwurzelung in Bayerswald. Hier scheinen die Feinwurzeln in der Auflage zugunsten des Mineralbodens reduziert zu sein. Während sich in Kienhorst und Hubertusstock im Mittel 48 bzw. 33% aller Feinwurzeln bis 70 cm Tiefe in der Auflage befinden, sind es in Bayerswald nur 18%. Mit der wachsenden Konkurrenz von Bodenvegetationswurzeln in Bayerswald kann dieser Befund nicht erklärt werden, da sich hier in der Auflage sogar nur 18% der Sandrohrwurzeln befinden im Gegensatz zu 56% Bodenvegetationswurzeln in den Auflagen von Kienhorst und Hubertusstock (alles bezogen auf die Bodenvegetationswurzelmasse  $d < 1\text{mm}$  bis 70cm Tiefe).

Im nachfolgenden sollen nun diesbezüglich die bodenchemischen Untersuchungen betrachtet werden. Tabelle 3 zeigt für die drei Flächen hinsichtlich des pH-Wertes keine Auffälligkeiten. Die Werte sind typisch für die sauren Kiefernstandorte Nordostdeutschlands. Das engere C/N-Verhältnis von Hubertusstock gegenüber Kienhorst ist ebenfalls typisch für etwas reichere Standorte. In der Auflage von Bayerswald ist das C/N-Verhältnis mit 23,7 allerdings sehr stark verengt; ein Wert, der ein Indikator für die Nitratauswaschungsgefahr für Waldböden ist (Arbeitskreis C der Bund-Länder Arbeitsgruppe Level II 2000).

Tab. 3: pH-Wert und C/N-Verhältnis der Oktoberbeprobung auf den drei Flächen

Analyse	Tiefe	Kienhorst	Hubertusstock	Bayerswald
<b>pH(H<sub>2</sub>O))</b>	Auflage	3,45	3,64	3,79
	0-5cm	3,55	3,72	3,63
	5-10cm	3,72	3,89	3,72
	10-20cm	4,01	4,06	4,03
	30-40cm	4,88	4,80	4,69
	50-60cm	4,88	5,21	4,89
<b>C/N</b>	Auflage	29,3	27,2	23,7
	0-5cm	30,8	24,5	24,0
	5-10cm	30,3	23,8	24,2
	10-20cm	29,7	25,5	24,7
	30-40cm	24,3	22,0	22,8
	50-60cm	20,8	18,7	19,8

In Abbildung 6 sind drei der wichtigsten Nährelemente in Abhängigkeit von der Tiefe dargestellt. Der helle Balken für die Fläche Bayerswald zeigt für alle drei Elemente im Vergleich zu Hubertusstock in der Auflage niedrigere, dafür im oberen Mineralboden höhere Werte an. Dieselbe Tendenz zeigen Magnesium und Eisen sowie in etwas abgeschwächter Form Phosphor und die effektive Kationenaustauschkapazität (hier nicht dargestellt).

Diese anscheinende „Verlagerung“ von Nährelementen könnte als mögliche Ursache für die „Verlagerung“ der Feinwurzeln aus der Auflage in den oberen Mineralboden auf der Sandrohrfläche Bayerswald interpretiert werden. Ob die bodenchemischen Veränderungen ihre Ursache in Humusumwandlungen bzw. einem Humusvorratsabbau haben und ob sie primär durch den Stickstoffeintrag oder die qualitative Veränderung der Streu durch das Sandrohr bedingt sind, sollte durch weitere Untersuchungen verfolgt werden. Innerhalb des Projektes wurde zudem von J.WÖLLECKE (2001) eine Verschlechterung der Mykorrhizierungszustandes in Auflage und ersten 10 cm des Mineralbodens von Bayerswald festgestellt.

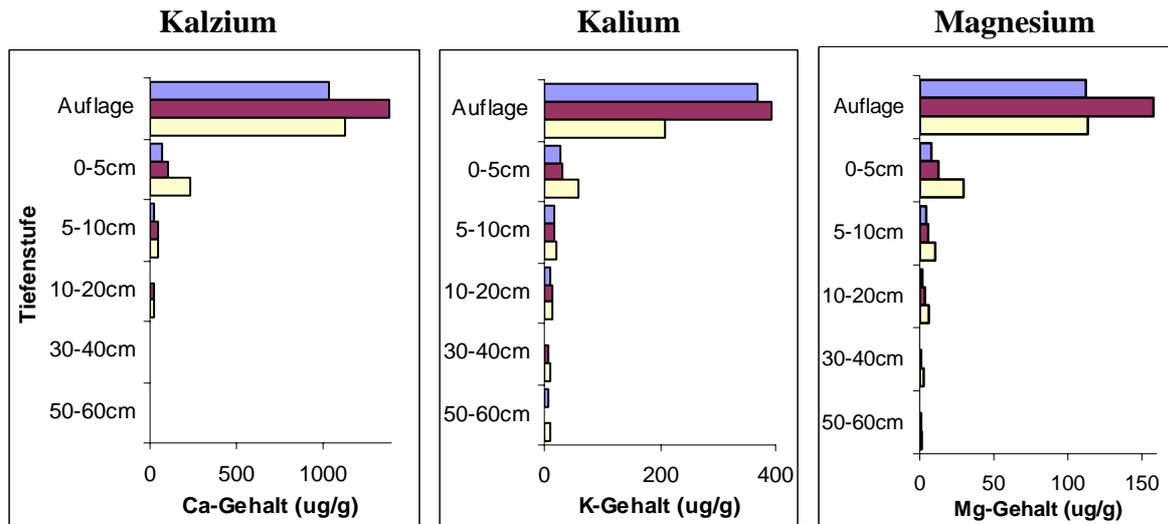


Abb.6: Gehalte an löslichem Kalzium, Kalium und Magnesium im Boden der Oktoberbeprobung; ■ Kienhorst, ■ Hubertusstock, ■ Bayerwald

### Zusammenfassung

Anhand des Vergleichs von drei Kiefernbaumhölzern auf armen, grundwasserfernen Sanden wurde der Einfluss einer starken Vergrasung mit Sandrohr auf die Kiefernfeinwurzeln in ihrer Masse, ihrer Struktur und ihrer Tiefenverteilung sowie auf die bodenchemischen Verhältnisse untersucht.

Auf die stärkere Konkurrenz durch die Sandrohrwurzeln reagiert die Kiefer mit einer in Bezug auf die oberirdische Biomasse erhöhten Feinwurzelmasse.

Die Strukturparameter der Feinwurzeln wie Spezifische Wurzellänge und Verzweigungsgrad scheinen auch bei Änderung der Bodenverhältnisse relativ konstante Größen zu sein. Lediglich im Mineralboden der Sandrohrfläche zeigt sich durch Erhöhung der Spezifischen Wurzellänge und leichte Erniedrigung des Verzweigungsgrades eine Tendenz zu einem extensiveren Feinwurzelsystem.

Die deutlichste Veränderung vollzieht sich in der Tiefenverteilung der Feinwurzeln. Im Vergleich mit den beiden anderen Flächen ziehen sich auf der Sandrohrfläche die Feinwurzeln aus der Auflage zurück, während sie im oberen Mineralboden verstärkt auftreten.

Dieselbe Veränderung zeigen auch einige wichtige Nährelemente, wie hier am Beispiel von Kalium, Kalzium und Magnesium beschrieben wird. Die möglichen Ursachen für die Verschiebungen in der Feinwurzel- und Nährstoffverteilung sollten in biochemischen Veränderungen der Auflageschicht gesucht werden.

Der hier vorgestellte spezielle Fall steht auch als Beispiel dafür, wie stark die Feinwurzeln in das bodenökologische Gefüge eingebunden sind und dass Interpretationen von Feinwurzelveränderungen nur unter Einbeziehung möglichst aller Einflussfaktoren möglich sind.

Auch umfangreicher angelegte Wurzelstudien unter Freilandbedingungen (STOBER et al. 2000) oder mit experimentellen Veränderungen (WIEMKEN et al. 2001) belegen die Bedeutung der konkreten Bodenbedingungen für die Richtung von Wurzelveränderungen.

Die prognostizierten Klimaveränderungen (Stichworte: Temperatur, Feuchte, Kohlendioxid) zusammen mit leider immer noch anhaltenden Emissionen (vor allem von Stickstoff) bilden ein multifaktorielles Gefüge, dessen Auswirkungen auf die Wurzelsysteme nur durch klar definierte Langzeitstudien untersucht werden können (JOSLIN et al. 2000). Nur so wäre es möglich, die Vielzahl der bereits existierenden Modelle und Hypothesen (wie z.B. NADELHOFFER et al. 2000) zu verifizieren und zu verknüpfen.

## Literatur

ARBEITSKREIS C der Bund-Länder Arbeitsgruppe Level II: Kennwerte zur Charakterisierung des ökochemischen Bodenzustandes und des Gefährdungspotentials durch Bodenversauerung und Stickstoffsättigung an Level II-Waldökosystem-Dauerbeobachtungsflächen. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn 2000, 167 S.

ANDERS, S.; BECK, W.; BOLTE, A.; HOFMANN, G.; JENSSEN, M.; KRAKAU, U.; MÜLLER, J.: Ökologie und Vegetation der Wälder Nordostdeutschlands. Verlag Dr. Kessel Oberwinter 2002, 283 S.

ANDERS, S.; HOFMANN, G.: Standorts- und Vegetationswandel in Wäldern. Tagungsbericht des Brandenburgischen Forstvereins e.V. zur Jahrestagung 1998, Hendrik Bäßler Verlag Berlin 1998, S. 18-47

BERGMANN, J.-H.: Die Bekämpfung von Sandrohr in Brandenburg in Vergangenheit und Gegenwart. Tagungsbericht des Brandenburgischen Forstvereins e.V. zur Jahrestagung 1998, Hendrik Bäßler Verlag Berlin 1998, S.48-57

HOFMANN, G.: Vegetationswandel in den Wäldern des nordostdeutschen Tieflandes. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft. 185(1996), S.45-72

HOFMANN, G.: Entwicklung der Waldvegetation des nordostdeutschen Tieflandes unter den Bedingungen steigender Stickstoffeinträge in Verbindung mit Niederschlagsarmut. In: Anders et al.: Ökologie und Vegetation der Wälder Nordostdeutschlands, Verlag Dr. Kessel Oberwinter 2002, S. 24-41

MÜLLER, J.: Wirkungszusammenhänge zwischen Vegetationsstrukturen und hydrologischen Prozessen in Wäldern und Forsten. In: Anders et al.: Ökologie und Vegetation der Wälder Nordostdeutschlands, Verlag Dr. Kessel Oberwinter 2002, S.93-122

NADELHOFFER, K.J.; NORBY, R.; FITTER, A.; JACKSON, R.: The potential effects of nitrogen deposition on fine-root production in forest ecosystems. *New Phytologist*, 147 (1) 2000, S. 131-139

JOSLIN, J.D.; WOLFE, M.H.; HANSON, P.J.: Effects of altered water regimes on forest root systems. *New Phytologist*, 147 (1) 2000, S. 117-129

STOBER, C.; GEORGE, E.; PERSSON, H.: Root Growth and response to nitrogen. In: Schulze, E.-D.: Carbon and nitrogen cycling in European forest ecosystems. *Ecological Studies* 142, Springer Verlag Berlin Heidelberg 2000, S. 99-121

WIEMKEN, V.; LACZKO, E.; INEICHEN, K.; BOLLER, T.: Effects of elevated carbon dioxide and nitrogen fertilization on mycorrhizal fine roots and the soil microbial community in beech-spruce ecosystems on siliceous and calcareous soil. *Microbial Ecology* 42 (2) 2001, S. 126-135

WÖLLECKE, J.: Charakterisierung der Mykorrhizazönosen zweier Kiefernforste unterschiedlicher Trophie. *Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung* 17, 2001, 185 S. (zugleich Dissertation an der Technischen Universität Cottbus)

**Klimafolgenforschung anhand von Pflanzenwurzeln**  
**Forschungsergebnisse des Forstbotanischen Gartens Eberswalde**  
**Bernhard Götz, Ute Krakau**  
**Fachhochschule Eberswalde**

**Teil 2, von Bernhard Götz**

**Das Eberswalder Wurzellaboratorium im Forstbotanischen Garten der Fachhochschule Eberswalde – Vergangenheit und Zukunft –**

Das Eberswalder Wurzellaboratorium/Wurzelkeller besteht aus 10 Wurzelkästen. Diese haben eine Grundfläche von jeweils 1 m<sup>2</sup>, sind 2 m hoch (Abb. 1) und im Boden oberflächenbündig eingelassen (Abb. 2). Sie sind als Lysimeter gefertigt und ermöglichen die Erfassung von Stoffflüssen. Durch einen Gang sind die Wurzelkästen von unten her zugänglich (Abb. 3). 2 Seitenflächen der Kästen sind vollständig verglast und erlauben die Beobachtung des Wurzelwachstums zu untersuchender Pflanzen.

Zur Geschichte

- . Fertigstellung des Wurzellaboratoriums 1939 unter Prof. J. Liese, Leiter des Institutes für Forstbotanik
- . Zerstörung des Wurzelkellers im 2. Weltkrieg
- . ab 1953 Wiederaufbau des Wurzelkellers unter Prof. H. Lyr, Leiter des Institutes für Forstbotanik
- . zu DDR-Zeiten wichtige und wesentliche Untersuchungen zum Wurzelwachstum unserer heimischen, aber auch fremdländischer Baumarten, besonders durch Dr. G. Hofmann und Prof. H. Lyr
- . im Jahr 2000 Schließung des Wurzelkellers aus bautechnischen Gründen
- . ab 2001/2002 vollständige und umfassende Rekonstruktion der Gebäudehülle des Wurzelkellers
- . 2003/2004 Entwicklung und Einbau der neuen Wurzelkästen
- . 2005 Befüllen der Wurzelkästen mit regionaltypischem Waldboden (Finowtaler Sandbraunerde), und Einbringen der charakteristischer Bodenvegetation (Abb. 4 u. 5). 2005 Leerlaufbetrieb zur Überprüfung der Gerätetechnik u.a.

Historische Arbeiten im Wurzellaboratorium

Aufnahmen des Wurzel- und Sprosswachstums zahlreicher heimischer und exotischer Baumarten (bspw. HOFFMANN 1965, 1966a, 1966b, LYR & HOFFMANN 1992). Die fortlaufende zerstörungsfreie Aufzeichnung liefert neben der quantitativen Erfassung von Wachstumsvorgängen auch ein nahezu vollständiges Bild über den jahreszeitlichen Verlauf. Dies ermöglicht die Darstellung von Beginn und Ende der Wachstumsvorgänge, sowie von Zeiten unterschiedlicher Aktivität (Abb. 6, 7, 8, 9). Bereits 1963 „erste Untersuchungen“ zum „globalen Klimawandel“ in Eberswalde (Abb. 10).

Zukünftige Forschungsarbeiten

An der Fachhochschule Eberswalde startet im nächsten Jahr (2006) ein neuer Studiengang (Global Change Management). Die Studenten sollen sich hierbei u.a. mit versch. Messtechniken

zur Erfassung meteorologischer und pflanzenphysiologischer Messgrößen beschäftigen. Zu diesem Zweck liegt der Forschungsschwerpunkt im Forstbotanischen Garten im Bereich der Klimafolgeforschung. Gegenstand der Untersuchungen sind hierbei stets Wachstumsvorgänge in Bäumen und deren Reaktion auf Änderungen im Klima. Dies bedingt die Betrachtung über einen längeren Zeitraum. Dabei sind Untersuchungen im Wurzelraum im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung von großer Bedeutung. Dies belegen zahlreiche Untersuchungen/Arbeiten auf diesem Forschungsgebiet (AHLSTRÖM et al., 1988; BAITULIN, 1996; DENGLER, 1935; JACKSON et al., 2000; KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 1997 und viele andere). Auch aktuelle Forschungsarbeiten die z. Zt. im Rahmen einer Dissertation (Arbeitstitel: Untersuchungen zur jährlichen Dynamik der Kohlenstoffbindung heimischer und fremdländischer Baumarten vor dem Hintergrund einer möglichen Klimaerwärmung) am Forstbotanischen Garten (in Zusammenarbeit mit der Universität Bayreuth, ökologisch botanischer Garten) durchgeführt werden zeigen, **dass besonders in niederschlagsarmen Regionen wie Brandenburg zusätzliche Erhebungen im Wurzelraum notwendig sind.**

Während die oberirdischen Lebensorgane von Pflanzen i.d.R. gut zugänglich sind, ist dies bei Wurzeln eher schwierig, weshalb notwendige Untersuchungen meist nicht oder nur unzureichend durchgeführt werden. Mit der Sanierung des Wurzelkellers im Forstbotanischen Garten steht nun ein „neues“ unterirdisches Wurzellabor zur Verfügung. Insbesondere mit Hilfe der neuen technischen Ausstattung der Wurzelkästen durch wägbare Lysimeter ist es möglich, neben der visuellen Erfassung der Wurzeln auch Informationen über Stoffflüsse und den Wasserhaushalt zu erfahren. Dies ist besonders vor dem Hintergrund einer Klimaänderung und Änderung der Niederschlagsverteilung von besonderer Bedeutung. Besondere Beachtung findet hierbei neben der heimischen Wald-Kiefer (*Pinus sylvestris*), die in einem hohen Maße die Wälder Brandenburgs bestimmt, die Rot-Buche (*Fagus sylvatica*), als in weiten Teilen potentiell natürliche Baumart, die sich im NO-deutschen Tiefland am Rande ihres Verbreitungsgebietes befindet. Die Rot-Buche wird seit einiger Zeit im Rahmen des Waldumbauprogrammes der brandenburgischen Forstbehörden wieder verstärkt eingebracht. Untersuchungen mit verschiedenen Herkünften sollen den Einfluß von Klimaänderungen prüfen.



Abb. 1: Wurzelkästen beim Einsetzen in den Wurzelkeller im Forstbotanischen Garten Eberswalde



Abb. 2: Ansicht Wurzellaboratorium mit Klimastation im Forstbotanischen Garten.



Abb. 3: Wurzelkästen eingepasst im Wurzelkeller im Forstbotanischen Garten.



Abb. 4: Lysimeter befüllt mit Finowtaler Sandbraunerde



Abb. 5: Bodenvegetation

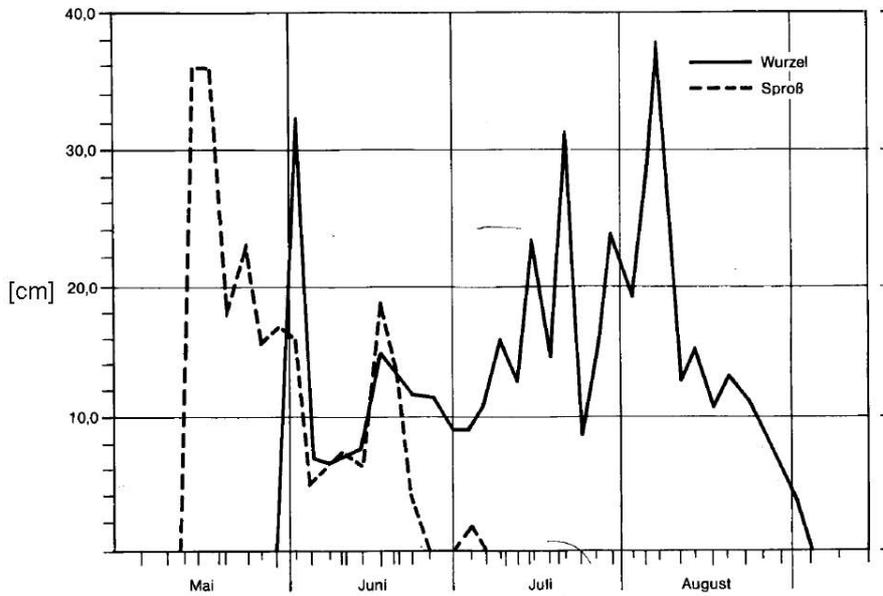


Abb. 6: Jahreszeitlicher Verlauf von Wurzel- und Sprosswachstum von Rot-Eiche (*Quercus borealis var. maxima*), aufgenommen im Wurzelkeller 1962 in Eberswalde (nach HOFFMANN 1965)

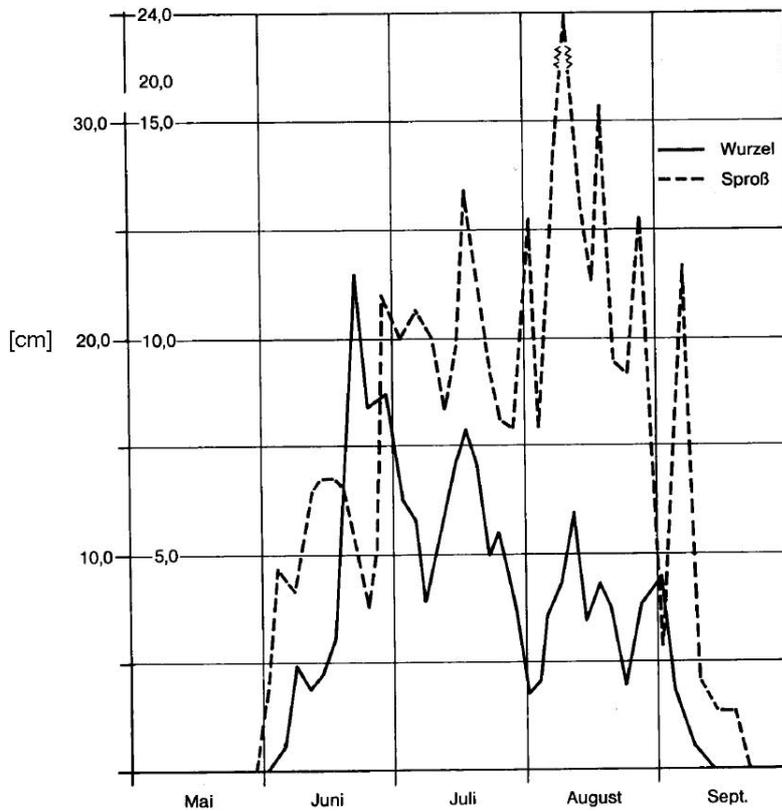


Abb. 7: Jahreszeitlicher Verlauf von Wurzel- und Sprosswachstum von *Populus x euramericana*, Sacrau 79), aufgenommen im Wurzelkeller 1957 in Eberswalde (nach HOFFMANN 1965)

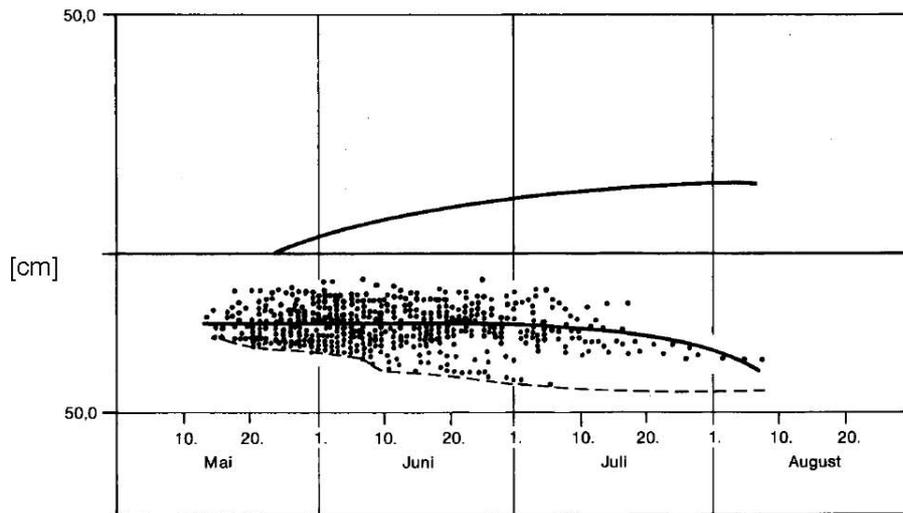


Abb. 8: Jahreszeitlicher Verlauf von Wurzel- und Sprosswachstum sowie der Feinwurzel-dichte von Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*), aufgenommen im Wurzelkeller 1957 in Eberswalde (nach HOFFMANN 1966a)

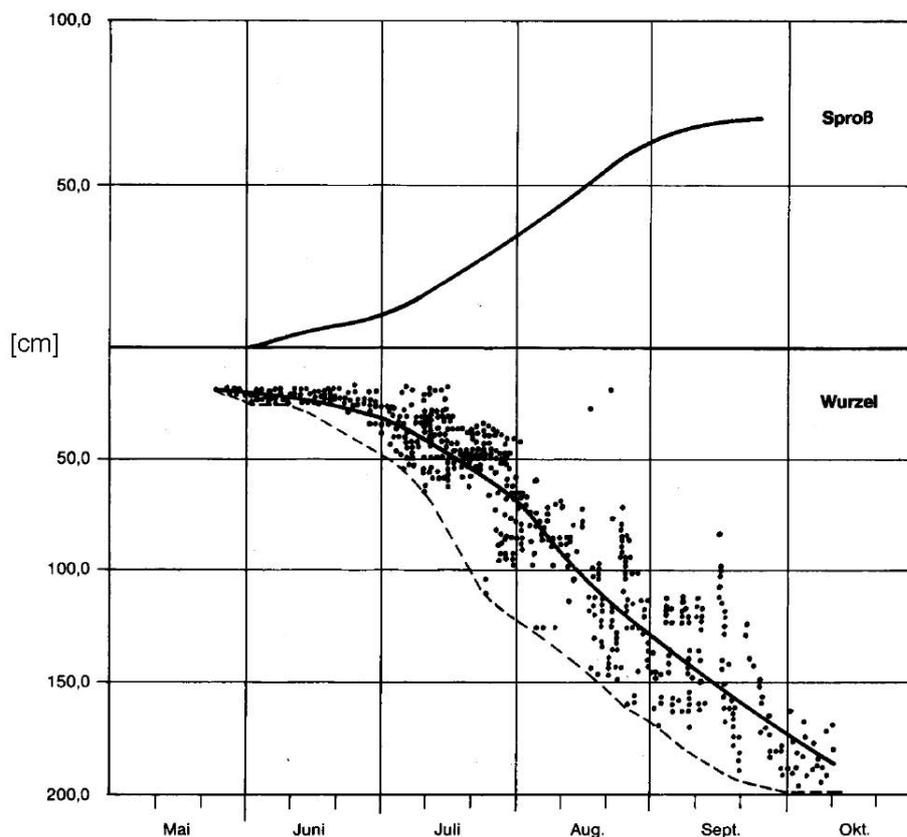


Abb. 9: Jahreszeitlicher Verlauf von Wurzel- und Sprosswachstum sowie der Feinwurzel-dichte von Robinie (*Robinia pseudoacacia*), aufgenommen im Wurzelkeller 1957 in Eberswalde (nach HOFFMANN 1966a)

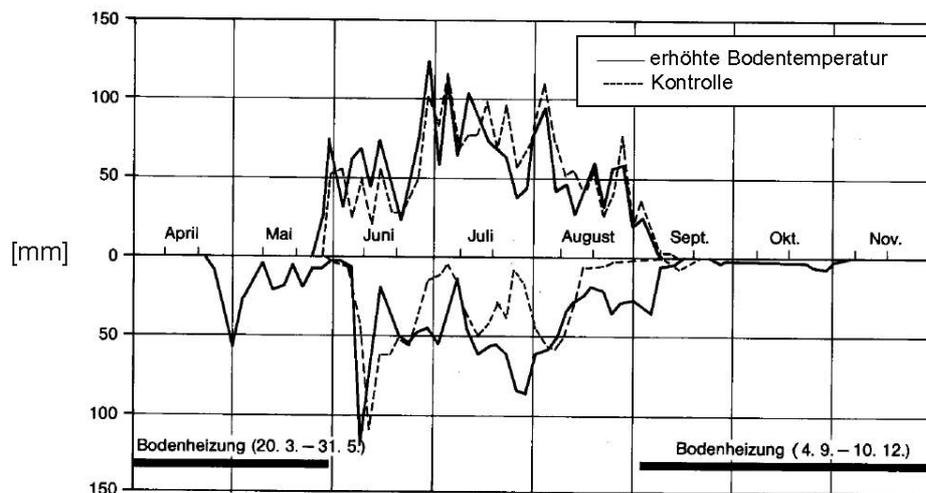


Abb. 10: Jahreszeitlicher Verlauf von Wurzel- und Sprosswachstum von Robinie (*Robinia pseudoacacia*) bei um 5°C erhöhter Bodentemperatur, aufgenommen im Wurzelkeller 1963 in Eberswalde (nach HOFFMANN 1966a)

#### Literatur

Ahlström et al. (1988): Fertilization in a mature Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand - effects on fine roots. *Plant and Soil*

Baitulin, (1996): Root research in natural plant communities of Kazakhstan

Dengler, A. (1935): *Waldbau auf ökologischer Grundlage: ein Lehr- und Handbuch*

Hoffmann, G. (1965): Möglichkeiten der Auswertung pflanzenphysiologischer Untersuchungen zur Aufstellung agrotechnisch optimaler Kulturpflegetermine. *Soz. Forstwirtschaft* 15: 294-299

Hoffmann, G. (1966a): Beziehungen zwischen Wachstum und Knöllchenbildung während der Jugendentwicklung von *Robinia pseudoacacia* L., *Arch. f. Forstwesen* 15(1966b): 585-589.

Hoffmann, G. (1966b): Verlauf der Tiefendurchwurzelung und Feinwurzelbildung bei einigen Baumarten, *Arch. f. Forstwesen* 15(1966b): 825-856

Jackson et al. (2000): Root water uptake and transport: using physiological processes in global predictions. *Trends in Plant Science*

Kutschera, Lichtenegger, (1997): *Bewurzelung von Pflanzen in verschiedenen Lebensräumen*

Lyr, H., Hoffmann, G. (1992): 14.1. Wachstum – Einflussfaktoren. In: Lyr, H., Fiedler, H.J., Tranquillini, W. (Hrsg.) (1992): *Physiologie und Ökologie der Gehölze*. Gustav Fischer, Jena, Stuttgart



## **AquaTerra: An Integrated EU Project about the Behavior of Pollutants in the Soil-Groundwater-System in the Context of Climate Change**

Johannes A.C. Barth, Tilman Gocht, Peter Grathwohl

Eberhard Karls Universität Tübingen / Zentrum für Angewandte Geowissenschaften (ZAG) /  
Sigwartstr. 10 / D-72076 Tübingen

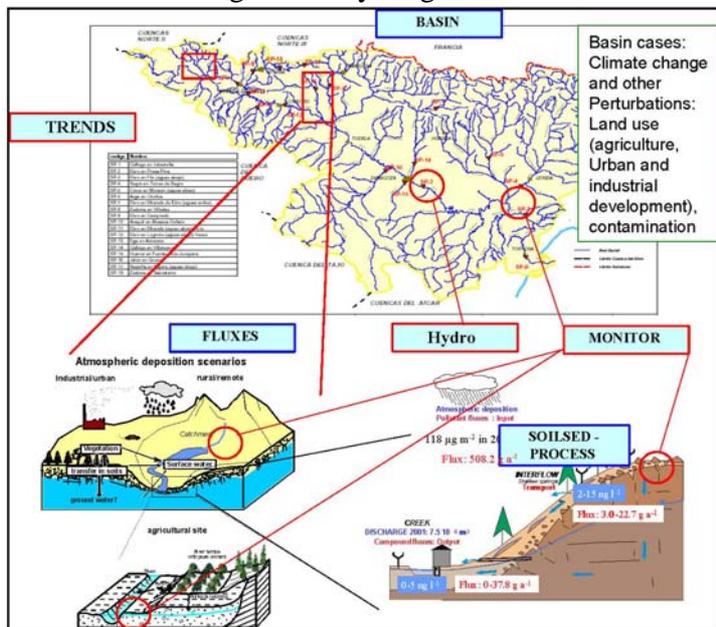
Johannes.Barth@uni-tuebingen.de

Storage and mobility of persistent pollutants (POP) in the water cycle have memory time scales that range from decades to geological periods. Within this context, the behavior of organic and inorganic pollutants in soils, sediments, ground- and surface water at catchment and/or regional (river basin) scale is poorly understood. This lack of understanding results in part from yet to be defined quantification methods for emerging compounds such as pesticides or pharmaceuticals. On the other hand, a lack of knowledge of loading, mobility and sorption behavior of organic and inorganic pollutants leads to uncertainties about their long-term fate and transport in the environment.

The EU 6th Framework Integrated Project “*AquaTerra*” addresses these issues and aims to provide the foundations for an improved understanding of the behavior of environmental pollutants. As one of the first environmental Integrated Projects within the 6th EU Framework Program, *AquaTerra* has been active since the 1st June 2004 and is scheduled to run until end of May 2009. The project has the full title “Integrated modeling of river-sediment-soil-groundwater systems; advanced tools for the management of catchment areas and river basins in the context of global change” and hosts a multidisciplinary team of 45 partner organizations in 12 EU countries as well as in Romania, Switzerland and Serbia. Disciplines involved range from Agricultural Sciences, Analytical Chemistry, Chemical Engineering, Computer Sciences, Economics, Ecotoxicology, Environmental Engineering, Geoecology, Geophysics, Hydrology, Hydrogeology, Mathematics, Microbiology, Soil Sciences to Socio-economics. Scientific management of the project is carried out by the Center for Applied Geoscience at the University of Tübingen (ZAG), while the associated company, Attempto GmbH, ensures financial and administrative management. More project details can be found under <http://www.eu-aquaterra.de/> and in Barth et al. (2005 a, b).

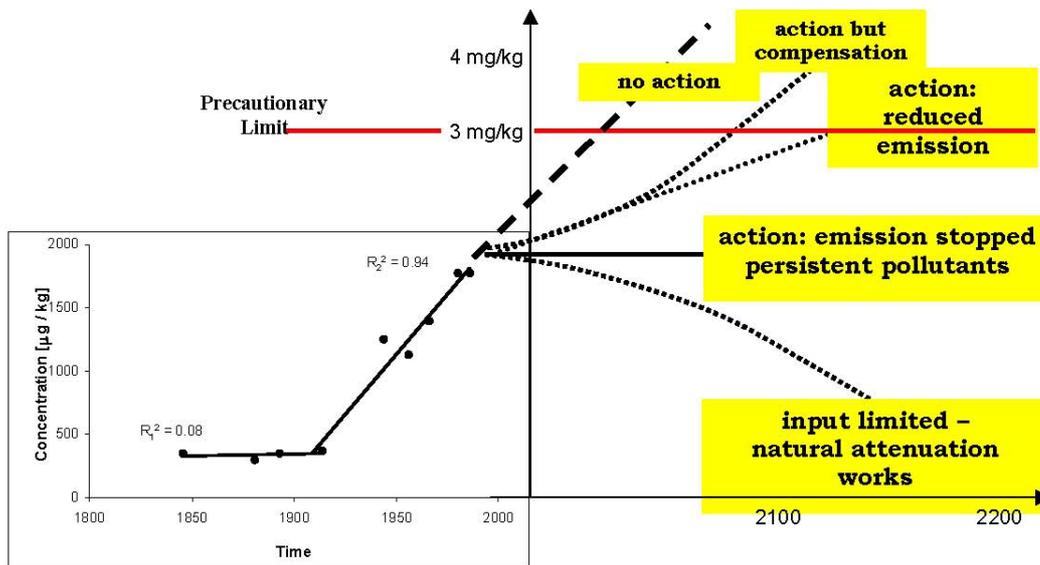
Project activities involve researchers but also practitioners and end-users such as policy-makers, river basin managers and regional and urban land planners. The principal task of *AquaTerra* is to provide the foundations for an improved understanding of the behavior of environmental pollutants. New field and laboratory as well as historical data will be assembled and addressed in four European river basins (Ebro, Meuse, Elbe and Danube) and a small French catchment, the Brévilles. Based on field- and laboratory data, various numerical models of the groundwater-soil-sediment-river system will be developed within *AquaTerra*. Specifically, these models will operate on biogeochemical, climatological, and material flux data and will enable anticipation of adverse trends in soil functioning and the water cycle. In most instances these trends are results of global and climatic changes. Models will also integrate key biogeochemical and hydrological processes from the laboratory to the river basin scale. Conceptual impact assessment integrated models for characterizing and assessing direct (physico-bio-chemical processes) and indirect (social and economical processes) impact of Global Change will also be developed in order to provide scientifically based decision support systems for different stakeholders in charge of river basin management.

For understanding the groundwater-soil system, the driving questions of the project include how laboratory scale experiments can provide information relevant for the field and which processes have to be considered at what spatio-temporal scale. Fig. 1 shows some of sub-projects of *AquaTerra* (blue boxes) that operate on various levels. For flux considerations the input of climatic factors is perhaps the most obvious, because changing precipitation patterns may alter input, mobilization storage and recycling behavior.



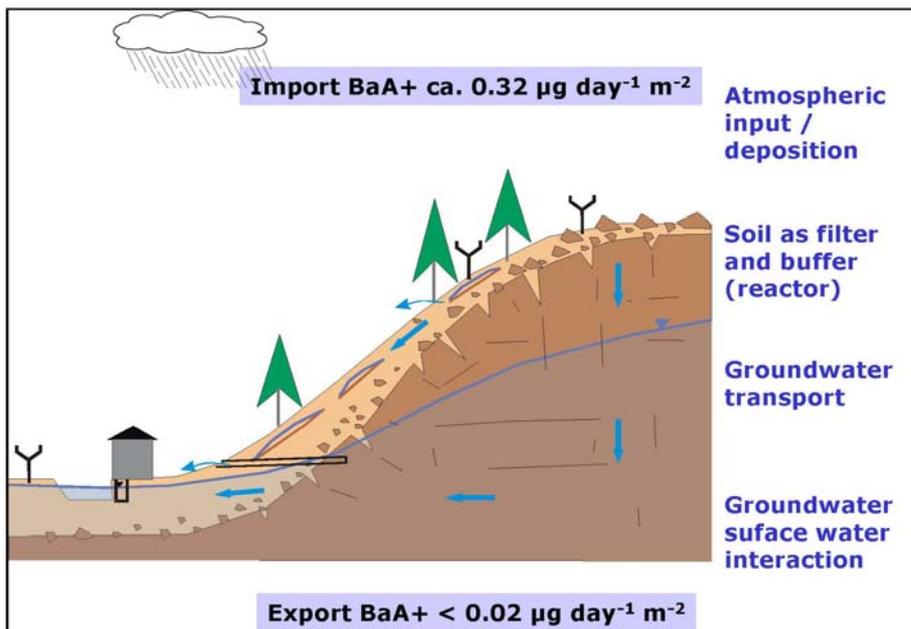
**Fig. 1.** Various sub projects of *AquaTerra* working on several scales.

When considering general input of pollutants into soil and groundwater systems (c.f. Jones et al. 1989) several scenarios can be outlined (Fig. 2). If no action is taken, the input trend might continue with the same slope as in the past. For action and compensation about pollutant input the concentration increase may develop in a moderate fashion, while the concentration increase may stop altogether if we assume a complete stop of emission. On the other hand, concentration decreases are possible when natural attenuation recycles pollutants. Leaching and biodegradation of pollutants in soils may be influenced seriously by alterations of climate patterns. For instance, the amount of soil moisture is an important consideration during natural attenuation of pollutants by plants and bacteria. If soil moisture levels change, the degree of natural attenuation may be influenced as well. This together with changing groundwater levels may have important influences on pollutant behavior in the subsurface.



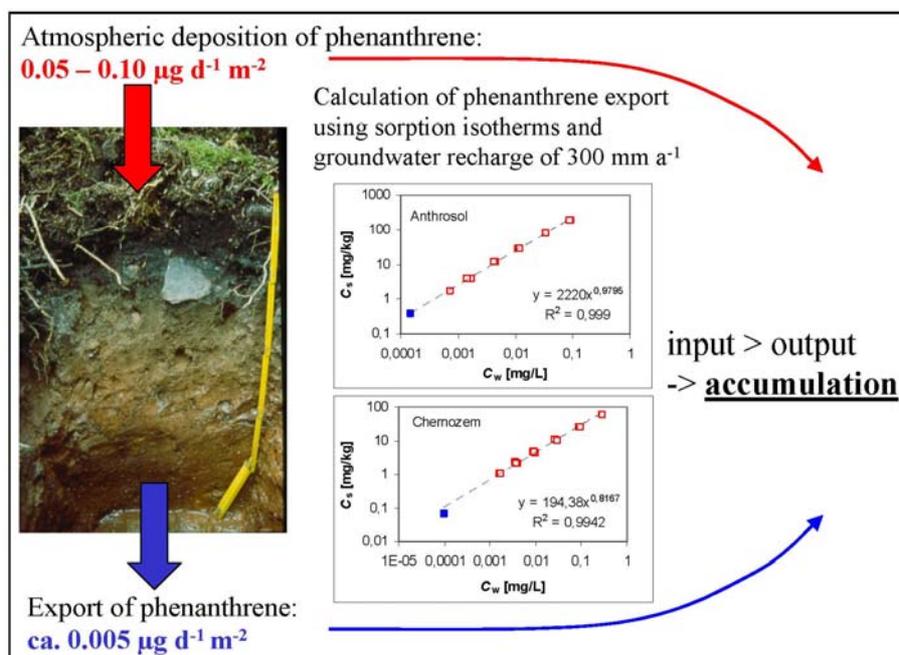
**Fig. 2** Several scenarios of pollutant burden in soils and groundwater systems (Goeth and Grathwohl, 2004; data from Jones et al., 1989).

These scenarios can perhaps best be explained by focusing on polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), since this group is among the most ubiquitous among the POPs. For instance, measurements of input of high molecular weight PAHs (BaA+: a group of 4 - 6 ring PAHs starting with benz(a)anthracene) to various catchments from previous studies have revealed that the sum of incoming BaA+ by far exceeds those of the output (i.e. leaching) from topsoils. This can be shown by establishing a mass balance on the catchment scale (Fig. 3). This figure illustrates that more than 90 % of incoming PAH accumulate in soils. To date, it remains however unclear how they can be mobilized or turned over under changing climatic conditions.



**Fig. 3** Mass balance of the benz(a)anthracene PAH group on the catchment scale (Gocht, 2005)

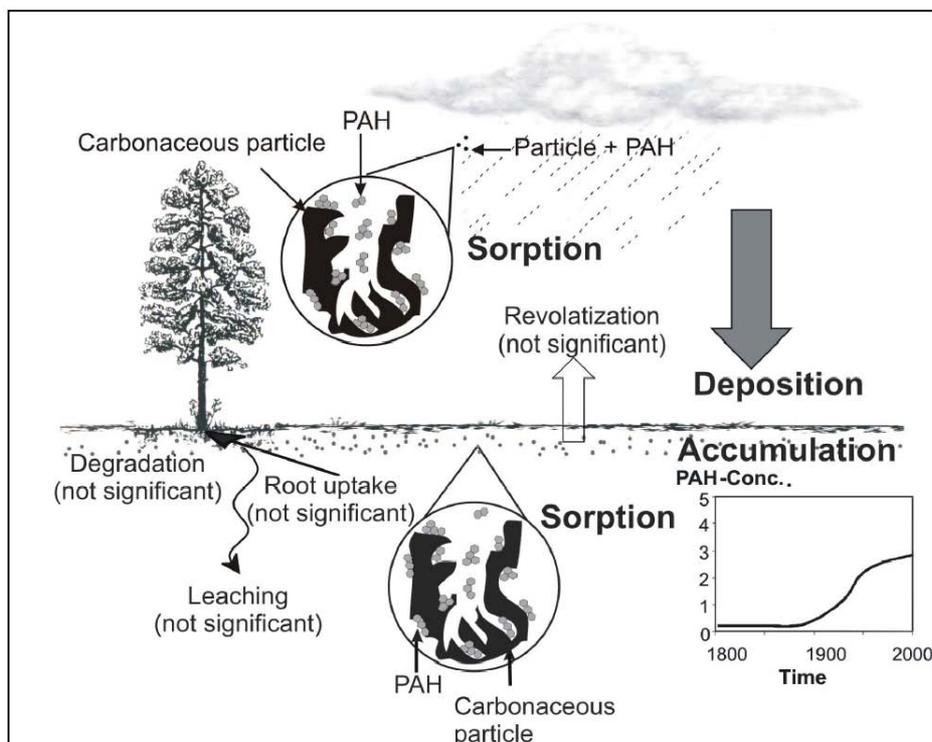
Another example is the deposition of the PAH phenanthrene and its subsequent leaching predicted from sorption isotherms (Fig. 4). The behavior of phenanthrene is similar to other PAH and the largest amount of its deposited mass seems to accumulate in the soils under present conditions.



**Fig. 4** Input and export of phenanthrene calculated with sorption isotherms

The current model for storage of POP in soils is related to the black carbon pool in soils (Fig. 5). While turnover of POP in soils remain current topics of investigation within

*AquaTerra*, this form of sorptive storage may have implications for the bioavailability of these compounds.



**Fig. 5** Black carbon (carbonaceous particles) in atmosphere and soils and accumulation of PAH in soils (Gocht et al., 2005)

In summary, the flux behavior of POP in soils and the groundwater is to a large extent influenced by climatic factors such as precipitation that influence pollutant input patterns, wash out, mobilization and turnover. Further investigations of fluxes, modeled transport sorption and biodegradation are currently being performed within *AquaTerra*. Results will then be fed in to up-scaled models to enable predictions of contaminant behavior under various conditions and on larger scales.

## References

Barth J.A.C., Fowler H. (2005a) *AquaTerra*, a new Integrated Project in FP 6: active since June 2004. *Land Contamination & Reclamation, Clean-up & regeneration bulletin*, 13, part two, 201 – 205.

Barth J.A.C., Grathwohl P. (2005b) *AquaTerra*, ein neues Integriertes Projekt im 6. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Kommission. *Vom Wasser* 103 (1) 2005, Wiley Journal of the association of the „Wasserchemischen Gesellschaft“ / Association of German Chemists Heft 1/05 , 103, 20-21.

Gocht, T. (2005): Die vier griechischen Elemente: Massenbilanzierung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Kleingebieten des ländlichen Raumes. *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA)*, C79, 140 S

Gocht, T., Ligouis, B., Hinderer, M., Grathwohl, P. (2005): Long-term accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in rural soils. *Environ. Sci. Technol.* (submitted)

Gocht, T., Grathwohl, P. (2004): Deposition und Anreicherung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen in Böden und Sedimenten. *UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox.* 16 (4): 245-254

Jones, K. C.; Stratford, J. A.; Waterhouse, K. S.; Furlong, E. T.; Giger, W.; Hites, R. A.; Schaffner, C.; Johnston, A. E. (1989): Increases in the polynuclear aromatic hydrocarbon content of an agricultural soil over the last century.- *Environ. Sci. Technol.*, 23: 95

# **Quantifizierung des Einflusses von Klimaänderungen auf die Sickerwasserbildung unter land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen durch Einsatz von neu entwickelten Lysimetern**

*Ralph Meißner, UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Department Bodenforschung, Lysimeterstation, Dorfstraße 55, 39615 Falkenberg;  
e-mail: ralph.meissner@ufz.de*

## **Zusammenfassung**

Ausgehend von der Hypothese, dass Klimaänderungen die Sickerwasserbildung und damit die Grundwasserneubildung als Hauptquelle der Trinkwasserversorgung in Deutschland signifikant beeinflussen können, werden Strategien zur messtechnischen Überwachung dieses Phänomens vorgestellt und diskutiert. Lysimetermessergebnisse, die zum Teil bereits langjährig in Deutschland vorliegen, erscheinen besonders geeignet, um Veränderungen bei der Sickerwasserbildung nach Menge und Beschaffenheit zu registrieren. Neu entwickelte wägbare Lysimeter unterschiedlicher Bauart werden vorgestellt und diskutiert. Anhand von Beispielen wird die hohe Genauigkeit der mit diesen Lysimetern messbaren Parameter erläutert. Die Geräte können genutzt werden, um Klimaszenarien zu simulieren. In Verbindung mit längerfristig vorliegenden Messreihen stellen sie eine wesentliche Stützstelle zur Validierung von entsprechenden Modellen dar.

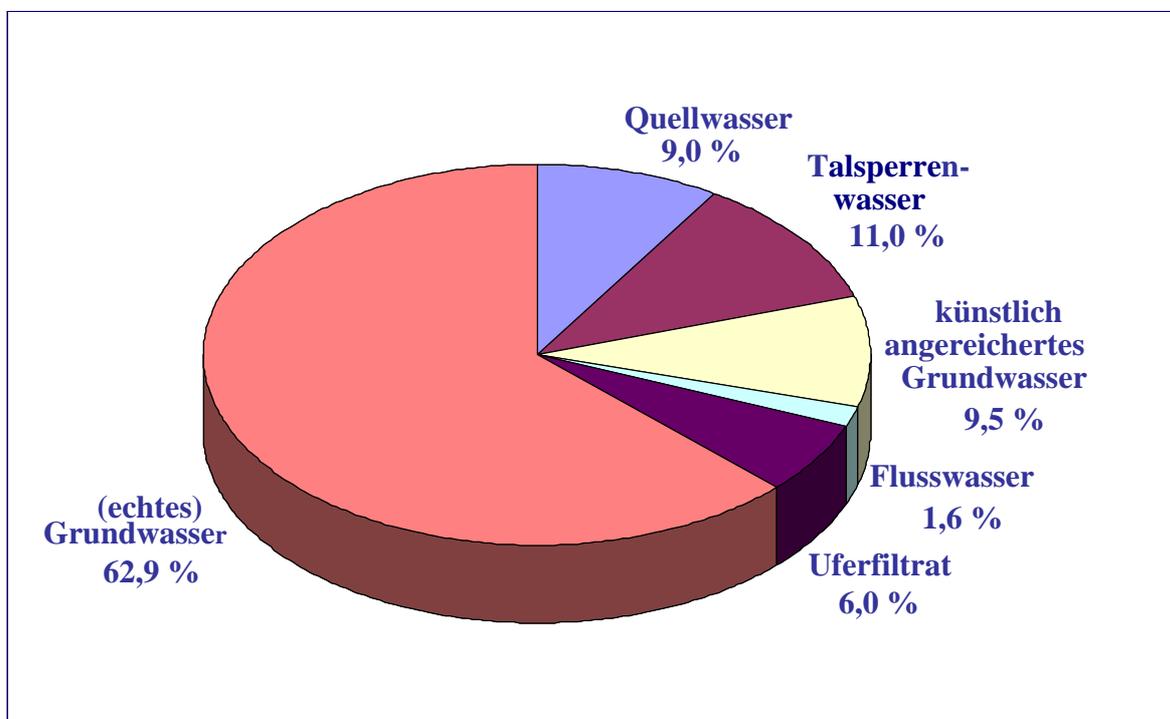
## **Einleitung**

Beim Grundwasser handelt es sich um eine natürlich erneuerbare Ressource. Die über dem Grundwasser liegenden Deckschichten tragen wesentlich zum Schutz der sich erneuernden Wasserressourcen bei. Die Oberfläche der Grundwasserdeckschichten dient den Menschen als Lebensraum. Hier erfolgt auch die Produktion von Nahrungsmitteln und Rohstoffen bzw. deren Abbau (z.B. bergbauliche Aktivitäten). Gleichzeitig findet auf den in den letzten Jahrzehnten durch immer umfassendere Intensivierungsmaßnahmen und weitere anthropogene Einträge belasteten land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen (ca. 83% der Bodenfläche der Bundesrepublik Deutschland) der wesentliche Anteil der Grundwasserneubildung statt. Dies ist in Deutschland von besonderer Bedeutung, da annähernd 80% der Trinkwasserversorgung direkt oder indirekt aus dem Grundwasser erfolgt. Das Ziel des Beitrages besteht in der Vorstellung des in Deutschland existierenden Lysimetermessnetzes und der dort langjährig vorliegenden Messreihen über die Sickerwasserbildung bei sich verändernden Klimabedingungen. Es werden neue Techniken

zur ungestörten monolithischen Entnahme von großvolumigen Bodenkörpern und deren Einbau in wägbaren Lysimetern mit und ohne Grundwasserbeeinflussung vorgestellt. Anhand von Beispielen wird die Messgenauigkeit der mit diesen Geräten erfassbaren Parameter dargestellt. Abschließend werden Möglichkeiten zur Simulation von Klimaänderungen mit Hilfe von Lysimetern diskutiert und Schlussfolgerungen zum zukünftigen Forschungsbedarf abgeleitet.

### **Trinkwasserversorgung aus dem Grundwasser**

Das Grundwasser stellt die Hauptquelle für die Trinkwasserversorgung in Deutschland dar. Neben echtem Grundwasser (etwa 62,9%) werden dafür auch Uferfiltrat (ca. 6%) und künstlich angereichertes Grundwasser (ca. 9,5%) verwendet (Abb. 1). Demgegenüber beläuft sich die Trinkwassergewinnung aus dem Oberflächenwasser auf etwa 12,6%; davon nur 1,6% aus Flusswasser und 11% aus Talsperrenwasser. Etwa 9% des Trinkwassers werden aus Quellwasser gewonnen. Die Rohwasserbereitstellung für die öffentliche Trinkwasserversorgung ist in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich verteilt. Bis auf Thüringen, Sachsen und Nordrhein-Westfalen decken die übrigen Bundesländer ihren Hauptanteil der Trinkwasserversorgung aus dem Grundwasser.



**Abb. 1: Herkunftsanteile der Wassergewinnung der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland (nach SRU/SG 1998)**

## Sickerwasserbildung unter landwirtschaftlich genutzten Flächen

Nach vorliegenden aktuellen Angaben aus dem Statistischen Bundesamt werden gegenwärtig etwa 53,5% der Bodenflächen der Bundesrepublik Deutschland landwirtschaftlich bewirtschaftet. Unter diesen Flächen findet demnach auch der maßgebliche Anteil der Grundwasserneubildung statt. Seit vielen Jahren gibt es von unterschiedlichsten Institutionen Bemühungen, die Grundwasserneubildungsfunktion aufrechtzuerhalten und die Grundwasserressourcen vor überhöhten Stoffeinträgen zu schützen (vor allem Initiativen zur Minderung vor erhöhten Nähr- und Schadstoffeinträgen aus der landwirtschaftlichen Produktion und Aktivitäten zur Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie). Bezüglich der Sickerwasserbildung sind neben dem Niederschlagsangebot vor allem die natürlich anzutreffenden Standorte (Bodenarten, Bodentypen) und die darauf ablaufende Bewirtschaftung von entscheidender Bedeutung. Es ist bekannt, dass die Wasserspeicherung eines Sandbodens wesentlich geringer als die eines Ton- oder Lössbodens ist. Während die natürliche Wasserspeicherung kaum beeinflussbar ist, lässt sich über die Gestaltung der Landbewirtschaftung die Höhe der Grundwasserneubildung signifikant beeinflussen (Tab. 1).

**Tab. 1: Relative Wirkung differenzierter Stilllegungszeiträume und des Verzichtes auf chemisch-synthetische Agrochemikalien auf die Sickerwasserbildung und das N-Austragsverhalten im Vergleich zu intensiv ackerbaulich genutzten Lysimetern**

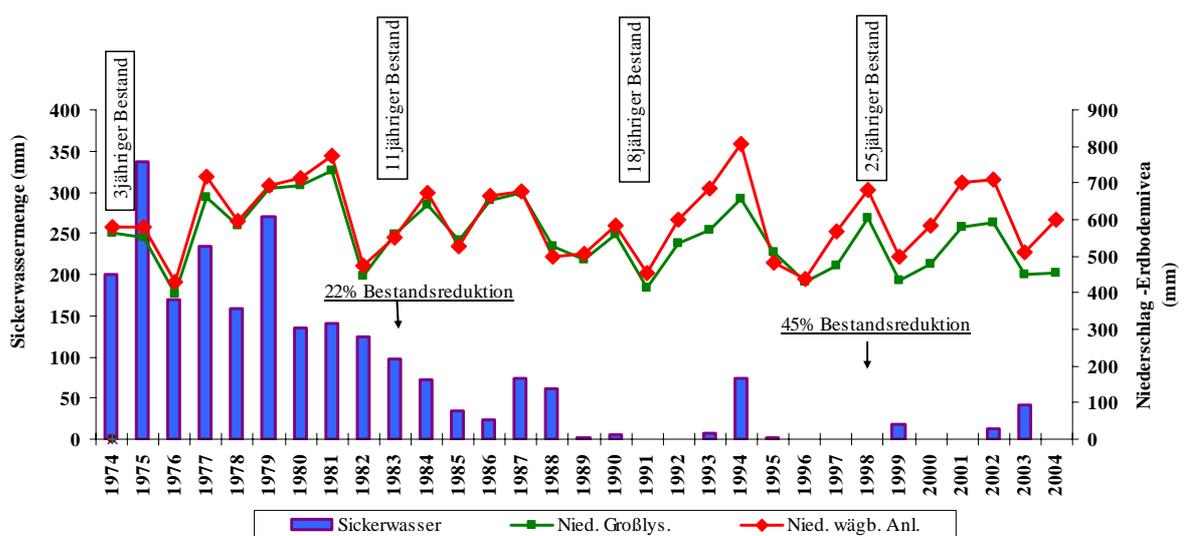
(Angaben in %, bezogen auf die jeweils als 100% gesetzte Variante aus dem Integrierten Landbau, 8-jährige Lys.-versuche)

Bewirtschaftungsvariante	Sickerwasserbildung	N-Auswaschung	Trockenmasse-ertrag	N-Aufnahme durch die Pflanzen
<b>1-jährige Stilllegung</b>	<b>130</b>	<b>152</b>		
<u>Wiedereingliederung</u>				
1. Jahr nach Wiedereingliederung	<b>107</b>	<b>130</b>		<b>101</b>
2. Jahr nach Wiedereingliederung	<b>100</b>	<b>114</b>		<b>114</b>
<b>3-jährige Stilllegung</b>	<b>86</b>	<b>55</b>		
1. Jahr nach Wiedereingliederung	<b>166</b>	<b>904</b>	<b>85</b>	<b>96</b>
<b>5-jährige Stilllegung</b>	<b>109</b>	<b>75</b>		
<u>Wiedereingliederung</u>				
1. Jahr nach Wiedereingliederung	<b>117</b>	<b>59</b>	<b>76</b>	<b>97</b>
2. Jahr nach Wiedereingliederung	<b>93</b>	<b>97</b>	<b>112</b>	<b>110</b>
Dauerbrache 8-jährige Bracheperiode *	<b>98</b>	<b>55</b>		
<b>Verzicht auf chemisch-synthetische Agrochemikalien (Ökolandbau)</b>				
8-jähriger Anbau *	<b>99</b>	<b>156</b>		<b>92</b>

\*) Für die Vergleichslysimeter aus dem Integrierten Landbau betragen die mittleren Werte für einen 8-jährigen Versuchszeitraum: Sickerwasserbildung: 101 mm; N-Austrag 27,6 kg/ha und N-Aufnahme durch die Pflanze 217,9 kg/ha

## Sickerwasserbildung unter forstwirtschaftlich genutzten Flächen

Aufgrund der unterschiedlichen Niederschlagsverteilung ist auch die Sickerwasserbildung differenziert. Erhebliche Unterschiede bestehen diesbezüglich zwischen den alten und den neuen Bundesländern. Im langjährigen Mittel ist die Niederschlagsmenge im Westteil Deutschlands um etwa 175 mm höher. Sehr geringe Niederschläge sind vor allem im nordostdeutschen Tiefland (Berlin, Brandenburg) und im Regenschatten des Harzes zu verzeichnen (Sachsen-Anhalt, Thüringen). Da Berlin 100%, Brandenburg etwa 87,2% und Sachsen-Anhalt etwa 52,4% ihres Trinkwasserbedarfs aus dem Grundwasser decken, ist in diesen Gebieten die Gewährleistung einer ausreichenden Grundwasserneubildung von besonderer Bedeutung. Hinzu kommt noch, dass aufgrund der Standortverhältnisse viele Flächen mit Kiefern bestanden sind. Da Bäume eine erhöhte Transpiration aufweisen, wurden vor allem von forstlichen Forschungseinrichtungen Untersuchungen zum Wasserhaushalt von Waldstandorten vorgenommen. So wurde in Sachsen-Anhalt im Bereich der Colbitz-Letzlinger Heide nachgewiesen, dass bei Neuanpflanzungen von Kiefern nach etwa 18 Jahren die Grundwasserneubildung fast vollständig zum Erliegen kommt (Abb. 2). Für Untersuchungsgebiete bei Eberswalde (Brandenburg) kam man zu ähnlichen Ergebnissen. Während bei Kiefern lediglich 2% des Niederschlags versickerten, betrug dieser Wert bei Buchen etwa 26%. Um die Grundwasserneubildung in diesen Gebieten zu erhalten, werden seit einigen Jahren Forschungsarbeiten über Möglichkeiten des Waldumbaus vorgenommen (Müller, 2005).



**Abb. 2: Vergleich der Niederschlagsmenge auf einer Freifläche sowie unter einem aufwachsenden Kiefernbestand und daraus resultierende Sickerwasserbildung in Abhängigkeit vom Bestandsalter (Ergebnisse aus der Lysimeteranlage Colbitz, Sachsen-Anhalt)**

## Einfluss von potentiellen Klimaveränderungen auf die Sickerwasserbildung

Klimaveränderungen können signifikante Auswirkungen auf die ober- und unterirdische Abflussbildung haben. In Modellszenarien wird eingeschätzt, dass für Nordeuropa ein Anstieg zwischen 1,4 und 5,8 °C bis zum Jahr 2100 zu erwarten ist. Damit verbunden sind Veränderungen des Niederschlagsgeschehens. Eindeutige Informationen über die Änderungen der Komponenten des Wasserhaushaltes im regionalen Maßstab liegen bisher kaum vor. Gegenwärtig wird in verschiedenen Forschungsprojekten auf differenzierten Skalenebenen (z.B. KLiWEP, KLIWA, STARDEX) an diesem Problem gearbeitet (z.B. Bardossy und Pakosch, 2005).

## Sickerwasserrichtlinie und Lysimeter

Die Bedeutung der Sickerwasserforschung wird an der gegenwärtig von der LAWA initiierten Bearbeitung der SICKERWASSERRICHTLINIE (2003) sichtbar. Auch zukünftig ist es notwendig, die bereits seit vielen Jahren laufenden Untersuchungen zur Ermittlung der Sickerwasserbildung nach Menge und Beschaffenheit fortzusetzen. Hierzu gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Neben indirekten Verfahren (hydrologische Messplätze, ausgestattet mit Sensoren zur Erfassung der Bodenfeuchte, Tracermethoden) kommen auch direkte Messverfahren zum Einsatz (Tab. 2).

**Tab. 2: Verfahren zur Ermittlung der Sickerwasserrate (LAWA, 2003)**

Verfahren/Hilfsmittel		Geräteaufwand	Erforderliche Eingangsparameter	Mess- bzw. Berechnungsgröße	Auflösung räumlich zeitlich		Literatur	
Direkte Messmethoden	Lysimeter	wägbar	Lys.-Behälter u. -waage; Klimastation	Niederschlag, Verdunstung, Landnutzung	Sickerwassermenge	Messpunkt	sehr hoch	DVWK (1980)
		nicht wägbar	Klimastation Lys.-Behälter	Niederschlag, Verdunstung, Landnutzung	Sickerwassermenge	Messpunkt	sehr hoch	DVWK (1980)
Indirekte Messmethoden	Tensiometer	Tensiometer, tiefenabgestuft	pf-Kurve des Bodens Bodenporosität; Niederschlag; Grundwasserstand	Saugspannung, bzw. Bodenfeuchte Wassergehalt (als Eingangsparameter für hydrodynamische Modelle, vgl. Kap. 2.2.3)	Messfläche	hoch	RENGER et al. (1970, 1974, 1980)	
	Time Domain Reflectometry (TDR)	TDR-Sonden	Eichbeziehung		Messfläche	sehr hoch	MALICKI et al. (1992)	
	Radiometrie	Messrohr; Neutronen-sonde	monatliche Bodenfeuchten-profile, Eichkurve bezogen auf Bodenporosität		Messfläche	gering		
	Tracermethoden; Chlorid, Borat, Tritium	Depositions-sammler, Abflussmessung; Tracer, Labor-analyse	Langzeitmessreihen über Abflüsse und Konzentrationen	Wasserhaushalt-Stoffhaushalt des Tracers	Ein-zugs-gebiet	sehr gering	ULRICH et al. (1979) HEITZ (1998)	

Langjährig bewährt hat sich der Einsatz von Lysimetern unterschiedlicher Bauart. Obgleich sie im In- und Ausland vielfach im Einsatz sind, gelten sie aufgrund der mit ihrer Errichtung verbundenen Aufwendungen als vergleichsweise teure Versuchsanlagen. Jedoch ist in den letzten Jahren wieder ein verstärkter Trend zum Einsatz von Lysimetern zu verzeichnen. Als Ursachen werden hierfür die bei alternativen Messverfahren nicht exakt erfassbaren Kenngrößen des Wasserhaushaltes und die daraus resultierenden Fehlermöglichkeiten für weitere Berechnungen sowie technische Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Lysimetrie angesehen.

Im Rahmen der Sickerwasserforschung werden Lysimeter unterschiedlicher Bauart seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt. Als Lysimeter wird nach DIN 4049 (1994) eine Anlage zum Erfassen von Sickerwasser als Grundlage zur Mengen- und Stoffbilanz in Abhängigkeit von Boden, Gestein, Bewuchs, lokalem Klima und anderen Randbedingungen bezeichnet. Im Allgemeinen bestehen Lysimeter aus einem mit Erdboden gefüllten Behälter und einer Auffang- und Messvorrichtung für das am Boden austretende Wasser (DVWK, 1980). Da nur mit Hilfe von Lysimetern eine direkte Bestimmung der durch den Boden perkolierenden Wassermenge einschließlich der darin enthaltenen Nähr- und Schadstoffe möglich ist, gestatten derartige Messungen eine im Vergleich zu anderen Methoden relativ zuverlässige Kalkulation der in Richtung Grundwasser transportierten Stofffrachten (Klocke et al., 1993; Hillel, 2004). Sind die Lysimeter wägbare, dann kann aus der Registrierung der Gewichtsveränderung die aktuelle Evapotranspiration direkt bestimmt werden (Young et al., 1996). Aufgrund der genannten Eigenschaften werden Lysimeterversuchsergebnisse häufig zur Ableitung und Kalibrierung von Wasser- und Stoffhaushaltsmodellen genutzt (Meissner et al., 1999, 2000, a; Wriedt, 2004).

Unter Bezug auf die hier abgehandelte Thematik ist speziell darauf hinzuweisen, dass in Europa, vor allem in Deutschland, ein gut ausgebautes Lysimetermessnetz existiert (Kretzschmar, 1999; Lanthaler und Fank, 2005). In der Regel werden an diesen Standorten auch relevante meteorologische Parameter regelmäßig erfasst. Da Lysimeteranlagen langfristig betrieben werden, erscheinen sie für die Erfassung von Klimaänderungen ebenfalls geeignet. Hierzu trägt auch der besonders in den letzten Jahren zu verzeichnende technische Fortschritt beim Bau und Betrieb von Lysimetern bei.

### **Technologie zur Entnahme von ungestörten Bodensäulen**

Für detaillierte Untersuchungen des Wasser- und Stoffhaushalts an Böden in Lysimetern ist die Gewinnung von ungestörten Bodensäulen zu empfehlen. Ziel der monolithischen

Entnahme von Bodenkörpern ist es, die natürliche Bodenstruktur möglichst weitgehend zu erhalten, so dass die Wasserbewegung und der Stofftransport in gleicher Weise erfolgen wie in der ursprünglichen, natürlich gewachsenen Bodenstruktur am Standort. Neben der manuellen Entnahme von großvolumigen Bodenmonolithen wurden in den letzten Jahren auch unterschiedliche mechanisierte Verfahren entwickelt (DVWK, 1980, Meshkat et al., 1999). Während die über einen Spindelzug vorgenommene Entnahme des Bodenmonolithen (Hantschel et al. 1993, Klotz und Steindl, 1998) eine elegante, aber teure Lösung darstellt, verursacht die häufig praktizierte Rammung von Bodenkernen für Lysimeter Störungen im Bodengefüge (Pütz et al., 1997, Derby et al., 2002). Diese treten besonders im Randbereich auf und können zur Verfälschung der Messergebnisse führen. Um Kosten zu sparen und Bodenmonolithe ungestört in situ entnehmen zu können, wurde ein horizontales Entnahmeverfahren, basierend auf einem Fräsverfahren, entwickelt und patentiert (Meißner et al. 2002). Eine in Einzelteilen zerlegbare Rahmenkonstruktion in Form eines Dreibecks wird verwendet, um das Lysimetergefäß am Entnahmestandort lotrecht auszurichten und während des Schneidvorgangs in seiner Lage vertikal zu fixieren (Abb. 3). Zusätzlich befindet sich am Oberteil der Entnahmevorrichtung ein Hydraulikzylinder, der zusammen mit den justierbaren Gleitschienen das mit Boden zu füllende Lysimetergefäß (in der Regel bestehend aus rostfreiem Stahl; es kann bedarfsweise innen mit einer innerten Schutzschicht ausgekleidet werden) fixiert und den Schneidvortrieb bis in die gewünschte Entnahmetiefe unterstützt. Am unteren Ende des Lysimetergefäßes befindet sich die über einen Hydraulikmotor mit Kettenrad angetriebene Schneidvorrichtung. An diese sind Bodenmeißel unterschiedlichen Typs (Auswahl der Meißel erfolgt in Abhängigkeit vom Standort) zum Auffräsen des Bodens angebracht. Durch einen rotierenden Schneidkörper, der mit dem Lysimetergefäß verbunden ist, wird die Kontur des Bodenmonolithen vorgeschritten. Bedingt durch das Eigengewicht des Lysimetergefäßes (im Bedarfsfall unterstützt durch den oben angebrachten Hydraulikzylinder) wird der beim Vorschneiden überstehende Bodenrand von ca. 2 cm abgesichert, so dass das Lysimetergefäß kontinuierlich in den gewachsenen Boden eindringt und die Bodensäule sukzessive und kontinuierlich in den Stahlzylinder gelangt. Die Bodensäule wird während des Schneidvorgangs nicht beschädigt. Die Schneidkräfte sind aufgrund der verminderten Wandreibung gering im Vergleich zu herkömmlichen Entnahmetechnologien. Nach Beendigung des Schneidvorgangs wird eine Stahlplatte unter den Monolithen geschoben und das Lysimetergefäß mit Hilfe eines Hebezeuges aus der Grube entnommen. Kleinere Bodenmonolithen (Oberfläche ca. 0,5 m<sup>2</sup>, Tiefe 1.0 m) können alternativ mit Hilfe des an der Entnahmevorrichtung montierten Hydraulikzylinders ohne

Einsatz eines zusätzlichen Hebezeuges aus der Entnahmegrube gehoben werden. Die beschriebene Entnahmetechnologie wurde bereits mehrfach erfolgreich auf unterschiedlichen Entnahmestandorten (von Sandböden über Schotter- bis Tonböden) und für Lysimeter unterschiedlicher Dimension (Oberfläche 0,5 bis 2 m<sup>2</sup>, Tiefe 1,0 bis 3,0 m) eingesetzt. Ein weiterer Vorteil dieser Technologie besteht darin, dass der Entnahmestandort nur geringfügig beschädigt wird (kleine Baugrube, keine Baustraße erforderlich). Die Zeit zur Gewinnung eines Bodenmonolithen ist abhängig von der Größe und der Bodenart. In der Regel benötigt man 1 bis 2 Werktage, um ein Lysimeter monolithisch zu befüllen.



**Abb. 3: Vorrichtung zur ungestörten vertikalen Entnahme von großvolumigen Bodenmonolithen**

### **Containerlysimetereinheit**

Für den Betrieb von Lysimetern ist eine Zugangsmöglichkeit zu dem mit Boden gefüllten Lysimetergefäß erforderlich. Dieser Zugang dient der Funktionskontrolle sowie der Aufnahme der Mess-, Steuerungs- und Wägetechnik. Konventionell werden hierfür kostenaufwendige Lysimeterkeller oder Lysimeterschächte aus Beton, Stahl oder Stahlbeton

errichtet. Diese Konstruktionen müssen gegen den Eintritt von Niederschlags-, Stau- und Grundwasser abgedichtet werden, um einen störungsfreien Betrieb der Anlage zu gewährleisten. Der Bau von Lysimeterkellern oder –schächten auf grundwassernahen Standorten oder Standorten mit hoher Aggressivität gegenüber Stahl und Beton (zum Beispiel Deponien, Bergbaufolgeflächen) ist dabei besonders kostenintensiv, da oftmals eine langfristige Wasserhaltung während der Bauausführung und teilweise auch während des Betriebes erforderlich ist. Um die dargestellten Nachteile auszuschließen bzw. zu vermindern, wurde eine Lysimeterstation entwickelt, die in einem Container untergebracht ist (Meissner et al., 2000, b). Der Container besteht aus Polyethylen (PE-HD). Darin eingelassen wird das Lysimeter. Bewährt hat sich die Anordnung von 2 bzw. 4 Lysimetern in einer Containereinheit (Abb. 4). Über ein Mannloch mit Leiter (Luke) ist der Container zugänglich für Mess- und Wartungsarbeiten. Die Größe des Containers ist abhängig von der Baugröße und Anzahl der Lysimeter. Ein weiterer Vorteil dieser Lysimeterstation besteht darin, dass die Lysimetergefäße leicht austauschbar sind (z.B. Wechsel der Bodenarten im Lysimeter oder Testung von verschiedenen Bodenkontaminationen mit Lysimetern). Auch ist es möglich, die gesamte Station ohne großen Aufwand an einen anderen Messstandort zu transportieren.



**Abb. 4: Container-Lysimeterstation aus Polyethylen (PE-HD)**

## Lysimetertypen

### *Wägbares Gravitationslysimeter*

Gravitationslysimeter werden seit vielen Jahren zur Bearbeitung von wissenschaftlichen und praktischen Fragestellungen eingesetzt (Meißner et al. 2000, a). Sie bestehen aus dem mit Boden gefüllten Lysimetergefäß und einer am unteren Ende eingebauten Filterschicht zur Verhinderung der Ausbildung von tragenden Menisken (Abb. 5). Auch sind Bautypen bekannt, bei denen ein Unterdruck angelegt wird, um das Sickerwasser zu gewinnen (Roth et al., 2005). Die Ermittlung der Sickerwassermenge erfolgt häufig über einen Kippzähler. Bei neueren Gravitationslysimetern werden Wägezellen verwendet, um die Gewichtsveränderung (als Voraussetzung zur genauen Bestimmung der Evapotranspiration) mit hoher Präzision zu messen. Des Weiteren ist es möglich, innerhalb des Lysimeters in verschiedenen Tiefenstufen zusätzliche Messinstrumente wie TDR-Sonden, Tensiometer, Saugkerzen, Temperaturfühler etc. einzubauen. Hierdurch erhält man weitere Informationen über Quantität und Qualität des Bodenwassers beim Durchlauf durch die Bodensäule. Sämtliche Messdaten werden in einem Datenlogger gespeichert.

Die aktuelle Evapotranspiration (Eta) lässt sich aus den Messgrößen wie folgt ermitteln:

$$ETa = P - S \pm \Delta S \quad (1)$$

P - Niederschlag (mm)

S - Sickerwassermenge (mm)

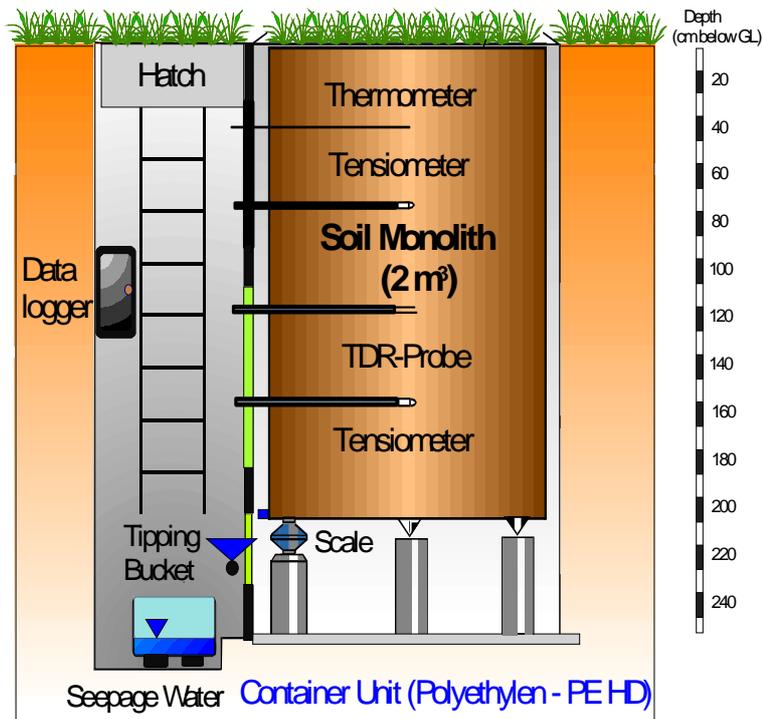
$\Delta S$  - Änderung der Bodenwasserspeicherung (es gilt:  $1 \text{ kg} \approx 1 \text{ l} = 1 \text{ mm}$ )

Aus der Wasserhaushaltsgleichung lässt sich die Stofffracht (L) wie folgt errechnen:

$$L = C_s * S \quad (2)$$

$C_s$  - Stoffkonzentration im Sickerwasser ( $\text{mg l}^{-1}$ )

S - Sickerwassermenge ( $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ l}$ ).



**Abb. 5: Prinzipskizze eines wägbaren Gravitationslysimeters**

### ***Wägbares Grundwasserlysimeter***

Grundwasserlysimeter sind ebenfalls seit vielen Jahren erfolgreich im Einsatz (DVWK, 1980). Neu ist jedoch die Entwicklung eines wägbaren Grundwasserlysimeters (Meißner et al., 2000, c; Abb. 6). Das Kernstück dieses Lysimeters stellt die automatische Grundwassersteuerung dar (Bethge-Steffens et al., 2004). Der Grundwasserstand wird am Entnahmestandort der Bodenmonolithe kontinuierlich gemessen und per Funk an die Regelungseinheit des Lysimeters übertragen. Die Einstellung des Grundwasserstandes erfolgt im Lysimetergefäß über das Prinzip der kommunizierenden Röhren, wobei die erforderliche Wassermenge über einen Ausgleichsbehälter zugeführt wird. Dieser ist mit einem Pegelsensor zur Messung des aktuellen Wasserstandes ausgestattet. Das für Grundwasserzu- bzw. -abfluss zu speichernde Wasser wird in einem Vorratsbehälter vorgehalten. Weicht der Wasserstand im Ausgleichsbehälter vom vorgegebenen Zielwasserstand um mehr als einen Zentimeter ab, wird das Ventil zwischen Lysimeter und Ausgleichsbehälter geschlossen und über eine Pumpe der Wasserstand im Ausgleichsbehälter reguliert. Anschließend wird das Ventil zwischen Ausgleichsbehälter und Vorratsbehälter geschlossen und das Ventil zum Lysimeter geöffnet. Der Wasserstand kann sich ausgleichen. Anschließend wird das Ventil wieder geschlossen. Es erfolgt eine erneute Regulierung des Wasserstandes im Ausgleichsbehälter, solange, bis der Wasserstand dem vorgegebenen Zielwasserstand entspricht. Über die

Aufsummierung der Wasserstandsdifferenzen kann ermittelt werden, wie viel Wasser dem Lysimeter zugeflossen ist bzw. wie viel Wasser entnommen werden musste, um den Zielwasserstand einzustellen.

Für das Grundwasserlysimeter gilt folgende modifizierte Wasserhaushaltsgleichung:

$$P + \text{Pond} = ET_a + (R_{ab} - R_{zu}) \pm \Delta S \quad (3)$$

P - Niederschlag (mm)

Pond - Wasserüberstau (im Hochwasserfall; mm)

ET<sub>a</sub> - aktuelle Evapotranspiration (mm)

R<sub>ab</sub> - Grundwasserabfluss (mm)

R<sub>zu</sub> - Grundwasserzufluss (mm)

ΔS - Änderung der Bodenwasserspeicherung (mm)

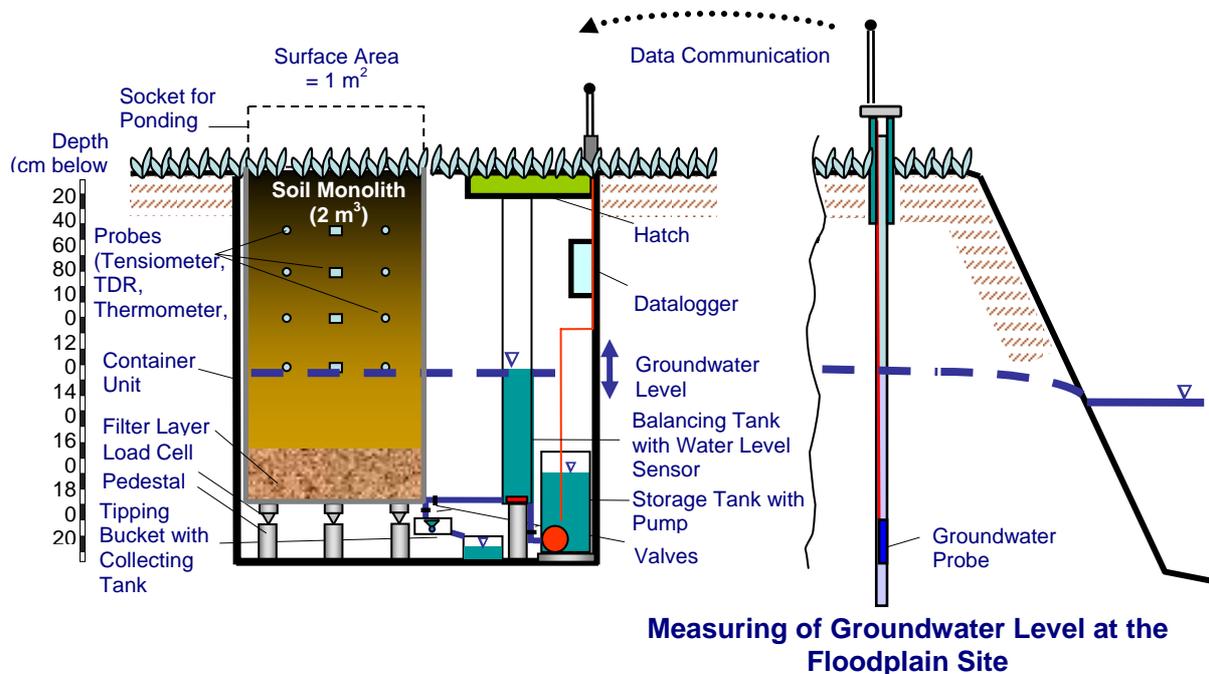


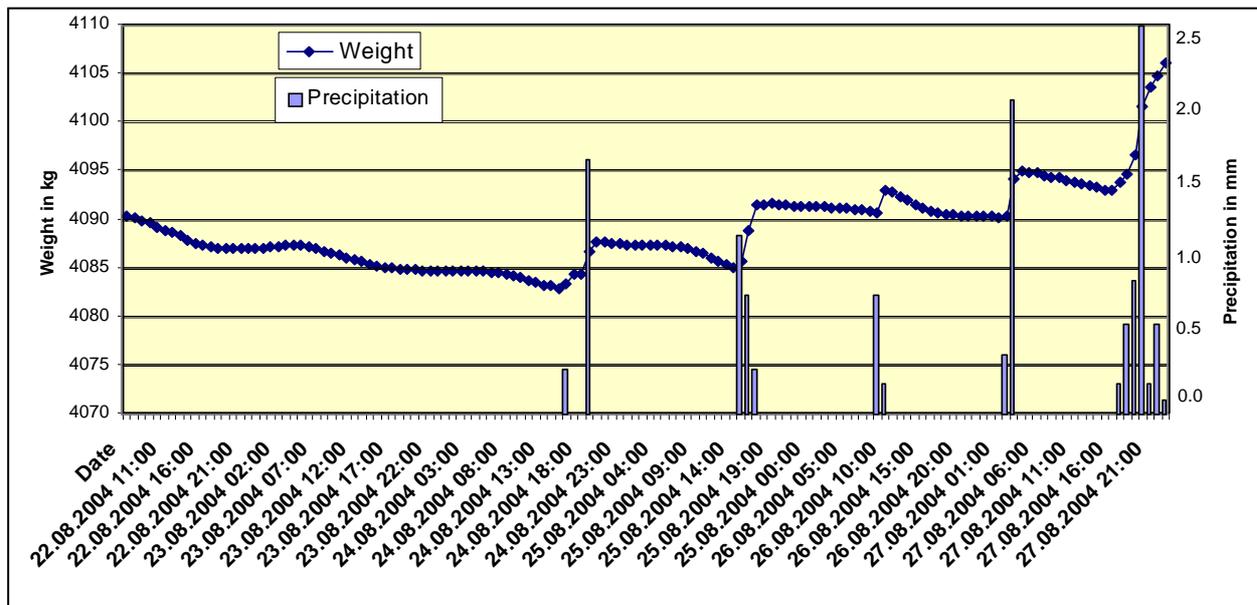
Abb. 6: Prinzipskizze eines wägbaren Grundwasserlysimeters

### Messgenauigkeit

Anhand eines Beispiels soll die Messgenauigkeit eines Gravitationslysimeters neuer Bauart demonstriert werden. In Abb. 7 sind die Gewichtsveränderungen des Lysimeters für eine sechstägige Messperiode im August 2004 und die in dieser Zeit gefallenen Niederschläge dargestellt. Bis zum Abend des 18. August ist kein Niederschlag gefallen. Es zeigt sich die Tendenz einer Gewichtsabnahme aufgrund der Evapotranspiration. Beim Einsetzen des Niederschlags ist ein sofortiger Gewichtsanstieg zu erkennen. Es folgen weitere 15

Niederschlagsereignisse, die zu einem Gewichtsanstieg von insgesamt 19,3 kg bis zum Ende der dargestellten Messperiode führen.

Die hier dargestellten Werte beruhen auf einem Wägerhythmus von 6 Minuten. Aus den pro Stunde anfallenden 10 Einzelwägungen wird ein Mittelwert berechnet.

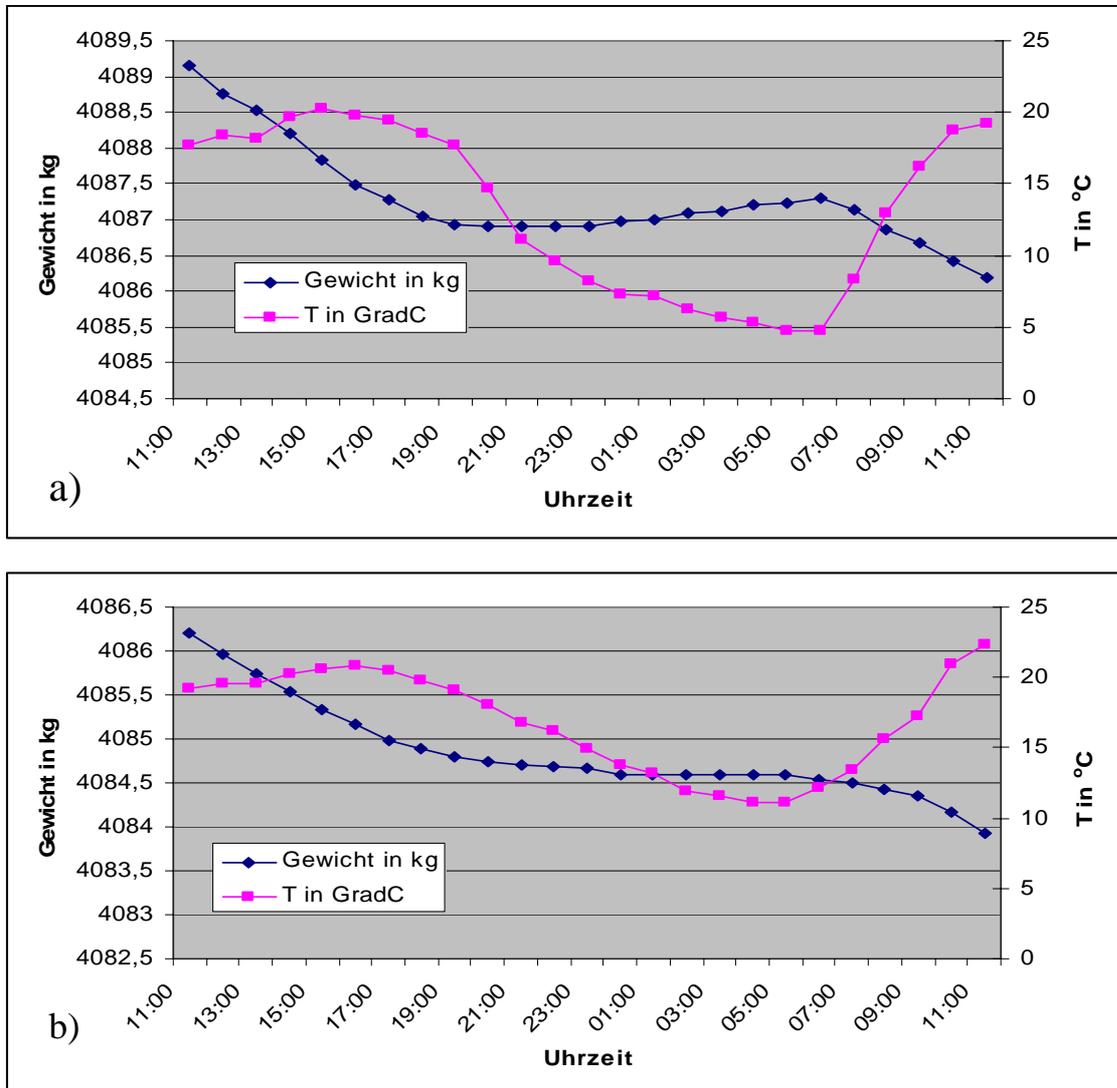


**Abb. 7: Beispiel für den Niederschlagsverlauf und die Änderung des Gewichtes eines mit Mais bepflanzten Gravitationslysimeters innerhalb einer Messperiode von 6 Tagen**

### Taumessung

Betrachtet man den in Abb. 7 dargestellten Verlauf der Gewichtsänderung in der niederschlagslosen Periode detaillierter, dann sind geringfügige Schwankungen im Tag-Nacht-Verlauf sichtbar. Aus dem Verlauf der in Abb. 8a zusätzlich eingeführten Temperaturkomponente ist erkennbar, dass am 22. August zunächst mit steigender Temperatur eine Gewichtsabnahme einhergeht. Die maximale stündliche aktuelle Evapotranspiration von 0,36 mm wurde im Zeitraum zwischen 14.00 und 15.00 Uhr gemessen. Sie resultierte aus der zu diesem Zeitpunkt herrschenden höchsten Tagestemperatur von 20,2 °C. Während in den Abend- und Nachtstunden die Temperatur weiter zurück ging, ist zwischen 22.00 und 6.00 Uhr eine Gewichtszunahme von insgesamt 0,4 mm ermittelt worden; das sind 14,6 % der im 24 Stundenzeitraum vom 22. August zum 23. August (von 11.00 bis 11.00 Uhr) gemessenen Evapotranspirationsmenge in Höhe von 2,73 mm. Die im Stundenmittel höchste Gewichtszunahme von 0,09 mm wurde am 23. August zwischen 5.00

und 6.00 Uhr gemessen. Sie fällt zusammen mit der um diese Zeit herrschenden niedrigsten Temperatur von 4,8 °C.



**Abb. 8: Gewichtsänderung eines mit Mais bepflanzten Gravitationslysimeters in Abhängigkeit vom Temperaturverlauf, dargestellt durch einen Tag-Nacht-Verlauf**  
a) vom 22.08.2004 11:00 Uhr bis zum 23.08.2004 11:00 Uhr  
b) vom 23.08.2004 11:00 Uhr bis zum 24.08.2004 11:00 Uhr

In Abb. 8b sind die Messergebnisse für den Folgetag vom 23. August zum 24. August, wiederum um 11.00 Uhr beginnend, dargestellt. Die zwischen 15.00 und 16.00 Uhr gemessene maximale Tagestemperatur von 20,8 °C verursachte erwartungsgemäß die höchste stündliche aktuelle Evapotranspiration von 0,18 mm. In den Abend- und Nachtstunden sank die Temperatur ab. Jedoch war im Unterschied zur vorangegangenen Nacht (vgl. Abb 8a)

keine Gewichtszunahme, sondern nur eine Gewichtskonstanz zwischen 0.00 Uhr und 5.00 Uhr zu verzeichnen. Die niedrigste Tagestemperatur mit 11,1 °C wurde zwischen 4.00 und 5.00 Uhr gemessen. Die gesamte für den zweiten Tag gemessene Evapotranspirationshöhe betrug 2,04 mm. Sie war damit aufgrund der im Vergleich zum Vortag geringeren Windgeschwindigkeit und niedrigeren Globalstrahlung um etwa 25% geringer.

Als Ursache für die in der Nacht vom 22. August zum 23. August (vgl. Abb. 8a) gemessene Gewichtszunahme wird die Taubildung angesehen. Voraussetzung für die Bildung von Tau ist, dass die Lufttemperatur soweit absinkt, bis sie den so genannten Taupunkt erreicht. Die relative Luftfeuchte nimmt dann Werte um 100% an. In der warmen Jahreszeit geschieht das vornehmlich am frühen Morgen bei klarem Himmel und nur schwacher Windbewegung. Dabei ist die Taubildung im oberen Bestandsbereich intensiver als in Bodennähe.

Der Taupunkt ( $t_d$  in °C) lässt sich nach der Magnus-Formel für den Sättigungsdampfdruck über Wasser ( $E_w(t_d)$  in hPa) berechnen (Sonntag und Heinze, 1982):

$$E_w(t_d) = E_o \cdot \exp \frac{(17,5043 \cdot t_d)}{(241,2 \text{ °C} + t_d)} \quad (4)$$

Hierin ist  $E_o$  die individuelle Gaskonstante (hPa).

Es gilt:  $-30 \text{ °C} \leq t \leq 70 \text{ °C}$

$$E_o (t = 0^\circ\text{C}) = 6,11213 \text{ hPa}$$

Da in der Praxis meist nur die relative Luftfeuchte ( $\varphi$  in %) und die zugehörige Lufttemperatur ( $t$  in °C) zur Verfügung stehen, kann durch Einsetzen von Gleichung (5), die den direkten Zusammenhang zwischen den Größen relative Luftfeuchte und Temperatur herstellt,

$$\varphi = \frac{E(t_d)}{E(t)} \cdot 100\% \quad (5)$$

in die nach  $t_d$  umgestellte Gleichung (4), der Taupunkt ( $t_d$ ) wie folgt berechnet werden:

$$t_d(\varphi, t) = \frac{241,2 \cdot \ln\left(\frac{\varphi}{100\%}\right) + \frac{4222,03716 \cdot t}{241,2 + t}}{17,5043 - \ln\left(\frac{\varphi}{100\%}\right) - \frac{17,5043 \cdot t}{241,2 + t}} \quad (6)$$

Um zu überprüfen, ob es sich bei der gemessenen Gewichtszunahme tatsächlich um eine Taubildung handelt, wurden in Tabelle 3 die nächtlichen Tiefsttemperaturen der beiden untersuchten Messzeiträume den errechneten Taupunkttemperaturen gegenüber gestellt.

**Tab. 3: Gegenüberstellung von errechneten Taupunkttemperaturen mit den am Gravitationslysimeter gemessenen meteorologischen Kennwerten**

Messperiode	Maximale Temperatur ( $t_{max}$ ) °C	Höhe der relativen Luftfeuchtigkeit (bei $t_{max}$ ) %	Taupunkt (berechnet) °C	Tiefsttemperatur und damit korrespondierende relative Luftfeuchtigkeit (gemessen) °C      %
22.08.2004 - 23.08.2004	20,2	40,3	6,3	4,8 - 99,7%
23.08.2004 - 24.08.2004	20,8	40,6	6,9	11,1 - 97,5%

In der ersten Messperiode vom 22. August zum 23. August wurde die berechnete Taupunkttemperatur deutlich unterschritten. Da auch die relative Luftfeuchtigkeit Werte um annähernd 100% erreichte, kann mit großer Sicherheit die gemessene Gewichtszunahme von 0,4 mm als Taubildung identifiziert werden. Demgegenüber lag in der zweiten Messperiode

vom 23. August zum 24. August die nächtliche Tiefsttemperatur erheblich über dem berechneten Taupunkt. Da auch die relative Luftfeuchtigkeit deutlich unter 100% war, konnte keine Taubildung erfolgen. Die zwischen 0.00 und 5.00 Uhr gemessene Gewichtskonstanz zeigt an, dass keine messbare Evapotranspiration zu verzeichnen war.

### **Schlussfolgerungen sowie Forschungs- und Handlungsbedarf**

- Trotz Zunahme der Nutzungsintensität Aufrechterhaltung der Grundwasserneubildungsfunktion von land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen als Grundlage zur Sicherung einer nachhaltigen Trinkwasserversorgung in Deutschland
- Weiterführung von Langzeituntersuchungen mit Lysimetern zur Erkennung von Trends hinsichtlich einer veränderten Sickerwasserbildung nach Menge und Qualität
- Prüfung der Eignung von langjährig in Lysimeterstationen erhobenen bodenhydrologischen und meteorologischen Daten zur Validierung und Kalibrierung von Modellen zur Abschätzung von Klimaänderungen
- Testung der neu entwickelten Lysimeter bezüglich ihrer Eignung als Experimentalbasis zur Untersuchung von Phänomenen des Klimawandels (z.B. Simulation von Extremhochwässern mit Grundwasserlysimetern oder Untersuchung von monolithisch entnommenen Bodensäulen aus unterschiedlichen Klimaregionen hinsichtlich der Veränderung des Wasser- und Stoffhaushaltes)

### **Literatur**

ATV-DVWK-Themen: Möglichkeiten der Effizienzkontrolle von Maßnahmen zur grundwasserschonenden Bodennutzung am Beispiel des Stickstoffs, Hrsg. ATV-DVWK, (2004), 27 S.

Bardossy, A., Pakosch, S.: Wahrscheinlichkeiten extremer Hochwasser unter sich ändernden Klimaverhältnissen, Wasserwirtschaft 95 (2005), Heft 7-8, S. 58-62.

Bethge-Steffens, D., Meissner, R., Rupp, H.: Development and practical test of a weighable groundwater lysimeter for floodplain sites, J. Plant Nutr. Soil Sci., 167 (2004) No. 4, S. 516 – 524.

Derby, N.E., Knighton, R.E., Montgomery, B.R.: Construction and Performance of Large Soil Core Lysimeters, Soil Sci. Soc. Am. J. 66 (2002), S. 1446 – 1453.

DIN 4049-3: Hydrologie, Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, (1994).

DVWK – Empfehlungen zum Bau und Betrieb von Lysimetern, DVWK-Regeln (1980), Heft 114.

- Hantschel, R.: Neubau einer Lysimeteranlage am GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* (1993), Band 71, S.135 - 138).
- Hillel, D.: *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press, San Diego., (2004), 494 S.
- Klocke, N.L., Todd, R.W., Hergert, G.W., Watts, D.G., Parkhurst, A.M.: Design, installation, and performance of percolation lysimeters for water-quality sampling, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 36 (1993), S 429-435.
- Klotz, D., Steindl, H.: Die Entnahme von ungestörten Bodenmonolithen. In: *Die GSF-Lysimeteranlage Neuherberg* (eds. D. Klotz & K.-P. Seiler), *GSF Bericht* (1998) Heft 23, S. 33-39.
- Kretzschmar, R.: *Lysimetermessungen - Erfassung von Stoff-, Wasser- und Wärmehaushaltsgrößen von Böden, Standorten und Landschaften unter weitgehend natürlichen Bedingungen*, Selbstverlag (1999), 22 S.
- Lanthaler, C., Fank, J.: Lysimeter stations and soil hydrology measuring sites in Europe – results of a 2004 survey, *Proceedings 11. Gumpensteiner Lysimetertagung* (2005), S. 19-24.
- Meissner, R., Seeger, J., Rupp, H., Balla, H.: Assessing the impact of agricultural land use changes on water quality, *Water Science and Technology*, 40 (1999), S. 1 - 10.
- Meissner, R., Rupp, H., Schubert, M.: Novel lysimeter techniques - a basis for the improved investigation of water, gas, and solute transport in soils. In: *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 163 (2000, a) No. 6, S. 603-608.
- Meißner, R., Rupp, H., Seyfarth, M., Bräutigam, R.: Lysimeterstation. Europäisches Patent erteilt mit der Nummer 19907463, (2000, b).
- Meißner, R., Rupp, H., Seyfarth, M., Punzel, J.: Verfahren zum automatischen Betrieb eines wägbaren Grundwasserlysimeters, Deutsches Patent erteilt mit der Nummer 19902462, (2000, c).
- Meißner, R., Rupp, H., Seeger, J.: Sickerwassermonitoring mit Hilfe von Lysimetern unterschiedlicher Bauart. *Zbl. Geol. Paläont. Teil 1*, (2001), Heft 1 / 2, S. 33-50.
- Meißner, R., Seyfarth, M., Friedrich, H., Rupp, H., Beuter, M., Keßler, K.: Vorrichtung zur monolithischen Entnahme von Bodensäulen, Deutsches Patent erteilt mit der Nummer 10048089, (2002).
- Meshkat, M., Warner, R.C., Walton, L.R.: Lysimeter design, construction, and instrumentation for assessing evaporation from a large undisturbed soil monolith, *Applied Engineering in Agriculture* 15 (1999), S. 303-308.
- Müller, J.: 30 Jahre forsthydrologische Forschung auf der Großlysimeteranlage in Britz – Zielstellung und Ergebnisse, *Proceedings 11. Gumpensteiner Lysimetertagung* (2005), S. 29-32.
- Pütz, T., A. Stork, F. Führ: *Lysimeter – A comprehensive Approach of Environmental Research*, Druckschrift Forschungszentrum Jülich, (1997).
- Roth, D., Günther, R., Knoblauch, S., Michel, H.: Wasserhaushaltsgrößen von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen – Ergebnisse der TLL-Lysimeterstation, *Schriftenreihe Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft*, (2005), Heft 1, 159 S.
- SICKERWASSER – Richtlinie für Beobachtung und Auswertung*, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2003), 70 S. (Gelbdruck).

Sonntag, D., Heinze, D.: Sättigungsdampfdruck- und Sättigungsdampfdichtetafeln für Wasser und Eis, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, (1982), 305 S.

SRU- Der Rat von Sachverständigen für Umwelt: Flächendeckend wirksamer Grundwasserschutz - ein Schritt zur dauerhaft umweltgerechten Entwicklung, Sondergutachten, Metzler-Poeschel Verlag Stuttgart, (1998), 207 S.

Wriedt, G.: Modelling of nitrogen transport and turnover during soil and groundwater passage in a small lowland catchment of Northern Germany. Dissertation, Universität Potsdam., (2004), 123 S.

Young, M.H., Wierenga, P.J., Mancino, C.F.: Large weighing lysimeters for water use and deep percolation studies, Soil Science 161 (1996), S. 491-501.



# **Prüfung standortangepasster Anbausysteme unter Berücksichtigung des Klimawandels**

Dr. habil. Chr. Röhricht, A. Müller, A. Schmidt, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Leipzig/Möckern

## **1. Einleitung**

Im November 2004 konnte bei der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft ein Projekt gestartet werden, das sich mit der Entwicklung leistungsfähiger Fruchtfolgesysteme und anbautechnischer Maßnahmen beschäftigt, die an trockene und wärmere Witterungsverhältnisse angepasst sind.

### ***1.1 Exkurs Klimawandel***

Unter Fachleuten ist es unstrittig, dass der Klimawandel global bereits heute eingetreten ist. Die Veränderungen werden auch regional nachgewiesen. So ergibt sich z.B. für den Freistaat Sachsen ein signifikanter Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 0,3K/ Jahrzehnt (1960-2000). Der stärkste Temperaturanstieg wird dabei im Winter und Frühjahr beobachtet. Bis 2050 wird eine Temperaturzunahme von 1,6K prognostiziert. Die Andauer der thermischen Vegetationsperiode zeigt ebenfalls eine deutliche Veränderung. So verlängerte sich die thermische Vegetationsperiode in Sachsen im Zeitraum 1960-2000 um ca. 9 Tage (Chmielewski et al., 2005). Damit einher geht die Verschiebung der Entwicklungsphasen sämtlicher Kulturpflanzen. Ebenso muss man mit einer Veränderung des Spektrums an tierischen und pilzlichen Schaderregern sowie Unkräutern rechnen.

Neben den Temperaturen hat sich auch das Niederschlagsverhalten verändert. Mittels der Klimaprognosen des Freistaates Sachsen wurde eine Abnahme des Niederschlages bis 2050 in der Hauptvegetationszeit um bis zu 34mm errechnet. Für Kulturpflanzen sind dabei besonders die östlichen Regionen Sachsens und das Gebiet der Oberlausitz betroffen (Chmielewski et al., 2005). Dürrebedingte Ertragsausfälle und Gefahr der Bodenerosion durch Wind sind die Folgen einer Trockenheit. Daneben steigt die Gefahr von extremen Wetterereignissen, so auch Extremniederschlägen, welche zu Überschwemmungen und Wassererosion führen.

### ***1.2 Klimawandel und Pflanzenbau***

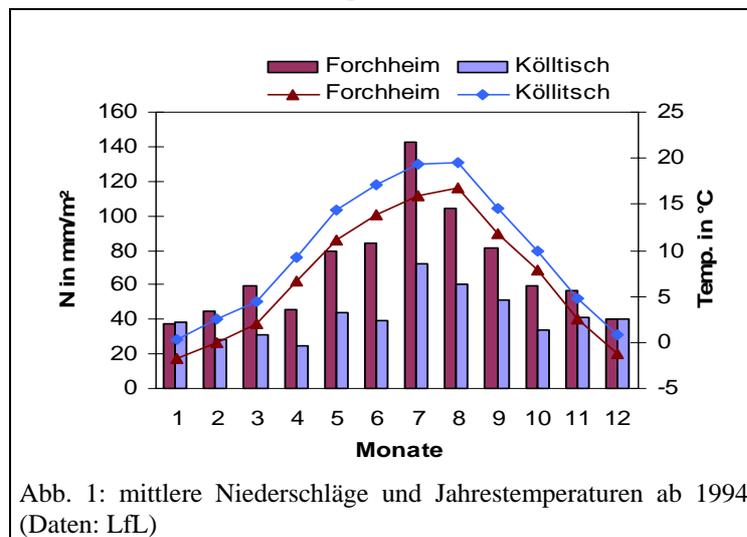
Temperatur und Niederschlag sind die wichtigsten klimatischen Faktoren, die sich auf das Wachstum der Pflanzen und den Anbau der Kulturpflanzen auswirken. Mit welchen acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen kann den Veränderungen dieser Faktoren begegnet werden? Diese Frage ist die Grundlage des „Klimawandelprojektes“. Mit den Zielen der Anpassung an den Klimawandel, der Erzielung wirtschaftlicher Erträge, der Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und den umweltfreundlichen Einsatz von Betriebsmitteln erfolgen eine standort- und klimaangepasste Sortenwahl und eine Änderung des Artenspektrums der Fruchtfolge. Außerdem wird der Trockenheit mit der Beregnung von empfindlichen Kulturen begegnet. Konservierende Bodenbearbeitung im Vergleich zu konventioneller Bodenbearbeitung soll ebenfalls die Wasserverfügbarkeit für Pflanzen im Boden länger erhalten.

Mit optimaler Düngung und Pflanzenschutz sollen bestmögliche Pflanzenernährung trotz Trockenheit und die Anpassung von neuen Prognosemodellen an jeweils vorherrschende Schadereger gewährleistet sein.

## 2. Das Klimawandelprojekt

### 2.1 Standorte

Die Umsetzung des Projektes erfolgt auf zwei, sich bodenklimatisch unterscheidenden Vergleichsgebieten in Sachsen, die die typischen Anbauregionen repräsentieren. Zum einen wurde ein leichter diluvialer Boden gewählt. Das Versuchsfeld Köllitsch-Beilrode liegt im Landkreis Torgau. Die Ackerzahl beträgt ca. 30. Die Jahresmitteltemperatur liegt bei 9.8°C, der mittlere Jahresniederschlag bei 504.7mm/m<sup>2</sup> (ab 1994).



Der zweite Standort repräsentiert einen Verwitterungsboden. Die Versuchsstation Forchheim liegt in den Kammlagen des mittleren Erzgebirges. Die Ackerzahl beträgt hier 33. Die mittlere Jahrestemperatur liegt bei 7.1°C, der mittlere Jahresniederschlag bei 827.0 mm/m<sup>2</sup>.

Die Abbildung 1 zeigt deutliche Unterschiede, vor allem in den Niederschlagsmengen.

Das Klima des mittleren Erzgebirges ist maritim beeinflusst und wird durch starke, kleinräumige Differenzierungen, Luv- und Lee- Effekte geprägt. Dagegen gehört der Raum Köllitsch-Beilrode in Ausläufern zum mitteleuropäischen Trockengebiet.

Die Temperaturunterschiede lassen sich auf die unterschiedliche Höhenlage zurückführen (Köllitsch-Beilrode: 87m üNN, Forchheim: 565m üNN).

### 2.2 Fruchtfolge

Die Wahl der Fruchtfolgeglieder erfolgte standortgerecht und ortsüblich. Die Fruchtfolge hat fünf Glieder und eine Zwischenfrucht. Alle Fruchtfolgeglieder werden jedes Jahr parallel angebaut und rotieren innerhalb des Versuches. Die Fruchtfolge des D- Standortes beinhaltet Winterraps, Wintergerste mit Zwischenfrucht Phacelia, Körnermais, Kartoffel und Winterroggen. Auf dem V- Standort werden Winterraps, Wintertriticale mit Zwischenfrucht Phacelia, Silomais, Winterweizen und Sommergerste angebaut. Es sind Marktfruchtfolgen, die auch mittelfristig Bestand haben werden.

## 2.3 Schwerpunkte des Versuches

Schwerpunkte des Versuches sind die Prüfung verschiedener Bodenbearbeitungssysteme, die Anbauintensität und die Beregnung.

### 2.3.1 Bodenbearbeitung



Abb. 2: Erosionsbahn mit Schwemmkegel nach einem Starkniederschlag (Foto: LfL, Dr. Schmidt)

Der prognostizierten Zunahme von extremen Niederschlägen und anhaltenden Dürreperioden kann durch entsprechende Bodenbearbeitung begegnet werden. Wassererosion lässt sich durch Verminderung der infiltrationshemmender Bodenverschlammung und Bodenverdichtung erreichen. Als wirksamste Maßnahme bietet sie hier eine dauerhaft konservierende Bodenbearbeitung im Fruchtfolgeverlauf an.

Versuche der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft Referat Bodenkultur (Quelle: Dr. W. Schmidt, Dr. O. Nitzsche) belegen verschiedene Infiltrationsraten bei unterschiedlichen Bodenbearbeitungsformen.

Das Diagramm in Abbildung 3 zeigt die Wasserinfiltration auf einer gepflügten und einer langjährig konservierend bearbeiteten Fläche im Sächsischen Lößhügelland. (Niederschlag: 38mm in 20 min). Die Infiltrationsrate beträgt bei der mit dem Pflug bearbeiteten Fläche 55%, bei der konservativ bearbeiteten Fläche 93%. Auch der Bodenabtrag unterscheidet sich deutlich in den beiden Bearbeitungsformen. Die gepflügte Fläche zeigt einen Bodenabtrag von 246g/m<sup>2</sup>, die

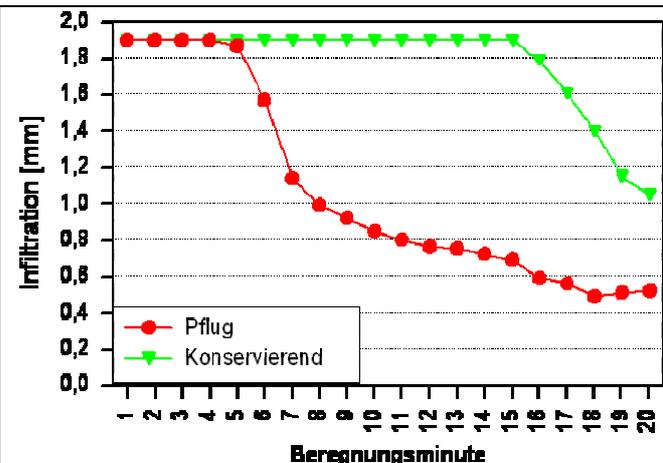


Abb. 3: Wasserinfiltration auf gepflügter und konservierend bearbeiteter Fläche (Quelle: LfL, Dr. Schmidt)

konserviert bearbeitete Fläche nur gut ein siebentel davon, 36g/m<sup>2</sup>.

Im Klimawandelversuch wird es sowohl konservierend-, als auch konventionell bearbeitete Parzellen geben. Die konventionelle Bodenbearbeitung wird herkömmlich mit einem Pflug durchgeführt mit anschließender feiner Saatbettbereitung. Bei der konservierenden, pfluglosen Bodenbearbeitung erfolgt eine nichtwendende Lockerung des Bodens mittels Grubber und Grubber-Scheibeneggenkombinationen. Die Aussaat erfolgt mit einem Mulchsaatgerät.

### 2.3.2 Anbauintensität

Stickstoff- Düngung und Pflanzenschutz erfolgt in jeweils 3 Stufen.

Gedüngt wird nach dem in der LfL entwickelten Düngungsmodell BEFU (Bestandesführung) bzw. auf Grundlage eines Nitrattestes. Dabei wird eine Parzelle optimal, eine Parzelle schwach reduziert und die dritte Parzelle reduziert gedüngt. Diese Abstufungen werden in tabelle 1 für die einzelnen Fruchtfolgeglieder dargestellt.

N - Düngung	Winterweizen	Wintertriticale	Sommergerste	Silomais	Winterraps
reduziert	N1: BEFU minus 20 kg N2: Nitrattest minus 20kg N3: 0	N1: BEFU minus 20 kg N2: Nitrattest minus 20kg N3: 0	N1: BEFU minus 40 kg	N1: BEFU minus 60 kg	N1: BEFU minus 40 kg N2: BEFU minus 40kg
schwach reduziert	N1: BEFU minus 20 kg N2: Nitrattest N3: 0	N1: BEFU minus 20 kg N2: Nitrattest N3: 0	N1: BEFU minus 20 kg	N1: BEFU minus 30 kg	N1: BEFU minus 20 kg N2: BEFU minus 20 kg
optimal	N1: BEFU N2: Nitrattest N3: Nitrattest	N1: BEFU N2: Nitrattest N3: Nitrattest	N1: BEFU	N1: BEFU	N1: BEFU N2: BEFU

Tab. 1: N-Düngung der einzelnen Fruchtarten

Die N- Düngung erfolgt jeweils zum Vegetationsbeginn (N1), zum Schossbeginn bzw. Beginn Längenwachstum (N2) und zum Ährenschieben (N3).

Anhand von Bekämpfungsrichtwerten und Prognosemodellen ergeben sich die Pflanzenschutzmaßnahmen. Auch hier erfolgt eine Dreiteilung: nach Schadschwellen, als Reduktionsvariante (Reduktion der Aufwandmenge um 25%) und eine unbehandelte Kontrolle mit Herbizid.

### 2.3.3 Berechnung

Der Berechnungszeitpunkt und die Berechnungsmenge werden anhand eines Bodenfeuchtemesssystems ermittelt. Dafür ist vorgesehen, je Parzelle (Anbauintensität und Bodenbearbeitung) und Fruchtart mehrere Bodenfeuchtesensoren zu vergraben. Diese überwachen den Pflanzenwasserverbrauch und die Wasserführung. Das Messsystem basiert auf dem TDR-System. Die Berechnung soll über ein Schleppschlauchsystem erfolgen. Dadurch wird gewährleistet, dass das Wasser direkt an die Pflanzen geführt wird.

## 2.4 Prüfmerkmale

Neben der Erfassung bestimmter EC-Stadien, der Bestandesdichte, der Blattgrüne sowie verschiedenster Ertragsparameter sollen auch Boden- und Pflanzenproben Aufschluss über Wachstums- und Nährstoffbedingungen geben.

In verschiedenen Tiefen und zu verschiedenen Zeitpunkten werden je Fruchtart Parameter wie pH- Wert, P, K, Mg, Nt, Ct und Nmin ermittelt.

Pflanzenproben werden genommen um z.B. den Ölgehalt, die Stärke, N, P, K, Mg, S und die Trockensubstanz zu ermitteln.

## 2.5 Ziele

Mit dem Projekt „Prüfung standortangepasster Anbausysteme unter Berücksichtigung des Klimawandels“ hat sich die Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft die Aufgabe gestellt, acker- und pflanzenbauliche Anpassungsstrategien an wärmere und trockenere Witterungsbe-

dingungen zu entwickeln. Für wichtige Regionen Sachsens sollen aus dem Versuch praxisrelevante Empfehlungen abgeleitet werden, um auch künftig wirtschaftliche Erträge zu sichern, die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten und die Umwelt zu schonen.



## **Klima- und Bodenschutz im Konzept zur Entwicklung und Bestandssicherung der Moore in Mecklenburg-Vorpommern**

### **1. Ausgangslage**

Moore nehmen 12,6 % der Landesfläche Mecklenburg-Vorpommerns ein, das entspricht etwa 293.000 ha. Die größten zusammenhängenden Moorflächen finden sich in den Flusstälern im Osten und Nordosten des Landes. Bis weit in das 19. Jahrhundert hinein wurden die Moore im wenig oder nicht entwässerten Zustand beweidet, gemäht oder auch zur Torfgewinnung genutzt. Erhebungen der Nutzung ergaben 1997, dass zu diesem Zeitpunkt rund 200.000 ha der Moore landwirtschaftlich, weit überwiegend als Grünland genutzt wurden, wovon etwa die Hälfte nur extensiv bewirtschaftet wurde.

Zum Zeitpunkt einer Moorübersichtskartierung Mitte der 1990er Jahre waren 62 Prozent der Moore in Mecklenburg-Vorpommern (über 180.000 ha) stark entwässert. Die durch andauernde Entwässerung hervorgerufenen Moorflächenverluste der letzten 50 Jahren belaufen sich auf mindestens 29.000 ha. Wie aktuelle Untersuchungen zeigen, setzt sich dieser Trend auch heute noch fort. Unentwässerte Moore außerhalb der Wälder sind sehr selten geworden, innerhalb der Wälder blieb ein etwas höherer Anteil der Moore bis heute naturnah erhalten. Durch intensive Nutzung ist ein Großteil der Moore irreversibel geschädigt worden, vielfach sind Degradierungen und Moorsackungen eingetreten.

Seit Beginn der 1990er Jahre erfolgten verstärkt wissenschaftliche Untersuchungen zu den Folgen intensiver Moornutzung und die Suche nach moorverträglicheren Nutzungskonzepten. Die abgeleiteten ökologischen Anforderungen beziehen sich insbesondere auf Klima- und Bodenschutzaspekte, auf Gewässerschutz und Landschaftswasserhaushalt sowie auf Naturschutzfragen. Neben diesen ökologischen Erfordernissen führten auch ökonomische Probleme bei der landwirtschaftlichen Nutzung von Mooren zu der Überlegung, die Art und den Umfang der Nutzung der Moore in Mecklenburg-Vorpommern grundsätzlich zu überdenken. Moor-Grünland verliert insbesondere für die Milchproduktion an Bedeutung. So ist seit 1989 ein drastischer Rückgang des Rinderbesatzes zu verzeichnen, gleichzeitig werden höhere Anforderungen an die Futterqualität gestellt, die auf Moorstandorten kaum zu erfüllen sind. Andererseits wiesen Schöpfwerke und Deiche häufig einen mittleren bis schlechten Zustand auf, so dass absehbar in den nächsten Jahren hohe Investitionen notwendig werden. Die in den kommenden Jahren notwendigen Investitionen für die Rekonstruktion der

wasserwirtschaftlichen Anlagen werden allein in den überflutungsgefährdeten Gebieten entlang der Ostseeküste und in den Flusstälern auf ca. 180 Mio. € geschätzt.

Vor diesem Hintergrund hat der Landtag des Landes Mecklenburg-Vorpommern am 14.12.1995 beschlossen, dass die Landesregierung „ein wissenschaftliches Konzept zum Bestand und zur Entwicklung der Niedermoore“ erstellt.

## **2. Klimarelevanz und Bodenschutzaspekte der Moore in Mecklenburg-Vorpommern**

Moore spielen eine wichtige Rolle bei der Bindung bzw. Freisetzung klimarelevanter Gase. Für Mecklenburg-Vorpommern mit seinem hohen Moorflächenanteil erschien daher im Rahmen der Erarbeitung des Moorschutzkonzepts eine Bewertung der Klimarelevanz der Moore sinnvoll (LAUN 1997). Dafür wurde – ausgehend von den zum damaligen Zeitpunkt zur Verfügung stehenden wenigen Messdaten und Schätzwerten - eine Betrachtung der klimarelevanten Gase Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Distickstoffoxid (Lachgas) (N<sub>2</sub>O) unter Beachtung des unterschiedlichen relativen Treibhauspotentials<sup>1</sup> vorgenommen.

Für das Moorschutzkonzept Mecklenburg-Vorpommern wurden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

- Unter Einbeziehung der unterschiedlichen relativen Treibhauspotentiale sind alle Moore klimarelevant. Dies betrifft auch naturnahe Moore, die zwar in erheblichem Umfang CO<sub>2</sub> binden, die aber aufgrund der Methan-Emissionen insgesamt als Emissionsquelle bezeichnet werden müssen.
- Die Höhe der Emissionen der Moore ist von der Art und Intensität der Nutzung und der damit verbundenen Degradierung des Moorbodens sowie von der Entwässerungstiefe abhängig.
- Höchstwerte der Emission werden von entwässerten Moorwäldern (auch unter Berücksichtigung der C-Bindung durch das Waldwachstum) erreicht. Sehr hohe Emissionswerte sind auch auf Ackerstandorten auf Niedermoor sowie auf intensiv genutzten Grünlandstandorten (mit Umbruch) zu erwarten.

---

<sup>1</sup> Treibhauspotential: Über die Zeit integriertes Maß für den Beitrag eines bestimmten klimarelevanten Spurengases zur Abschirmung bzw. Absorption der von der Erdoberfläche ausgestrahlten Wärmestrahlung in Bezug auf das Treibhauspotential von CO<sub>2</sub>. Nachfolgend betrachteter Zeitraum: 100 Jahre.

Die jährliche Gesamtemission der Moore Mecklenburg-Vorpommern wurde auf der Grundlage von Literaturangaben (keine eigenen Messungen) mit etwa 1.4 Mio. t CO<sub>2</sub>\*C abgeschätzt, das entspricht umgerechnet einem Kohlendioxid-Äquivalent von 5.1 Mio. t.

Bodenschutzaspekte spielten ebenso wie Klimaschutzüberlegungen eine wichtige Rolle bei der Erarbeitung des Moorschutzkonzeptes. Wachsende Moore weisen eine positive Stoffbilanz auf, in ihnen wird organische Substanz gespeichert. Entsprechend der Biomasse-Zusammensetzung werden besonders Kohlenstoff- und Stickstoff-Verbindungen im wachsenden Moor langfristig als Torf festgelegt. Ebenso wird in wachsenden Moore Wasser aus dem natürlichen Kreislauf festgelegt; Torfe besitzen ein großes Wasserspeicher- und -rückhaltevermögen. Dies wird durch den hohen Wassergehalt der Torfe möglich, der meist 90 Vol.-% überschreitet. Neben der Wasserrückhaltung spielt auch die Filterwirkung intakter Moore eine wichtige Rolle. Intakte Moore können damit insbesondere in Gebieten mit intensiver Nutzung der benachbarten Mineralboden-Standorte eine wichtige Nährstoffsенке darstellen. Den positiven Wirkungen wachsender Moore stehen schwerwiegende Probleme auf entwässerten Standorten gegenüber, da die Entwässerung von Moorstandorten eine Reihe von unumkehrbaren physikalischen und biochemischen Veränderungen des Torfkörpers nach sich zieht. Die Intensität dieser Prozesse ist dabei maßgeblich von der Entwässerungstiefe und -dauer abhängig. Durch Absenkung des Grundwasserstandes werden typisch ablaufende Bodenbildungsprozesse ausgelöst, die bis zur Degradierung der Moorböden führen können. Degradierete Standorte weisen einen unausgeglichene, überwiegend witterungsabhängigen Bodenwasser- und Lufthaushalt auf. Die Belüftung der oberen Torfschichten durch Entwässerung führt zur Torfoxidation mit Stofffreisetzungen in die Atmosphäre und in das Sickerwasser. Dabei rufen Ackernutzung und entwässerter Moorwald eine deutlich stärkere Schädigung hervor als Grünlandnutzung. Ebenso führen tiefere Grundwasserstände zu stärkerer Torfoxidation (LAUN 1997).

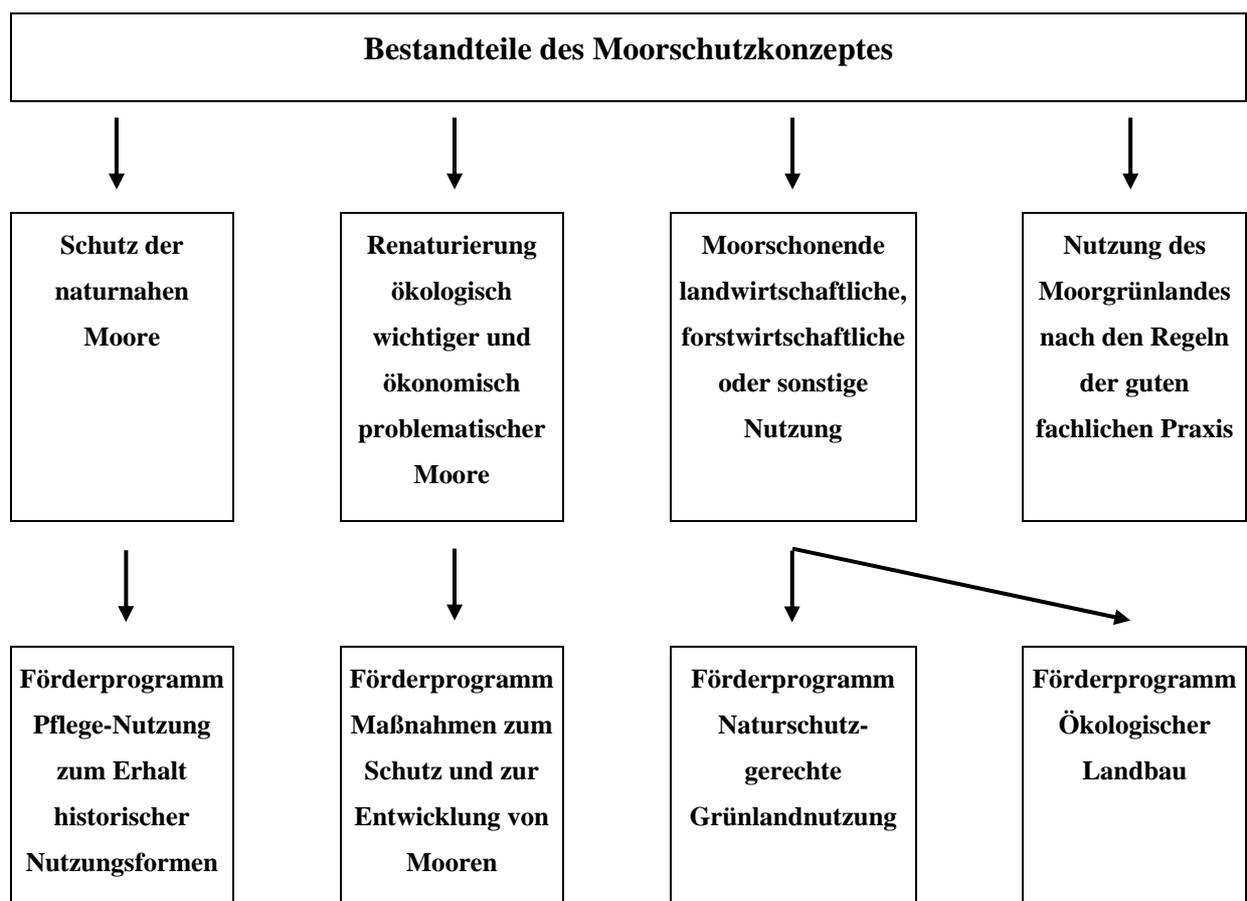
### **3. Ziele eines landesweiten Moorschutzkonzeptes**

Das Moorschutzkonzept Mecklenburg-Vorpommern wurde in den Jahren 1996 – 1998 durch eine Arbeitsgruppe aus Vertretern der Ministerien für die Bereiche Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft, Immissionsschutz und Naturschutz unter Beteiligung nachgeordneter Behörden und wissenschaftlicher Einrichtungen entwickelt und im Frühjahr

2000 durch die Landesregierung bestätigt. Das Konzept soll dazu beitragen, eine Entwicklung bei der Moornutzung zu erreichen, die ökologisch, sozial und wirtschaftlich ausgewogen ist.

Schwerpunkte des Konzeptes sind der Schutz und Erhalt der verbliebenen naturnahen Moore sowie die Renaturierung von bis zu 75.000 ha Mooren in überflutungsgefährdeten Bereichen und in Mooren, für die Mecklenburg-Vorpommern eine besondere Verantwortung innerhalb der Europäischen Union wahrnimmt. Für weitere 40.000 – 60.000 ha Moorflächen wird ein Förderprogramm zur „Naturschutzgerechten Grünlandnutzung“ angeboten. Alle anderen Moorflächen (mindestens 100.000 ha) sollen entsprechend der „guten fachlichen Praxis“<sup>2</sup> landwirtschaftlich genutzt werden. Die Bestandteile des Moorschutzkonzeptes werden in der Abb. 1 aufgeführt.

Abbildung 1: Bestandteile des Moorschutzkonzeptes Mecklenburg-Vorpommern



Das Moorschutzkonzept verfolgt in erster Linie das Kooperationsprinzip, d.h. es werden Regelungen auf freiwilliger Basis angestrebt. Das Konzept enthält keine genauen Aussagen

<sup>2</sup> Siehe u.a. auch § 5 Abs. 4 Bundesnaturschutzgesetz (BnatSchG) in der geltenden Fassung vom 25.März 2002.

zur künftigen Entwicklung einzelner Flächen, es werden statt dessen die Rahmenbedingungen und Kriterien formuliert, wie im Einzelfall verfahren werden kann. Es ist ein Konzept, das grundlegende Aussagen, zum Beispiel über den Finanzbedarf, trifft. Ob, wo und in welchem Umfang Flächen im Rahmen des „geordneten Rückzuges“ aufgegeben werden oder moorschonend genutzt werden, kann nur vor Ort entschieden werden.

Die erwarteten ökologischen und ökonomischen Auswirkungen des Konzeptvorschlages sind in den Tabellen 1 und 2 dargestellt. Die sowohl für den Klima- als auch für den Bodenschutz prognostizierten Verbesserungen beruhen auf der flächenmäßigen Ausdehnung extensiverer Nutzungsformen (mit entsprechend höheren Wasserständen) sowie auf der Renaturierung größerer Moorflächenbereiche. Bei den Renaturierungsflächen wird eine erneute Torfbildung und ein ähnlicher ökologischer Zustand wie bei naturnahen Mooren angenommen. Wie lange die Übergangszeit bis zur Herausbildung dieses Zustandes beträgt, ist offen.

Tab. 1: Erwartete ökologische Auswirkungen des Moorschutzkonzepts

<u>Bereich</u>	<u>Auswirkungen</u>	<u>Erwarteter Trend</u>
<u>Klimaschutz</u>	In intensiv genutzten Mooren bleibt die CO <sub>2</sub> - und N-Freisetzung durch Torfmineralisation weiterhin auf hohem Niveau. In extensiv genutzten Mooren kann bei entsprechend höheren Wasserständen eine verringerte Torfmineralisation erwartet werden. Durch Renaturierungsmaßnahmen wird für Teilflächen eine Torfakkumulation eingeleitet.	<u>Freisetzung klimarelevanter Gase</u> 
<u>Bodenschutz</u>	In intensiv genutzten Mooren muss weiterhin mit einem jährlichen Höhenverlust von 1 - 2 cm gerechnet werden. In kleinerem Umfang ist auch weiterhin mit dem Verlust flachgründiger Moorflächen zu rechnen. Durch Renaturierungsmaßnahmen wird für Teilflächen die Bodendegradierung gestoppt und langfristig eine Torfneubildung eingeleitet.	<u>Moorfläche absolut</u> 
<u>Wasserwirtschaft und Gewässergüte</u>	Der Landschaftswasserhaushalt kann für Teilflächen stabilisiert werden. Die Nährstoffeinträge in die Binnengewässer und in die Ostsee reduzieren sich.	<u>Nährstoffeinträge in Gewässer</u> 
<u>Arten- und Biotopschutz</u>	Der gegenwärtig laufende Verlust an moortypischen Arten und Lebensräumen kann gestoppt werden. Langfristig ist eine leichte Erhöhung der Bestände an moortypischen Arten und Lebensräumen zu erwarten. Weitere landschaftsökologische Funktionen der Moore werden wieder aktiviert.	<u>Bestände moortypischer Arten und Lebensräume</u> 
<u>Landwirtschaft</u>	Die Nutzung der Moore erfährt eine Aufteilung in Bereiche mit intensiver, extensiver und ohne Nutzung. Die Förderungen sind ausgerichtet auf eine moorschonende Nutzung bzw. auf einen geordneten Rückzug aus überflutungsgefährdeten Poldern. Der Umfang landwirtschaftlich nutzbarer Flächen in Moorbereichen geht zurück.	<u>Landwirtschaftliche Nutzfläche auf Moor</u> 
<u>Forstwirtschaft</u>	Die Nutzung der Moore im Sinne der Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes wird auf großen Flächen dauerhaft fortgeführt. In den Trockenbrüchen wird ein Teil der Moorfläche verloren gehen. Der Anteil naturnaher Moore in Wäldern steigt an. Der Moorbodenschädigung wird in Teilbereichen entgegengewirkt.	<u>Anteil der Wälder auf Moor</u> 

Tab. 2: Erwartete ökonomische Auswirkungen des Moorschutzkonzepts

<u>Bereich</u>	<u>Auswirkungen</u>	<u>Erwarteter Trend</u>
<u>Landschaftsbild und Erholungs- vorsorge</u>	Die Landschaft wird für Touristen und Erholungssuchende vielfältiger und erlebnisreicher, andererseits verschwinden Elemente der Kulturlandschaft. Insgesamt wird eine günstige Entwicklung erwartet.	<u>Touristische Nutzung</u> 
<u>Wasser- wirtschaft und Gewässergüte</u>	Der Aufwand für notwendige Entwässerungen sinkt.	<u>Entwässerungsaufwand</u> 
<u>Landwirtschaft</u>	Die Zahl der Arbeitsplätze geht in Moorbereichen zurück.	<u>Arbeitsplätze in Moorbereichen</u> 
<u>Forstwirtschaft</u>	Die Zahl der Arbeitsplätze steigt in Moorbereichen leicht an.	<u>Arbeitsplätze in Moorbereichen</u> 
<u>Projekt- gebundene Arbeitsplätze</u>	Die Zahl der durch Renaturierungsmaßnahmen gesicherten Arbeitsplätze steigt in Moorbereichen deutlich an. Nach Beendigung der Umsetzungsarbeiten werden die Arbeitsplätze zurückgehen.	<u>Arbeitsplätze in Moorbereichen</u> 

#### 4. Förderprogramm „Maßnahmen zum Schutz und zur Entwicklung von Mooren“

Nachfolgend soll das Förderprogramm „Maßnahmen zum Schutz und zur Entwicklung von Mooren“ (vgl. Abb. 1) als wesentlicher Bestandteil des Moorschutzkonzepts näher vorgestellt werden. Für die Renaturierung ökologisch wichtiger und ökonomisch problematischer Moore (überflutungsgefährdete Moore, Flusstalmoore, Küstenmoore, nährstoffarme Moore) bestehen mit dem EU-kofinanzierten Programm günstige Fördermöglichkeiten, so z. B. für den Ankauf und die Entschädigung von nicht mehr land- oder forstwirtschaftlich nutzbaren Flächen, für Untersuchungen und Planungen im Rahmen wasserrechtlicher Zulassungsverfahren, für Bau- und Umgestaltungsmaßnahmen und für die Öffentlichkeitsarbeit. Bewilligungsbehörde für dieses Programm, das eine Laufzeit von 2000 – 2006 (Umsetzungsarbeiten bis 2008) hat, ist das Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern.

Als Förderschwerpunkte gelten die nachfolgend aufgeführten Moorstandorte:

- Flächen ohne natürliche Vorflut, die überflutungsgefährdet sind (insgesamt rund 37 000 ha),
- Flächen mit schlechtem Zustand der Entwässerungs- und Deichanlagen,
- Flächen in europäischen Schutzgebieten, Naturschutzgebieten, Nationalparks und Biosphärenreservaten,
- Flächen mit einer sinnvollen ökologischen Einbindung und Vernetzung in Naturschutzprojekte, die auch die verschiedenen Moortypen in den Landschaftsräumen repräsentieren,
- größtenteils bereits brachgefallene, nicht mehr genutzte Grünlandflächen,
- tiefgründige Moorflächen.

Als Zuwendungsempfänger können sich Eigentümer, Körperschaften des öffentlichen Rechts (insbesondere Wasser- und Bodenverbände), Vereine (insbesondere Naturschutzverbände) sowie Gemeinnützige Gesellschaften des Privatrechts um Fördermittel bewerben. Die Höhe der Zuwendung beträgt 100 %, es müssen keine Eigenmittel erbracht werden. Anträge sind über das örtlich zuständige Staatliche Amt für Umwelt und Natur als technische wasserwirtschaftliche Fachbehörde an das Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie („Koordinierungsstelle Moorschutz“) als Bewilligungsbehörde zu richten. Es erfolgt eine Prüfung und Zustimmung durch den so genannten Moorbeirat, dem Vertreter von Ministerien, Verbänden und wissenschaftlichen Einrichtungen angehören.

### **Übersicht über bewilligte Vorhaben**

Bis Mitte des Jahres 2005 wurden 42 Vorhaben mit einem Gesamtvolumen von ca. 26 Mio. € bewilligt. Die Gesamtgröße der Projektflächen betrug zu diesem Zeitpunkt 9.976 ha. Einen räumlichen Schwerpunkt bilden mit zusammen 25 Projekten das Peenetal und das angrenzende Trebeltal im Osten Mecklenburg-Vorpommerns. Als Zuwendungsempfänger treten in 16 Fällen Wasser- und Bodenverbände, in 20 Fällen die Landgesellschaft Mecklenburg-Vorpommern mbH, ein Landkreis, zwei Gemeinden, zwei Naturschutzvereine sowie in einem Fall eine Teilnehmergeinschaft eines Bodenordnungsverfahrens auf. Die Laufzeit der Projekte bewegt sich zwischen drei und fünf Jahren, wobei der größere Teil der

Projektzeit für die vorbereitenden Planungen, das Genehmigungsverfahren und die für die Projektumsetzung notwendige Verfügbarmachung von Flächen benötigt wird. Ende des Jahres 2000 bewilligte erste Vorhaben des Programms wurden 2004 beendet. Einen Überblick über abgeschlossene und laufende Moorschutzprojekte gibt die Tabelle 3.

Obwohl die Projektgebiete (ganz überwiegend Polderflächen) naturräumlich stark variieren (Moore in Flusstälern, im Küstenüberflutungsbereich, an Seerändern, in vermoorten Senken) haben sich doch in der technischen Ausführung Vorzugsvarianten ergeben:

- Wasser aus dem Einzugsgebiet wird nach Möglichkeit in das Vernässungsgebiet eingeleitet, beispielsweise durch Umverlegung von Vorflutern, die bisher an Polderflächen vorbeigeführt wurden,
- Fanggräben in Hanglagen werden verschlossen,
- im Binnenland (an Fluss- und Seeufern) bleiben Deiche/Verwallungen erhalten, um für einen Übergangszeitraum den Wasseraustausch zwischen wiedervernässtem Moorbereich und dem angrenzenden Gewässer zu minimieren, überschüssiges Wasser wird durch Rohre mit und ohne Klappen abgeführt,
- im Küstenbereich wird dagegen ein vollständiger Rückbau der Deiche/Verwallungen favorisiert, um den ursprünglichen, durch aperiodische Überflutungen geprägten Charakter des Standortes wieder herzustellen,
- Schöpfwerke, E-Zuleitungen und andere nicht mehr benötigte technische Infrastruktur werden zurückgebaut.

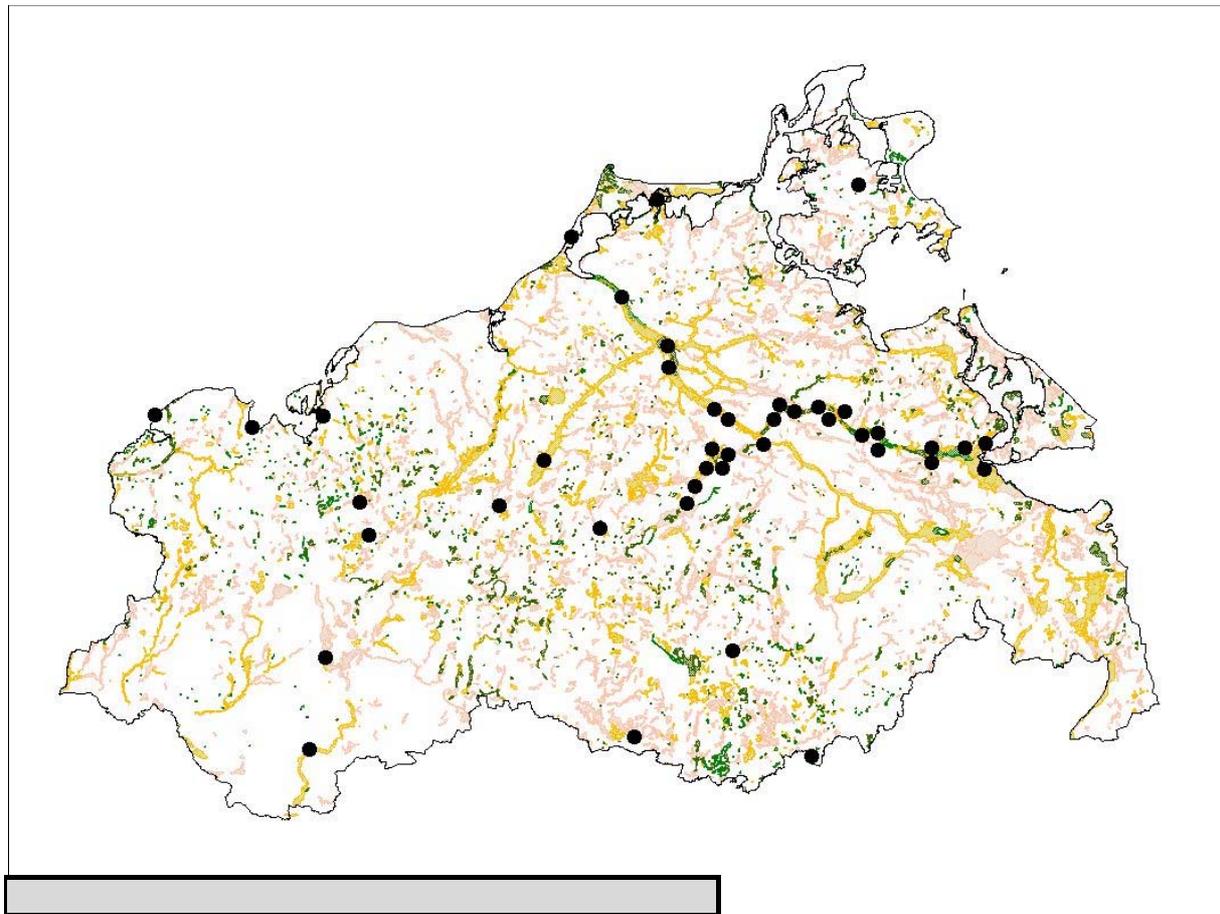
Abbildung 1: Verschluss von Entwässerungsgräben an der Peene



Abbildung 2: Überstau von Moorflächen bis zur Talhangkante (Peenetal bei Menzlin)



Abbildung 3: Verteilung der Moorflächen in Mecklenburg-Vorpommern und Lage der Moorschutzprojekte



## 5. Erste Ergebnisse der Wiedervernässung

Wissenschaftlich ausgerichtete Erfolgskontrollen zur Überprüfung der erwarteten ökologischen und ökonomischen Auswirkungen des Moorschutzkonzepts (vgl. Tab. 1 und 2) können im Rahmen des Förderprogramms „Maßnahmen zum Schutz und zur Entwicklung von Mooren“ grundsätzlich nicht finanziert werden. Es erfolgt eine den EU-Erfordernissen genügende Evaluierung durch den Zuwendungsempfänger.

Seit dem Jahr 2003 wird jedoch – nach Aufforderung durch die genehmigenden Wasserbehörden - auf Flächen im Peenetal der Einfluss der Rücküberstauung degradierter Niedermoorstandorte auf die Dynamik der C-Umsetzungsprozesse und die Emission klimarelevanter Spurengase ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ) projektbegleitend durch das ZALF Müncheberg (Prof. J. Augustin) untersucht. Folgende Untersuchungsschwerpunkte sind vereinbart:

- Entwicklung und Testung eines Verfahrens zur Berechnung der Netto-CO<sub>2</sub>-Freisetzung auf Grundlage von CO<sub>2</sub>-Flussmessungen mit Hilfe eines automatisierten Gaswechsellmesssystems
- Langzeitmessungen (ca. 3 Jahre) zur Netto-CO<sub>2</sub>-Emission auf einem entwässerten und einem wiedervernässten Niedermoorstandort im Bereich des Peenetales (Zarnekow-Upost)
- Simultane Bestimmung der Netto- CO<sub>2</sub>-Emission mit Hilfe eines mikro-meteorologischen Verfahrens (Methodenvergleich, Kooperation mit Univ. Poznan/Polen).

In einem Zwischenfazit wurde durch das ZALF Müncheberg eingeschätzt, dass eine exakte Einschätzung des Einflusses der Wiedervernässung auf die klimatische Wirkung der Niedermoore derzeit nicht möglich ist, weil die Angaben zur Lachgas- und Methangasemission lückenhaft und extrem variabel sind und Angaben zur Netto-CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus Niedermooren fast gänzlich fehlen, obgleich diesem Gas im Kontext die größte Bedeutung zukommen dürfte. Als Ursache hierfür gilt die Feststellung, dass es derzeit keine Untersuchungsmethode gibt, die kurzfristig (ab einem Jahr) präzise Aussagen zur Netto-CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus Niedermooren erlaubt. Die Untersuchungen sind vorerst bis Mitte 2007 befristet.

## **6. Ausblick**

Das Prinzip der Freiwilligkeit hat sich im Förderprogramm „Maßnahmen zum Schutz und zur Entwicklung von Mooren“ bewährt und wird als eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg des Programms angesehen. Das Freiwilligkeitsprinzip eröffnet Möglichkeiten der Kooperation (z.B. freiwilliger Landtausch zwischen Landwirten in der Region).

Gemeinden und Landkreise erkennen zunehmend, dass Moorschutzmassnahmen die touristische Attraktivität der jeweiligen Region fördern. Beispiele hierfür finden sich insbesondere im Küstenraum.

Es wird erwartet, dass im laufenden Programmzeitraum bis 2008 bis zu 10.000 ha Moor wiedervernässt werden können. Es wäre wünschenswert, die Entwicklung in den wiedervernässten Projektflächen, die aufgrund der Standortbedingungen (vgl. Abb. 5 und 6) vermutlich unterschiedlich verlaufen wird, durch ein Monitoringprogramm zu dokumentieren.

Abbildung 4: Flach überstaute Flächen mit durchwachsender Vegetation im ehemaligen Polder Wendewiesen (Trebeltal)



Abbildung 5: Stärker überstaute ehemalige Polderfläche im Peenetal (Polder Priemen)



Abbildung 6: Biberschnitte an einem verbauten Fanggraben im ehemaligen Polder Priemen (Peenetal)



## 7. Literatur

BERG, E.; JESCHKE, L.; LENSCHOW, U.; RATZKE, U.; THIEL, W. (2000): Das Moorschutzkonzept Mecklenburg-Vorpommern. Telma 30: 173-220. Hannover.

LANDESAMT FÜR UMWELT UND NATUR MECKLENBURG-VORPOMMERN (LAUN)(1997): Landschaftsökologische Grundlagen und Ziele zum Moorschutz in Mecklenburg-Vorpommern. - Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt und Natur Mecklenburg-Vorpommern. Heft 3; 72 S.

UMWELTMINISTERIUM MECKLENBURG-VORPOMMERN (UM)(2000): Moorschutzkonzept. Konzept zur Bestandssicherung und zur Entwicklung der Moore in Mecklenburg-Vorpommern. – 77 S.; Schwerin.

### **Autor:**

Dr. Uwe Lenschow  
Landesamt für Umwelt, Naturschutz  
und Geologie Mecklenburg-Vorpommern  
Goldberger Straße 12  
18273 Güstrow  
E-Mail: [Uwe.Lenschow@lung.mv-regierung.de](mailto:Uwe.Lenschow@lung.mv-regierung.de)

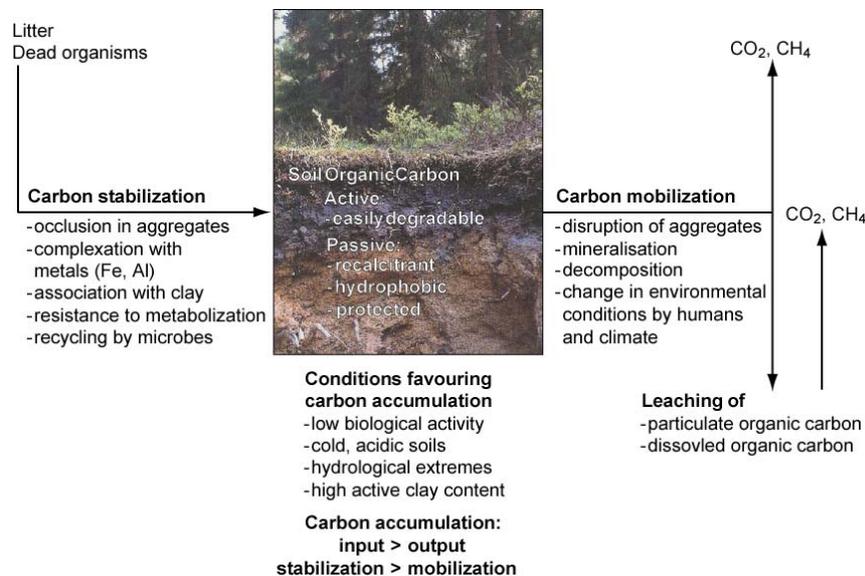
## **Ergebnisse aus dem EU-Projekt CarboEurope zu Fragen der standortgerechten Bodennutzung und des Klimaschutzes**

*Annette Freibauer und Marion Schrumpf*

*Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Postfach 100164, 07701 Jena*

### **Kohlenstoff im Boden**

Böden sind weltweit der größte und gleichzeitig langfristige aktive terrestrische Speicher für organischen Kohlenstoff (C). Kohlenstoff gelangt in Böden durch absterbende Vegetationsteile wie Blätter, Äste und Wurzeln oder Bodenorganismen. Der größte Teil dieses Kohlenstoffs wird von Mikroorganismen wieder zu CO<sub>2</sub> mineralisiert, nur wenige Prozent verbleiben im Boden und werden zu Humus. Auch wenn insbesondere die frühen Stadien dieses Umwandlungsprozesses unklar sind, sind verschiedene Bodeneigenschaften und Mechanismen bekannt, die eine Stabilisierung von C im Boden fördern. Dazu gehört eine gute Aggregation, Komplexierung mit Metallionen, Ton-Humus-Kopplung, aber auch die Tatsache, dass ein Teil der organischen Substanz schlecht von Mikroorganismen weiter verarbeitet werden kann und daher zunächst erhalten bleibt. Entweder ist das Material schwer zersetzbar oder die Umweltbedingungen hemmen mikrobielle Aktivität, z.B. in kaltem, saurem, oder anaerobem Milieu. Kohlenstoffmobilisierung wird dagegen durch hohe mikrobielle Aktivität gefördert, die durch Klimawandel oder menschliche Eingriffe wie Pflügen weiter gesteigert werden kann. In der Gesamtbilanz akkumuliert C in Böden, wenn C-Einträge die C-Austräge überwiegen und damit eine Stabilisierung des Kohlenstoffs erfolgt. Es gibt wenig absolute/irreversible Stabilisierung von C im Boden - er ist ein dynamisches System (Abb. 1).



**Abb. 1.** Stabilisierungs- und Mobilisierungsmechanismen für Kohlenstoff in Böden (verändert aus Schulze und Freibauer 2005)

## Bodenforschung in CarboEurope

### Hintergrund

Das Hauptziel des EU-Projektes CarboEurope-IP ([www.carboeurope.org](http://www.carboeurope.org)) besteht darin die terrestrische Kohlenstoffbilanz von Europa auf lokaler bis kontinentaler Ebene zu verstehen, zu quantifizieren und möglicherweise auch vorherzusagen. Dabei spielen auf der Ebene von Ökosystemen mikrometeorologische Messungen mit der Eddy-Kovarianz-Methode eine wichtige Rolle, mit deren Hilfe der Austausch von CO<sub>2</sub> zwischen dem Ökosystem und der Atmosphäre bilanziert wird. Der gemessene Netto-CO<sub>2</sub>-Fluss ergibt sich aus der Differenz zwischen CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch Photosynthese und CO<sub>2</sub>-Freisetzung durch die Atmung der Vegetation und Mineralisation des Kohlenstoffs im Boden. Kommt es zu einer Netto-Akkumulation von C in einem Ökosystem, kann dies zum einen durch Zuwachs der Biomasse geschehen und zum anderen durch eine Erhöhung des C-Speichers im Boden.

Während Änderungen der Biomasse insbesondere bei Wäldern standardmäßig in Forstinventaren erfasst werden, ist dies beim Boden bislang oft nicht oder ungenügend der Fall gewesen. Die Ursachen dafür liegen in der großen kleinräumigen Hete-

rogenität und der Schwierigkeit, die kleinen zu erwartenden Änderungen gegenüber den großen bereits vorhandenen C-Gesamtgehalten nachzuweisen. Daher ist es auch nicht möglich, Änderungen im Boden mit der gleichen zeitlichen Auflösung zu erfassen wie Änderungen der Biomasse oder gar der Gaszusammensetzung der Atmosphäre. Da die C-Bilanzierung mit Hilfe der Eddy-Kovarianz-Methode noch mit gewissen Unsicherheiten behaftet ist, ist eine Verifizierung der Ergebnisse durch Inventurdaten von Vegetation und Boden notwendig. Da Böden einen sehr großen C-speicher darstellen, der durch Änderungen der Umweltbedingungen und der Nutzung bis zu einem gewissen Grad verändert werden kann, ist es darüber hinaus auch wichtig zu erkennen, wie sich die C-Vorräte im Boden im Laufe der Zeit entwickeln (ob Böden zu Quellen oder Senken von CO<sub>2</sub> werden) und welche Prozesse dafür verantwortlich sind. Daher wurde der Boden als ein Schwerpunkt in die Untersuchungen von CarboEurope mit einbezogen. Da das Kyoto-Protokoll einen Nachweis von Änderungen innerhalb der Verpflichtungsperiode von 5 Jahren verlangt, wurde dieser Zeitraum ausgewählt um zu testen, ob Änderungen im Bodenkohlenstoffgehalt in Pilot-Ökosystemen nachweisbar sind.

### **Forschungsfragen**

- Wohin verschwindet der Kohlenstoff im Ökosystem (Verifizierung der Eddy-Messungen)?
- Können Änderungen des C-Vorrats im Boden auf Projektebene innerhalb von 5 Jahren nachgewiesen werden?
- Wie verhalten sich Wälder, Grassland und Ackerland unterschiedlicher Nutzung?
- Welche Prozesse der C-Stabilisierung spielen eine Rolle?
- Welche C-Fractionen können als Indikatoren des Wandels dienen?

### **Methoden**

Für die Studie wurden 12 Standorte unterschiedlicher Nutzung mit kontinuierlichen Eddy-Fluss-Messungen in Europa ausgewählt: 3 Laubwaldstandorte, 3 Nadelwälder, 3 Grassländer und 3 Ackerstandorte (Abb. 2). Im Bereich des Quellgebiets (= Footprint) der Eddy-Kovarianz-Messtürme der Standorte wurden im Laufe des Jahres 2004 jeweils 100 weitgehend ungestörte Bohrkerne (9.2 cm Durchmesser, bis zu 70 cm Länge) entlang eines systematischen Rasters entnommen, welches eine Wieder-

beprobung mit gepaarten Stichproben ermöglicht. Die organische Auflage wurde mit Hilfe eines Rahmens beprobt. Die Bohrkern wurden bodenkundlich beschrieben und in Segmente von 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, ... cm unterteilt. Steine und Wurzeln (>1mm Durchmesser) wurden vor Trocknung (40°C) und Weiterbehandlung ausgelesen.

An allen Proben (insgesamt ca. 9000 Einzelproben) erfolgt die Bestimmung des Feinbodengehalts (< 2mm) sowie von gesamt C<sub>org</sub>- und N-Gehalten um Informationen über die aktuellen C-Vorräte und deren Varianz auf den Untersuchungsflächen zu erhalten. Zusätzlich werden von weiteren Projektpartnern an 10 zufällig ausgewählten Bohrkernen pro Standort weitere prozessorientierte Studien betrieben:

- potenzielle Mineralisation von organischer Substanz in Böden
- Verteilung der organischen Substanz in Böden nach Dichte, Textur und Aggregatgröße
- Isotope <sup>13</sup>C, <sup>15</sup>N, <sup>14</sup>C

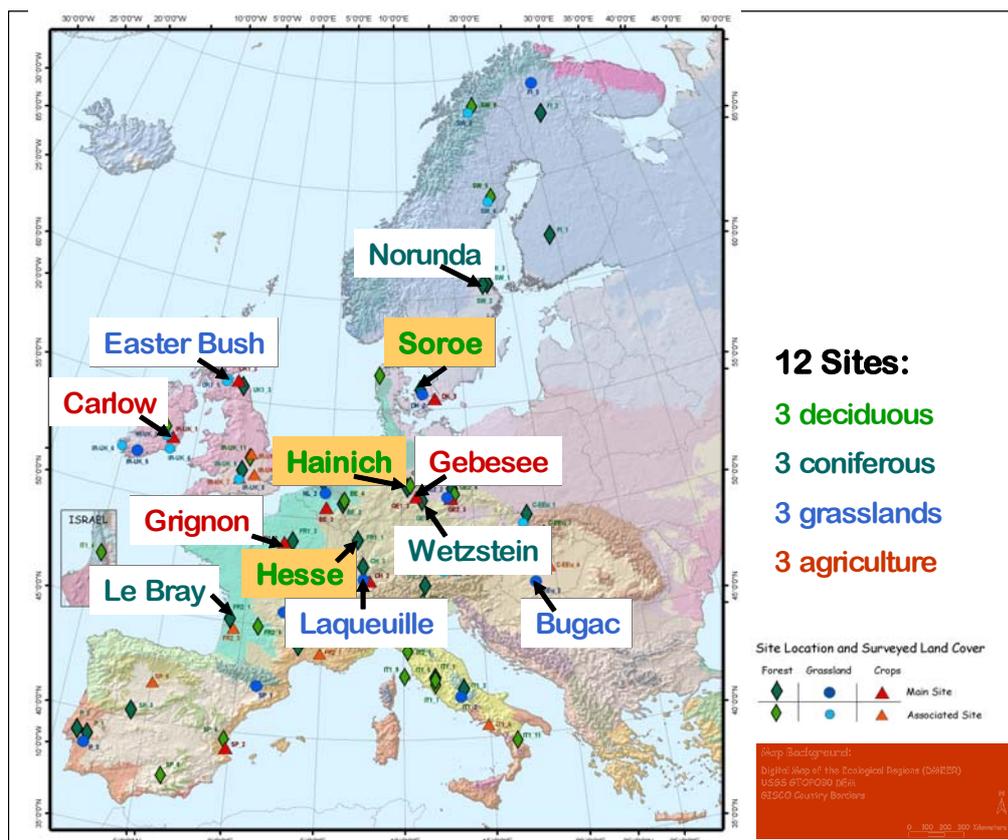


Abb. 2 Geographische Lage der CarboEurope-Messflächen und der Pilot-Standorte zur Bestimmung von Kohlenstoffänderungen im Boden

## Erste Ergebnisse

Ergebnisse aller Bohrkerne liegen bislang vor allem von den Laubwaldstandorten vor. Dabei handelt es sich um einen 35-jährigen Buchen-Eichenwald in Hesse (Frankreich, Stagnic Luvisol), einen 80-jährigen Buchenwald in Sorøe (Dänemark, Gleyic Cambisol) und einen naturnahen Wald im Hainich Nationalpark (Deutschland, Eutric Cambisol). Erste Ergebnisse zeigen, dass sich die drei untersuchten Flächen sowohl im C-Vorrat, als auch der Varianz der C-Gehalte unterscheiden.

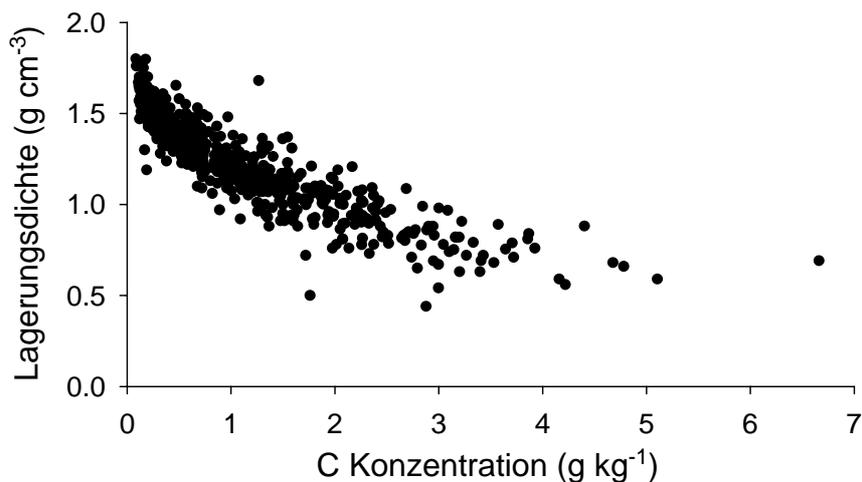
Im Hainich Nationalpark sind die C-Konzentrationen und C-Vorräte am höchsten, in Hesse am geringsten (Tab 1.). Die Streuung der C-Konzentrationen war in Sorøe durch das vereinzelte Auftreten von anmoorigen Senken am höchsten.

**Tab. 1.** C-Konzentrationen und Vorräte der Standorte Hesse, Sorøe und Hainich ( $\pm$  Standardabweichung, Variationskoeffizient kursiv).

	0-5 (g kg <sup>-1</sup> )	Vorrat 0-5 (gC m <sup>-2</sup> )	Vorrat 0-60 (gC m <sup>-2</sup> )
Hesse	2,84 $\pm$ 0,96	1127 $\pm$ 293	6118 $\pm$ 1480
n = 95	<i>34%</i>	<i>26%</i>	<i>24%</i>
Sorøe	4,69 $\pm$ 2,52	1658*	9036*
n = 10	<i>54%</i>		
Hainich	5,43 $\pm$ 1,13	2256*	13453*
n = 27	<i>21%</i>		

\*Ergebnisse über Standardabweichungen liegen noch nicht vor

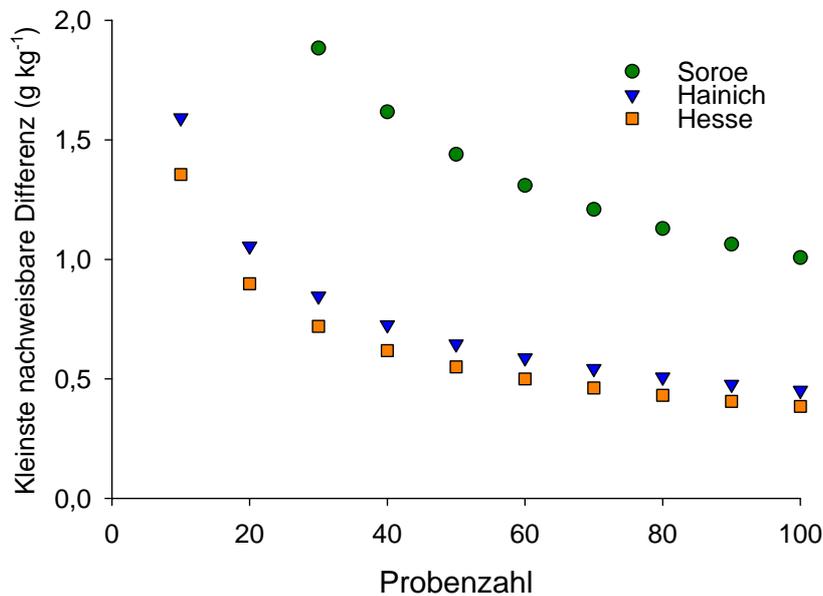
Berechnungen der C-Vorräte in Hesse ergaben, dass sich der Variationskoeffizient der Vorräte gegenüber dem entsprechenden Wert für die C-Konzentration verringerte, was auf eine negative Korrelation zwischen C-Konzentrationen und Lagerungsdichte zurückzuführen ist (Abb. 3). Daher ist es wichtig, dass die Bestimmung von C-Konzentration und Lagerungsdichte an denselben Proben durchgeführt wird, um die Variabilität der C-Vorräte innerhalb der Standorte zu verringern.



**Abb. 3.** Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und C-Konzentration am Standort Hesse.

Auf Basis von Mittelwert und Standardabweichung lässt sich mit Hilfe der Power-Analyse (hier:  $\alpha = 0,05$ , statistische Power = 0,80) die kleinste nachweisbare Differenz (MDD) bei einer Wiederbeprobung in Abhängigkeit von der Probenzahl abschätzen. Dabei wird angenommen, dass die Standardabweichung bei der Wiederbeprobung identisch ist. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die geringsten Änderungen in Hesse nachweisen lassen würden (Abb. 4). Im Hainich erschweren die hohen bereits vorhandenen C-Gehalte den Nachweis kleiner Änderungen. Dieser Effekt überwiegt den geringeren Variationskoeffizienten im Vergleich zu Hesse.

Vergleicht man die Nachweisgrenzen für den Standort Hesse bei 100 Proben mit der von Liski et al. (2002) modellierten durchschnittlichen C-Änderung in Wäldern Frankreichs in 5 Jahren ( $165 \text{ gC m}^{-2}$ ), könnte dieser Wert in Hesse nachgewiesen werden, wenn die Änderung in den oberen 5 cm erfolgte (MDD  $117 \text{ gC m}^{-2}$ ). Eventuell wäre dies auch noch möglich, wenn die Änderung in den oberen 20 cm (MDD  $161 \text{ gC m}^{-2}$ ) erfolgte. Bei einer Verteilung auf eine größere Bodentiefe wird die Änderung zu klein im Vergleich zu den zu berücksichtigenden Gesamtvorräten. Da die Wiederbeprobung mit gepaarten Stichproben erfolgen soll und nicht wie hier angenommen mit zufälligen Stichproben, kann die Nachweisbarkeit von Änderungen insbesondere an so heterogenen Standorten wie in Sorøe noch deutlich verbessert werden.



**Abb. 4.** Kleinste nachweisbare Differenz an den drei Laubwaldstandorten in Abhängigkeit von der Probenzahl (one-sample t-test,  $\alpha = 0,05$ , statistical power = 0,8).

Insgesamt sind Änderungen im Boden am besten nachweisbar, wenn der anfängliche C-Vorrat und dessen Varianz über die Fläche gering sind. Darüber hinaus wäre es hilfreich, wenn sich die Änderung im C-Vorrat in einem bestimmten Bodenabschnitt, z.B. dem Oberboden, abspielt und nicht auf das gesamte Bodenvolumen verteilt. Zumindest an einigen der untersuchten Standorte scheint die Nachweisbarkeit von Änderungen in der gleichen Größenordnung zu liegen wie die erwarteten Änderungen. Der eigentliche Nachweis kann jedoch erst nach der Wiederbeprobung – zunächst 2008, dann alle 5 Jahre – erbracht werden.

Zu den beschriebenen Prozessstudien liegen noch keine interpretierten Ergebnisse vor und auch ein Landnutzungsvergleich ist noch nicht möglich. Die Ergebnisse vorangegangener Projekte über den Einfluss der Landnutzung auf den Bodenkohlenstoff werden im Folgenden beschrieben.

## **Einfluss der Landnutzung**

### **Wald**

Deutsche Waldböden gelten als C-neutral oder zeigen eine leichte C-Zunahme (z.B. Janssens et al. 2005). Bisher ungeklärt sind die vergleichsweise niedrigen C-Gehalte in unseren Wäldern, die deutlich unter den typischerweise in Modellen als Gleichgewichtsvorräte ermittelten Werten liegen. Ein Entfernen der Streuschicht in der Vergangenheit durch Streunutzung oder Brände und eine geringere Produktivität durch Degradation könnten mögliche Erklärungen sein. Dies würde auf ein zukünftiges Potential für C-Sequestrierung in Waldböden hindeuten.

Die starke Mechanisierung des Waldbaus in den letzten Jahrzehnten und die zunehmende Einzelbaumnutzung führen aber zu intensiverer Erschließung und eventuellen Verdichtungsproblemen, die die biologische Aktivität, Durchwurzelung und damit C-Zufuhr in Teile des Waldbodens vermindern können. Das Ausmaß dieser möglichen C-Verluste ist unklar.

### **Grünland**

Böden unter Dauergrünland sind europaweit C-neutral (Janssens et al. 2005) oder verzeichnen eine leichte C-Zunahme in Gegenden, in denen Dauergrünland auf vor Jahrzehnten noch ackerbaulich genutzten Standorten vorkommt. Dies trifft z.B. für die deutschen Mittelgebirgsregionen zu.

Allerdings sind in der jährlichen C-Bilanz große Schwankungen zu verzeichnen, die v.a. durch wechselnde Nutzung als Wiese mit hoher Biomasseabfuhr oder Weide mit höheren Rückständen sowie die unregelmäßige C-Rückführung durch tierische Exkrememente oder organische Dünger zurückzuführen sind (Greengrass-Projekt, unveröff.).

### **Acker**

Ackerflächen stellen wahrscheinlich europaweit C-Quellen dar (Janssens et al. 2005). Regionale Studien zeigen C-Verluste in Äckern als Folge von Änderungen im Management und Grünlandumbruch (Finnland, Flandern, Grossbritannien, Österreich; Zitate in Schulze und Freibauer 2005), die zu durchschnittlichen C-Verlusten von  $0.25-0.5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  führen. Besonders wichtig ist dabei der flächige Rückgang und die Konzentration und Intensivierung der Viehhaltung. Dadurch verschwinden temporäres Grünland und Futterbau aus den Fruchtfolgen. Insgesamt haben sich die

Fruchtfolgen in den letzten Jahrzehnten tendenziell von intensiv und tief wurzelnden Fruchtarten entfernt. Dies konnte auch durch die Einführung von Winterzwischenfrüchten nicht komplett kompensiert werden.

Für Deutschland fehlen die nötigen Basisdaten, um die Entwicklung der Boden-C-Vorräte belastbar abzuschätzen. In CarboEurope werden europaweit an verschiedenen Standorten unterschiedlich intensiv genutzte Flächen verglichen, die sich in Bewirtschaftungsart und Bodenbearbeitung unterscheiden, so dass Erkenntnisse auch auf deutsche Bedingungen übertragen werden können, soweit die Landnutzungsbedingungen vergleichbar sind.

### **Moornutzung**

Gedränte Moore unter landwirtschaftlicher Nutzung stellen Hotspots für C-Verluste dar. Über 90% der deutschen Moore sind gedränt. Wegen des günstigen Klimas und des Vorherrschens von Niedermooren liegen die Emissionen in Deutschland über dem europaweiten Durchschnitt bei grob  $3,1 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Die derzeitige Klimabelastung durch deutsche Moore wird auf 6 bis 12 Tg C-Äquiv.  $\text{a}^{-1}$  geschätzt (Byrne et al., 2004). Die größte Emissionsminderung wäre über eine vollständige Renaturierung aller genutzten Moorflächen hin zu naturnahen Bedingungen erreichbar. Die auf die Gesamt-Moorfläche hochgerechneten Emissionsfaktoren von naturnahen Mooren erlauben eine quantitative Abschätzung einer Emissionsreduktion um 5.3 bis 11 Tg C-Äquiv.  $\text{a}^{-1}$ . Dies entspräche 11 bis 20% der deutschen Verpflichtung zur Emissionsreduzierung unter dem Kyoto-Protokoll.

### **Einfluss des Klimawandels**

Wird der Abbau organischer Substanz in Böden durch Temperaturanstieg beschleunigt? Dies hängt davon ab, ob ausreichend Bodenfeuchte vorhanden ist und die mikrobiellen Prozesse tatsächlich temperaturlimitiert sind (Reichstein et al. 2003). Überraschend hohe schleichende C-Verluste, die in C-reichen Böden Englands beobachtet wurden (Bellamy et al. 2005), könnten im Zusammenhang mit Klimavariabilität stehen (Schulze & Freibauer 2005). Für den deutschen Raum fehlen derartige Untersuchungen. Eine zukünftige Häufung von Extremereignissen könnte allerdings die Produktivität unserer Ökosysteme und damit auch die C-Zufuhr in Böden beeinträchtigen. Untersuchungen der direkten Folgen der Hitze- und Dürrewelle 2003 (Ciais et al. 2005) zeigen für deutsche Ökosysteme zumindest eine drastisch reduzierte C-Aufnahme.

## **Forschungs- und Entwicklungsbedarf**

### Grundlagen

- C-Stabilisierungsmechanismen im Boden aufklären, z.B. die Interaktion zwischen chemischen und biologischen Prozessen.
- Entwicklung von gezielteren, am Prozessverständnis orientierten Strategien zur langfristigen C-Speicherung in Böden.
- Beschreibung des Status Quo: Inventur der C-Vorräte in Böden Deutschlands (alle Landnutzungen, C-Gehalte, Lagerungsdichte, Moore: Mächtigkeit des Torfkörpers).
- Flächenbezogenen Wandel in Nutzung und Management in den letzten Jahrzehnten rekonstruieren, um den Einfluss der vergangenen Landnutzung auf die gegenwärtigen C-Vorräte in Böden zu quantifizieren.
- Alternative Moornutzung und Folgen für N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub>-Emissionen bestimmen. Erwartungsgemäß werden bei Wiedervernässung CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub>O-Emissionen stark reduziert, dagegen CH<sub>4</sub>-Emissionen gefördert. Bisherige Studien zeigen allerdings, dass die erhöhten CH<sub>4</sub>-Emissionen nur einen relativ kleinen Teil des Klimaschutzeffektes kompensieren. Das Verhalten von N<sub>2</sub>O auf stark eutrophen, nur teilweise vernässten Flächen ist dagegen unklar.
- Synergien von Klimaschutz mit anderen Politikfeldern, insbesondere in der Umweltpolitik, z.B. Grundwasser, Erosion, und Förderung ländlicher Räume, untersuchen.
- Betriebs- und volkswirtschaftlich attraktive Klimaschutzmaßnahmen in der Landnutzung entwickeln und fördern.

### **Handlungsbedarf**

Erhaltung der existierenden C-Vorräte fördern: schwer gewonnen, schnell zerronnen

- Fokus auf Hot-Spots und Risiken: C-reiche und organische Böden, Ackerböden
- Praktische C-konservierende Bodennutzung:
  - Mineralboden/Acker: Regelmäßige C-Zufuhr und Förderung der Bodenstruktur, z.B. durch Förderung der Bodenfauna, Wiedereinführung von ü-

berjährigem Gras oder Klee gras in den ackerbaulichen Fruchtfolgen und mehrjährige Pflanzen, z.B. nachwachsende Rohstoffe, sowie organischen Landbau

- Organische Böden: Erhöhung des Wasserspiegels zur Bremsung des Torfabbaus. Möglichkeiten und ökonomische Machbarkeit alternativer Nutzungen.

### Literatur:

Bellamy PH, Loveland PJ, Bradley RI, Lark RM, Kirk GJD (2005) Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. *Nature*, 437, 245-248.

Byrne, K.A., B. Chojnicki, T.R. Christensen, M. Drösler, A. Freibauer, et al. (2004): EU peatlands: Current carbon stocks and trace gas fluxes. CarboEurope-GHG Concerted Action – Synthesis of the European Greenhouse Gas Budget, Report 4/2004, Specific Study, Tipo-Lito Recchioni, Viterbo, October 2004, ISSN 1723-2236, <http://gaia.agraria.unitus.it/ceuroghg/ReportSS4.pdf>.

Ciais P, Reichstein M, Viovy N, et al. (2005) Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437, 529-533.

Janssens IA, Freibauer A, Ceulemans R, et al. (2005) The carbon budget of terrestrial ecosystems at country-scale – a European case study. *Biogeosciences*, 2, 15–26, SRef-ID: 1726-4189/bg/2005-1722-1715.

Liski, J., Perruchoud, D. & Karjalainen, T. (2002). Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. *Forest Ecology and Management* 169: 159-175.

Reichstein M, Rey A, Freibauer A, et al. (2003) Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochem. Cycles*, 17, doi:10.1029/2003GB002035.

Schulze ED, Freibauer A (2005) Environmental science: Carbon unlocked from soils. *Nature*, 437, 205-206.



**Spurenstoffaustausch zwischen der bodennahen Atmosphäre und  
ackerbaulich genutzten Flächen :  
Erfahrungen aus dem Braunschweiger Kohlenstoffprojekt**

Weigel, H.J., Pacholski, A., Waloszczyk, K, Frühauf, C., Manderscheid, R., Anderson, T.H., Heinemeyer, O., Kleikamp, B., Helal, M., Burkart, S., Schrader, S., Sticht, C., Giesemann, A.

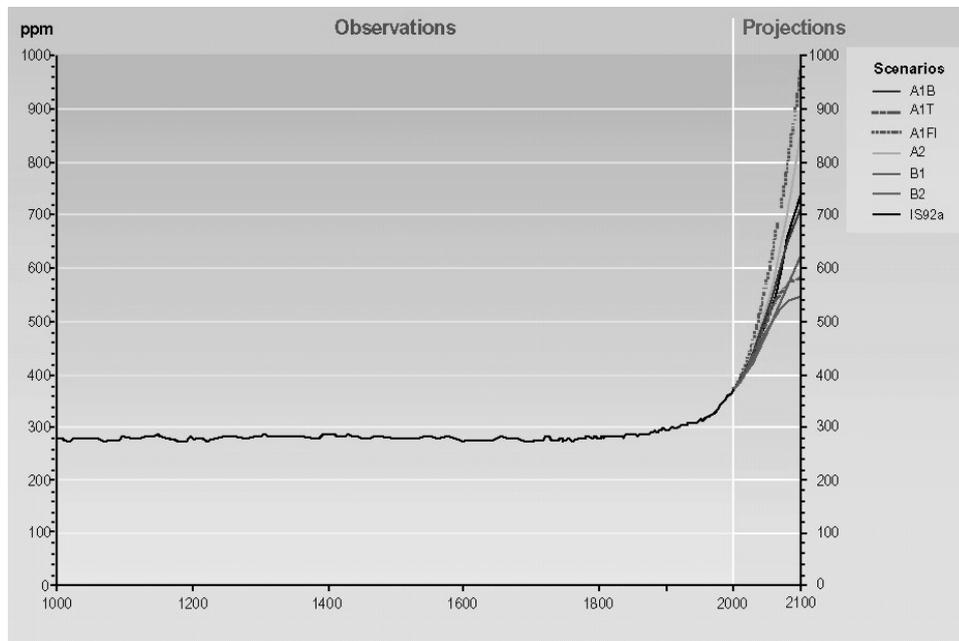
Institut für Agrarökologie, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL),  
Bundesallee 50, 38116 Braunschweig  
[hans.weigel@fal.de](mailto:hans.weigel@fal.de) ; <http://www.aoe.fal.de>

## **1 Hintergrund und Zielsetzung des Braunschweiger Kohlenstoffprojektes**

Mit den vorausgesagten Veränderungen mittlerer Klimawerte sowie den Änderungen in Häufigkeit, Dauer und Stärke von Klimaextremen (Frost-, Hitze- und Trockenperioden, Starkniederschläge, Hagel, Stürme, Hochwasser, Sturmfluten etc.) sind Risiken für landwirtschaftliche Kulturpflanzen bzw. Agrarökosysteme und die Agrarproduktion insgesamt verbunden. Neben den Änderungen physikalischer Klimaparameter (z.B. höhere Temperaturen, Verschiebungen von Niederschlagsverhältnissen) verändert sich gleichzeitig die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre (chemische Klimabedingungen). Nachweisbar haben die Konzentrationen zahlreicher Spurengase (Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub>; troposphärisches Ozon O<sub>3</sub>; Distickstoffmonoxid/Lachgas N<sub>2</sub>O; Stickstoffmonoxid und -dioxid, NO/NO<sub>2</sub>; Methan CH<sub>4</sub>; Fluorchlorkohlenwasserstoffe) in den letzten 100 Jahren deutlich zugenommen (Dämmgen and Weigel 1998). Diese Spurengase tragen (zusammen mit Wasserdampf) einerseits als „Treibhausgase“ zur Änderung des Klimas bei (Treibhauseffekt), andererseits sind Gase wie CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> und NO/NO<sub>2</sub> in die biogeochemischen Kreisläufe eingebunden und wirken direkt auf terrestrische Ökosysteme ein, indem sie unmittelbar mit Pflanzen und Böden interagieren (Luo and Mooney 1999; Amthor 2001; Fuhrer 2003). Agrarisch genutzte Flächen (Ackerland, Grünland) spielen dabei eine wichtige Rolle.

Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre, die zu den am sichersten vorhersagbaren und unausweichlichen Entwicklungen der vorausgesagten Klimaänderungen gehört. Während die globale CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre über > 100 000 Jahre hinweg bis etwa zum Ende des 19. Jahrhunderts bei ca. 280-290 ppm lag (Petit et al. 1999), steigt sie seitdem rasch an und beträgt gegenwärtig bereits ca. 375 ppm. Dieser Trend wird sich mit noch größerer Intensität als bisher fortsetzen. In nur 50 Jahren soll die CO<sub>2</sub>-Konzentration bereits bei ca. 450–500 ppm liegen (IPCC 2001) (Abb.1). Als Substrat der Photosynthese ist CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre für Wachstum und Entwicklung aller Pflanzen von fundamentaler Bedeutung. Da die heutige CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre für C<sub>3</sub>-Pflanzen suboptimal ist, führt eine

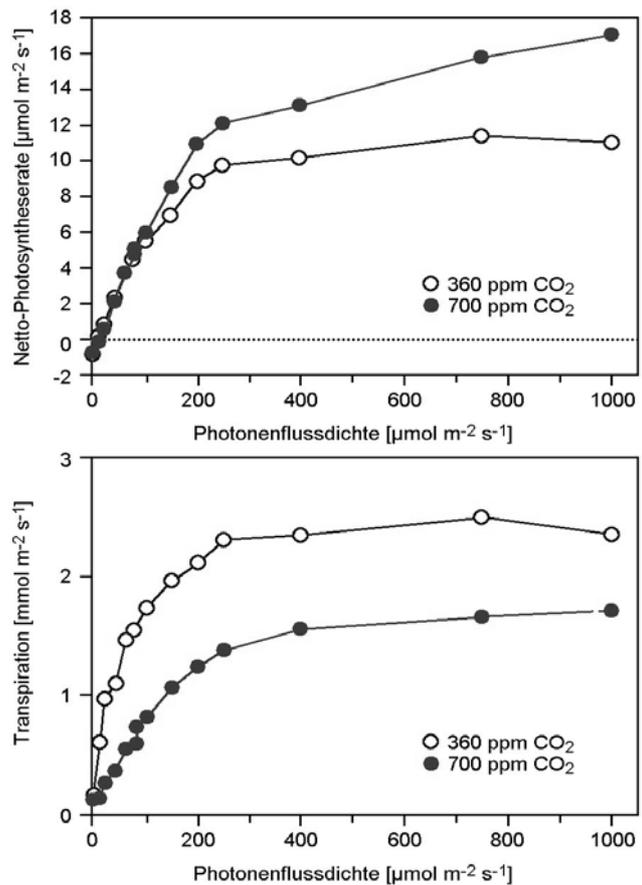
Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Regel zu einer Stimulation der Photosynthese. Gleichzeitig wird - zumindest bei krautigen Pflanzenarten bzw. Kulturpflanzen - die Blatttranspiration reduziert (Abb.2; vgl. Kap. 2). Welche ökologischen bzw. agronomischen Folgen sich aus dieser Reaktion von Einzelpflanzen auf eine CO<sub>2</sub>-Anreicherung ergeben, ist nach wie vor schwer abzuschätzen (Weigel 2005).



**Abb. 1**  
**Bisheriger und auf der Basis von unterschiedlichen Emissionsszenarien (A1B – IS92a) vorausgesagter Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration (ppm) in der Atmosphäre (nach IPCC 2001)**

Im Zuge der wissenschaftlichen Diskussion über Ursachen, Wirkungen und Bedeutung des raschen CO<sub>2</sub>-Anstieges in der Atmosphäre ist deutlich geworden, dass die Rolle von Agrarökosystemen im Kreislauf des Kohlenstoffs (C) noch nicht hinreichend verstanden wird (IPCC 2001). Dies gilt insbesondere im Hinblick auf den Austausch von CO<sub>2</sub> zwischen Landoberflächen und Atmosphäre. Gegenwärtig bestehen noch immer Kenntnisdefizite darüber, welche Pflanzen- und Boden-Prozesse diese CO<sub>2</sub>-Flüsse steuern (Rees et al. 2005) und welche Wechselwirkungen zwischen CO<sub>2</sub>-Flüssen und Flüssen anderer Elemente bestehen. Im Hinblick auf zukünftige Klimaverhältnisse muss darüber hinaus berücksichtigt werden, welche Rückkoppelungseffekte sich aus den steigenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre mit Wasser- und Stoffflüssen in Agrarökosystemen ergeben könnten (Buyanowski and Wagner 1998; Mosier 1998). Für Europa gilt dies in besonderem Maße für den Ackerbau, der mit ca. 23% der gesamten Landfläche eine bedeutende Landnutzungsform darstellt.

**Abb. 2**  
**Photosynthese (oben) und Transpiration (unten) eines Sommerweizenblattes in Abhängigkeit von der eingestrahnten Lichtintensität bei gegenwärtiger (360 ppm; offene Symbole) und erhöhter (700 ppm; geschlossene Symbole) CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre (Burkart, unveröffentlicht)**



Eine möglichst genaue Kenntnis der ökologischen Regelgrößen der für den C-Umsatz in Agrarökosystemen verantwortlichen Prozesse ist außerdem notwendig, um daraus verbesserte biologische und biogeochemische Prozessmodelle abzuleiten (Wenkel und Mirschel 1995), die wiederum Grundlage für höherskalige Modelle sind. Mit Prozessmodellen lassen sich z.B. kleinräumige Unterschiede in der Bewirtschaftung von Flächen und in den Bodeneigenschaften, interannuelle Klimaschwankungen sowie auch Einflüsse zukünftiger Klimaszenarien (z.B. erhöhter atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen) so abbilden, dass verlässlichere Informationen über großräumige Quellen- und Senkenstärken von Agrarökosystemen für CO<sub>2</sub> bzw. über mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft vorliegen. Zur Entwicklung, Verbesserung und Validierung derartiger Modelle bedarf es experimenteller Datensätze aus praxisnahen Versuchen mit besonderer zeitlicher und räumlicher Auflösung.

Vor dem Hintergrund dieser Fragestellungen ist in Braunschweig im Jahre 1999 ein mehrjähriger Feldversuch auf einem Ackerschlag etabliert worden, welcher der Untersuchung von ökosystemaren Stoff- und Energieflüssen unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen dient (Weigel and Dämmgen 2000). Im Rahmen dieses „Braunschweiger Kohlenstoff-Projektes“ werden unter identischen Klima-, Nutzungs- bzw. Managementbedingungen folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Kontinuierliche Messungen des Austausches von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O-Dampf (sowie weiterer Spurengase) zwischen Bestand und bodennaher Atmosphäre auf Schlagebene mittels mikrometeorologischer Verfahren.
- Diskontinuierliche Gasflussmessungen von Teil-Flüssen relevanter Spurengase (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, VOC) mittels Kammertechniken auf kleineren Skalen sowie Messungen sedimentierender atmosphärischer Stoffe mit verschiedenen Sammlern.
- Langzeit-CO<sub>2</sub>-Anreicherungsversuche in realen Fruchtfolgen unter Verwendung einer kammerlosen CO<sub>2</sub>-Expositionstechnik (Free Air Carbon Dioxide Enrichment: FACE).

Gesamtziel des „Braunschweiger Kohlenstoff-Projektes“ ist es insbesondere, Prozesse des C – Umsatzes im System Atmosphäre-Bestand-Boden in Fruchtfolgen des Ackerbaus unter heutigen und zukünftigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zu untersuchen. Damit sollen konsistente Datensätze zur Validierung bzw. Entwicklung von Pflanzenwachstums-, Boden- bzw. Agrarökosystemmodellen bereitgestellt werden. Die Möglichkeiten zur Bewertung der Folgen von Klimaänderungen für Agrarökosysteme sollen so weiter verbessert werden.

Der vorliegende Beitrag beschränkt sich auf den Aspekt der Klimaänderung und stellt den Versuchsansatz zur Simulation zukünftiger atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (FACE) sowie einige vorläufige Ergebnisbeispiele vor.

## **2 Wirkungen erhöhter atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf Agrar- ökosysteme: offene Fragen und Ziel des Braunschweiger FACE-Versuches**

Nach wie vor gibt es zahlreiche offene Fragen darüber, welche Folgen sich aus der oben genannten primären Wirkung erhöhter atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf die Einzelpflanze (Abb. 2) für die Funktionen und Leistungen von Ökosystemen ableiten (Weigel 2005). Einige für den vorliegenden Zusammenhang wesentliche Folgen sollen hier angesprochen werden.

In zahlreichen Versuchen ist festgestellt worden, dass aus der meist deutlichen Photosynthesestimulation eine Förderung des Pflanzenwachstums bzw. der Biomassebildung resultiert, deren Höhe allerdings stark von der sonstigen Ressourcenverfügbarkeit abhängt. Dieser „CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt“ ist von erheblicher Bedeutung im Hinblick auf die Folgen des Klimawandels für die Nettoprimärproduktion terrestrischer Ökosysteme und damit auch für die Produktionsleistung von Agrarökosystemen. Viele der bisher durchgeführten CO<sub>2</sub>-Anreicherungsversuche haben insbesondere bei Kulturpflanzen z.T. erhebliche Wachstums- bzw. Ertragssteigerungen ermittelt (Rosenzweig and Hillel 1998, Bender et al. 1999, Reddy and Hodges 2000, Amthor 2001). Die Mehrzahl dieser Versuche fand allerdings unter Bedingungen statt (z.B. Kammerversuche mit Topfkulturen; optimierte Wasser- und Nährstoffversorgung), die wenig relevant für tatsächliche landwirtschaftliche Anbauverhältnisse sind.

Die Höhe des positiven CO<sub>2</sub>-Effektes spielt für die Vorhersage von Folgen der Klimaänderungen (Temperatur; Niederschlag) für die globalen und regionalen Ernteerträge insofern eine wichtige Rolle, als die Berücksichtigung der physiologischen CO<sub>2</sub>-Wirkung in entsprechenden Prognosemodellen die Richtung und das Ausmaß der vorhergesagten Ertragsänderungen erheblich beeinflussen kann (Rosenzweig and Hillel 1998). Der „CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt“ sollte daher so realitätsnah wie möglich abgeschätzt werden (Parry et al. 2004). Der für diese Fragestellungen am besten geeignete Versuchsansatz stellt die Freiland-CO<sub>2</sub>-Anreicherung (Free Air Carbon Dioxide Enrichment, FACE) dar.

Inwieweit der auf der Einzelblattebene festgestellte Effekt einer Reduktion der stomatären Transpiration für Wasserdampf auf der Bestandesebene wirksam ist, wo zahlreiche bestandesinterne Wechselwirkungen (Koppelung mit der Atmosphäre, gegenseitige Beschattung, CO<sub>2</sub>-bedingte Zunahme des Blattflächenindex) die Wasserflüsse in die Atmosphäre (Evapotranspiration) beeinflussen, ist Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion (Morrison 1998, Polley 2002). Die Frage nach der Rückkoppelung zwischen physiologischer CO<sub>2</sub>-Wirkung und pflanzlichem Wasserhaushalt ist ebenfalls von Bedeutung für die Simulation zukünftiger Klimaszenarien. Es ist noch offen, welche Rückwirkungen sich aus der durch den CO<sub>2</sub>-Anstieg verminderten pflanzlichen Wasserabgabe auf den Stoff- und Energieaustausch zwischen Atmosphäre und Biosphäre bzw. auf den Wasserhaushalt von Vegetationseinheiten und Landschaften ergeben könnten, wenn man den auf der Ebene von Einzelblättern festgestellten Befund auf höhere Skalen (Bestand, Schlag, Gebiet) übertragen würde. Die „anti-transpirative“ Wirkung erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf der Bestandesebene könnte sich z.B. langfristig auf den Bodenwasserhaushalt auswirken (Volk et al. 2000; Morgan et al. 2004). Änderungen der Bodenfeuchte wirken sich wiederum auf bodenbiologische Prozesse bzw. die Stoffumsetzungen im Boden aus (s.u.). Auch die Klärung dieser Fragen erfordert - neben der Weiterentwicklung entsprechender Modelle - CO<sub>2</sub>-Anreicherungsexperimente unter Freilandbedingungen.

Prozesse und Poolgrößen im Boden werden durch veränderte atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nicht direkt beeinflusst, sondern reagieren auf Veränderungen in der jeweiligen Vegetation, die durch eine CO<sub>2</sub>-Anreicherung ausgelöst werden. Die durch Pflanzen vermittelten CO<sub>2</sub>-Effekte auf den Boden basieren hauptsächlich auf einem vermehrten Anfall oberirdischer Biomasse (s.o.), einer Stimulation des Wurzelwachstums, einer verstärkten Wurzelexudation bzw. Rhizodeposition, einer veränderten chemischen Zusammensetzung (z.B. erweitertes C-/N-Verhältnis) der anfallenden pflanzlichen Biomasse sowie auf einer (möglichen) Zunahme der Bodenfeuchte (s.o.)

Daraus wiederum resultieren vielfältige Wirkungsketten, die die Zoozönosen des Bodens in ihrer Struktur und Funktion und damit den C- bzw. den Stoffumsatz im Boden insgesamt betreffen (Rogers et al. 1997; Körner 2000; Zak et al. 2000; Norby et al. 2001). Eine durch hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen beeinflusste Wurzelexudation (Rouhier et al. 1996; Hodge et al. 1998) kann die Leistungen und die Zusammensetzung mikrobieller Lebensgemeinschaften

in der Rhizosphäre und im Gesamtboden verändern, was weitergehende Folgen für die daran anschließenden Nahrungsnetze der Bodenfauna haben kann. Verbunden mit diesen Reaktionen sind Änderungen in der Bodenatmung, d.h. der Freisetzung von CO<sub>2</sub> aus dem Boden in die Atmosphäre.

Zurzeit ist nicht schlüssig zu beantworten, welche Folgen aus diesen Reaktionen für den C-Umsatz bzw. die C-Speicherung und die sonstigen Stoffumsetzungen in terrestrischen Ökosystemen insgesamt abzuleiten sind. Denkbar ist z.B. einerseits eine Beschleunigung des C-Umsatzes im Boden durch den atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Anstieg, die auf einer Stimulation der Aktivität von Bodenorganismen (insbesondere Bodenmikroorganismen) beruht. Andererseits kann durch das erweiterte C/N-Verhältnis der anfallenden Pflanzenreste unter erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen eine Verzögerung des Streuabbaus bzw. der C-Mineralisierung eintreten, die zumindest vorübergehend zu einer C-Speicherung führt. Auf die Vielzahl der zu beiden Hypothesen existierenden Einzelergebnisse kann hier nicht eingegangen werden (Körner 2000). Informationen aus ackerbaulich genutzten Flächen liegen dazu nicht vor.

Je weiter sich die Fragen nach den direkten Wirkungen eines CO<sub>2</sub> Anstieges auf die Biosphäre von den mehr oder weniger gut bekannten Phänomenen auf der Einzelblattebene auf die mögliche Bedeutung für die Ökosystemebene hin bewegen, um so unschärfer werden die Antworten. Auf den höheren Systemebenen werden nicht nur die Einflüsse anderer Faktoren als die der CO<sub>2</sub>-Konzentration zahlreicher, sondern auch die unterschiedlichen Rückkoppelungseffekte nehmen an Bedeutung zu. Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, dass zur Beantwortung dieser Fragen experimentelle Versuchsansätze zur CO<sub>2</sub>-Anreicherung auf Ökosystemebene, bei denen die Koppelung zwischen Atmosphäre und Vegetation einerseits und zwischen Vegetation und Boden andererseits so naturnah wie möglich belassen werden, unverzichtbare Beiträge liefern. CO<sub>2</sub>-Anreicherungsversuche im Feld nach dem FACE-Prinzip erfüllen diese Bedingungen weitgehend. Daraus leiten sich die speziellen Ziele des Braunschweiger FACE-Versuches ab:

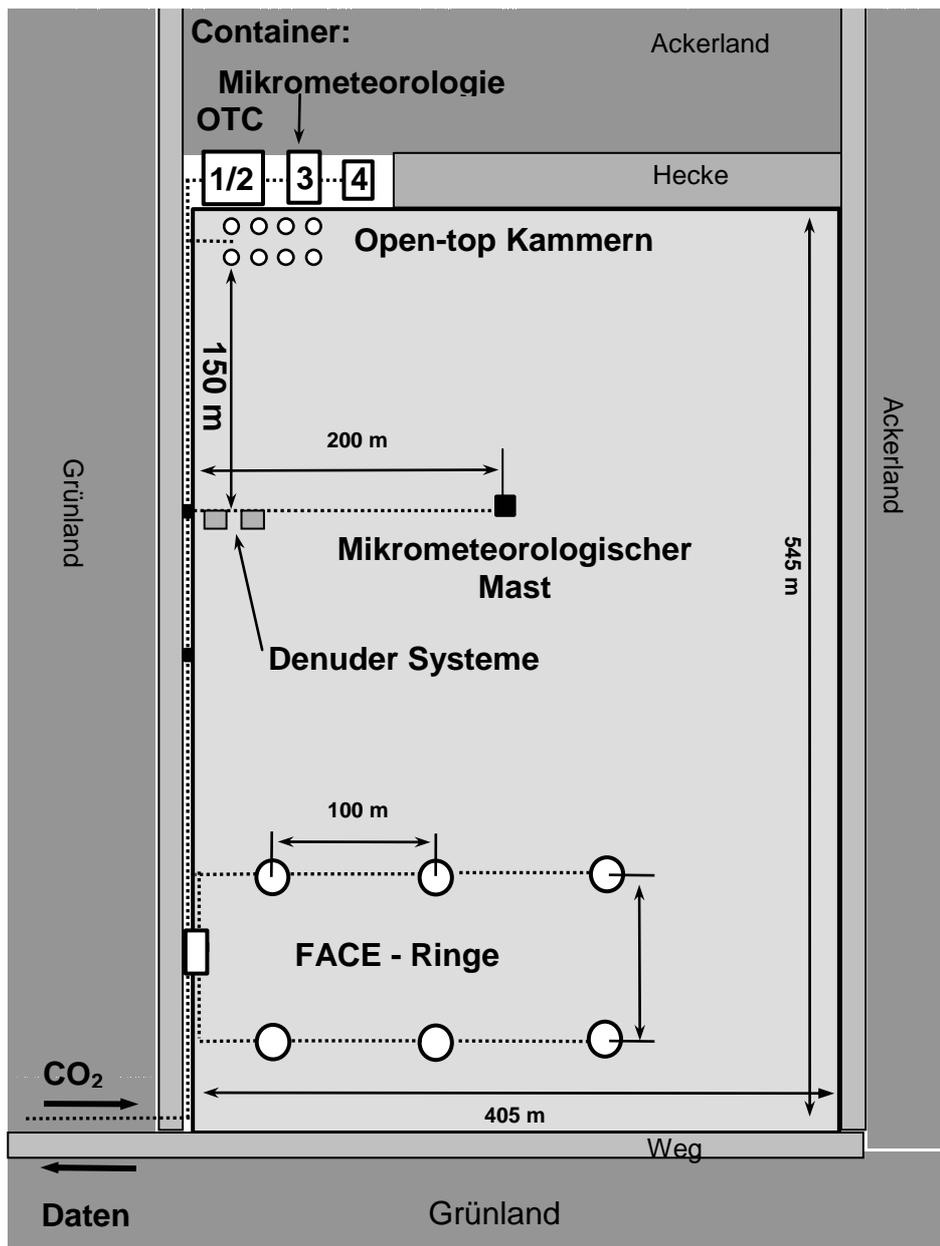
- Hypothesen zum Wachstumsverhalten relevanter Kulturpflanzen auf eine CO<sub>2</sub>-Anreicherung, die aus Kammerversuchen stammen, zu überprüfen,
- die Reaktionen bisher kaum untersuchter und agronomisch relevanter Arten mit einzubeziehen,
- Interaktionen mit dem Management (z.B. der N-Versorgung) zu ermitteln,
- mögliche Konsequenzen für Systemeigenschaften (z.B. Wasser-, Stoff-, Energieflüsse, Biodiversität) zu bewerten und dabei gleichzeitig
- die größtmögliche Praxisrelevanz einzuhalten.

### **3 Versuchsdesign und Methoden**

#### ***Messfeldcharakteristik und landwirtschaftliches Management***

Das für die CO<sub>2</sub>-Anreicherungsversuche und die Stoffflussmessungen eingerichtete Messfeld liegt auf dem Gelände der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) in

Braunschweig (Abb.3). Es handelt sich um einen 24 ha umfassenden Ackerschlag, der die für mikrometeorologische Messungen und für den Freiland-CO<sub>2</sub>-Anreicherungs-Versuch (FACE) notwendigen Anforderungen an Größe, Homogenität und freie Anströmbarkeit (fetch) sehr gut erfüllt. Das Klima am Versuchsstandort ist charakterisiert durch mittlere Jahrestemperaturen von 8.8°C, eine mittlere Juli-Temperatur von 17 °C, eine Niederschlagsmenge von 618 mm a<sup>-1</sup> (ca. 50% davon fallen im Zeitraum Mai - September), eine Sonnenscheindauer von 1514 h a<sup>-1</sup> und einer Globalstrahlung von ca. 350 kJ cm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>.



**Abb. 3**  
Schematische Darstellung des Messfeldes in Braunschweig mit Ausrüstungen zum Fluss-Monitoring und zur Freiland-CO<sub>2</sub>-Anreicherung (FACE)

Im Rahmen einer ortsüblichen dreigliedrigen Fruchtfolge aus Wintergerste (1999/2000 und 2002/2003) > Zwischenfrucht Weidelgras (2000/2003) > Zuckerrübe (2001/2004) > Winterweizen (2001/2002 und 2004/2005) wird der Versuchsschlag vom landwirtschaftlichen Versuchsbetrieb der FAL (185 ha Gemischtfutterbaubetrieb) nach gängiger landwirtschaftlicher Praxis im Hinblick auf Bodenbearbeitung, Düngung und Pflanzenschutz bewirtschaftet (vgl. Tab.1). Der Bodentyp ist ein sandiger Lehm (Luvisol; pH 6,5;  $C_{org}$  0,85% - 1,8%; Bodenzahl 48). Zur Vermeidung von Wechselwirkungen zwischen Wasserversorgung und  $CO_2$ -Anreicherung werden die Versuchsflächen beregnet (entspricht der ortsüblichen Praxis bei Trockenheit), sofern die nutzbare Feldkapazität einen Wert von 50% unterschreitet. Die Dauer des FACE-Versuches ist zunächst auf zwei Fruchtfolgedurchgänge, d.h. insgesamt 6 Jahre, festgelegt.



**Abb. 4**  
**Aufsicht auf einen  $CO_2$ -Begasungsring des Freiland- $CO_2$ -Anreicherungsversuches (FACE) in einem Winterweizenfeld im Rahmen des Braunschweiger Kohlenstoffprojektes. Innerhalb des Ringes (20 m Durchmesser) ist die  $CO_2$ -Konzentration der bodennahen Luft während der Tageslichtstunden auf 550 ppm erhöht. Beschattungsversuche dienen der Aufklärung von Wechselwirkungen zwischen Strahlung und  $CO_2$ -Effekt. Mit Hilfe von Bestandesgaswechsellammern werden  $CO_2$ - und  $H_2O$ -Flüsse zwischen Bestand und Atmosphäre untersucht.**

#### ***Freiland $CO_2$ -Anreicherung (FACE)***

Es wird eine vom Brookhaven National Laboratory (New York/USA) entwickelte Freiland- $CO_2$ -Anreicherungsanlage (Free Air Carbon Dioxide Enrichment = FACE) eingesetzt (Hendrey 1992; Weigel und Dämmgen 2000). Das System besteht aus 32 ringförmig angeordneten „Begasungsröhren“, die jeweils eine Fläche von ca. 310 m<sup>2</sup> umschließen (Abb.4). Auf dieser Fläche wird die Konzentration des  $CO_2$  in der Atmosphäre während der Tageslichtstunden auf 550 ppm erhöht. Es werden zwei „Begasungsringe“ (d.h. ca. 620 m<sup>2</sup>

Fläche) mit CO<sub>2</sub> angereichert, zwei Ringe dienen als Kontrolle und werden mit Umgebungsluft versorgt (ca. 375 ppm CO<sub>2</sub>). Bei Umgebungstemperaturen < 5°C und bei Windgeschwindigkeiten > 6.5 m s<sup>-1</sup> wird die CO<sub>2</sub>-Anreicherung unterbrochen. Das für die CO<sub>2</sub>-Anreicherung eingesetzte CO<sub>2</sub> unterscheidet sich in seiner Zusammensetzung mit den C-Isotopen <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C von dem der Umgebungsluft und dient damit als „Tracer“ zur Untersuchung des C-Umsatzes im System Atmosphäre-Pflanze-Boden. Zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Kohlenstoff- und Stickstoffflüssen bzw. zwischen CO<sub>2</sub>-Anreicherung und N-Versorgung ist die N-Versorgung der jeweiligen Fruchtfolgeglieder in jeder Ringhälfte um 50% (N-50) gegenüber der fruchtartspezifischen Volldüngung (N-100) reduziert. Tabelle 1 gibt Auskunft über wichtige Kenndaten der Versuchsdurchführung während der ersten Fruchtfolge.

**Tabelle 1**  
**Fruchtfolgeglieder, CO<sub>2</sub>-Behandlung und landwirtschaftliches Management während des 1. Fruchtfolgedurchganges (1999-2002) im Rahmen des Braunschweiger FACE-Projektes**

<b>Management-Maßnahme</b>	<b>Einheit</b>	<b>Wintergerste „Theresa“</b>	<b>Weidelgras- mischung „Lippstädter Futtertrio“</b>	<b>Zuckerrübe „Wiebke“</b>	<b>Winter- weizen „Batis“</b>
<b>Aussaat</b>	Datum	23. 9. 1999	26.7.2000	11.4.2001	6.11.2001
<b>Saat-Dichte</b>	Körner m <sup>-2</sup>	280	40 kg ha <sup>-1</sup>	11	360
<b>Beginn der CO<sub>2</sub>-Begasung</b>	Datum	4.10.1999	5.8.2000	14.5.2001	22.1.2002
<b>N-Düngung Gesamtmenge 100% / 50%</b>	(Zahl) kg ha <sup>-1</sup>	(4) 264 / 105	(1) 197 / 99	(2) 126 / 63	(3) 181 / 91
<b>Beregnung</b>	Zahl / mm	3 / 69	2 / 44	5 / 107	3 / 60
<b>CO<sub>2</sub>-Begasung</b>	Tage	260	70	138	183
<b>mittlere CO<sub>2</sub> Konzentration (normal/erhöht)</b>	ppm	373 / 549	373 / 550	371 / 550	377 / 548
<b>Endernte</b>	Datum	22.6.2000	12.10.2000	24.9.2001	31.7.2002

### **Untersuchungsmethoden**

Eine detaillierte Beschreibung der Messungen von Konzentrationen und vertikalen Flüssen von Luftinhaltsstoffen sowie von weiteren abiotischen Parametern, die auf dem Messfeld außerhalb der FACE-Ringe durchgeführt werden, findet sich bei Weigel and Dämmgen (2000). Zur Charakterisierung des Wasser- und Energiehaushaltes der Flächen unter CO<sub>2</sub>-

Anreicherung werden folgende weiteren Variablen mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung gemessen: relative Luftfeuchte, Evaporation, Bodenwassergehalt (gravimetrisch und mit TDR-Sonden), Globalstrahlung, Photosynthetisch Aktive Strahlung (PAR), Anteil reflektierter Strahlung (Albedo), Lufttemperatur, Bestandestemperatur Bodentemperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung. Zur Untersuchung des Einflusses erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf die Flüsse von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O-Dampf zwischen Bestand und Atmosphäre werden offene CO<sub>2</sub>-/H<sub>2</sub>O-Bestandesgaswechselkammern (0,8 m<sup>3</sup>) innerhalb der FACE-Ringe eingesetzt (Burkart et al. 2000; vgl. Abb. 4). Messungen des CO<sub>2</sub>-Efflux aus dem Boden (*in situ* Bodenatmung) werden mit Hilfe einer Bodenrespirationskammer (LiCOR 6400-9) durchgeführt (Soe et al. 2004).

Die pflanzenphysiologischen, agronomischen und bodenökologischen Messungen zur Bewertung des Einflusses des erhöhten CO<sub>2</sub>-Angebotes umfassen u.a.: Blattflächenindex, Bestandeshöhe, Ertrag und Ertragskomponenten, oberirdische Biomasseentwicklung, Bestandesphänologie, Chlorophyll-Gehalt, Gehalt an löslichen Kohlenhydraten in den Blättern sowie die Wurzelbiomasseentwicklung. Folgende Bodenuntersuchungen werden an Bodenproben (0-30 cm Tiefe) durchgeführt: organischer C-Gehalt im Boden (C<sub>org</sub>), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Konzentration in der Bodenlösung, mikrobielle Biomasse im Boden (Anderson and Domsch 1978; Heinemeyer et al. 1989), Pilz-/Bakterien-Verhältnis der mikrobiellen Biomasse (Anderson and Domsch 1975), Abundanzen von Enchytraeiden (Graefe 1984) und Collembolen (MacFadyen 1961). Die <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C-Zusammensetzung ausgewählter Pflanzen-, Boden-, Tier- und Spurengasproben wird massenspektrometrisch untersucht (Soe et al. 2004; Giesemann 2005).

#### **4 Ergebnisbeispiele**

Im Braunschweiger FACE-Experiment war u.a. von Interesse, ob und inwieweit die in Kap. 1 angedeuteten Primäreffekte erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf das Pflanzenwachstum weitergehende Konsequenzen auf der agrarökosystemaren Ebene haben. Mögliche Struktur- und Prozesselemente, an denen diese weitergehenden Wirkungen deutlich werden könnten, sind in Abb.5 vereinfacht dargestellt. Nachfolgend werden dazu einige Ergebnisbeispiele gezeigt, die im Verlauf der ersten Fruchtfolge erzielt wurden und die daher als vorläufig zu betrachten sind. Beschrieben werden vorwiegend die Haupteffekte der CO<sub>2</sub>-Anreicherung, Interaktionen mit der Stickstoffversorgung werden nicht angesprochen.

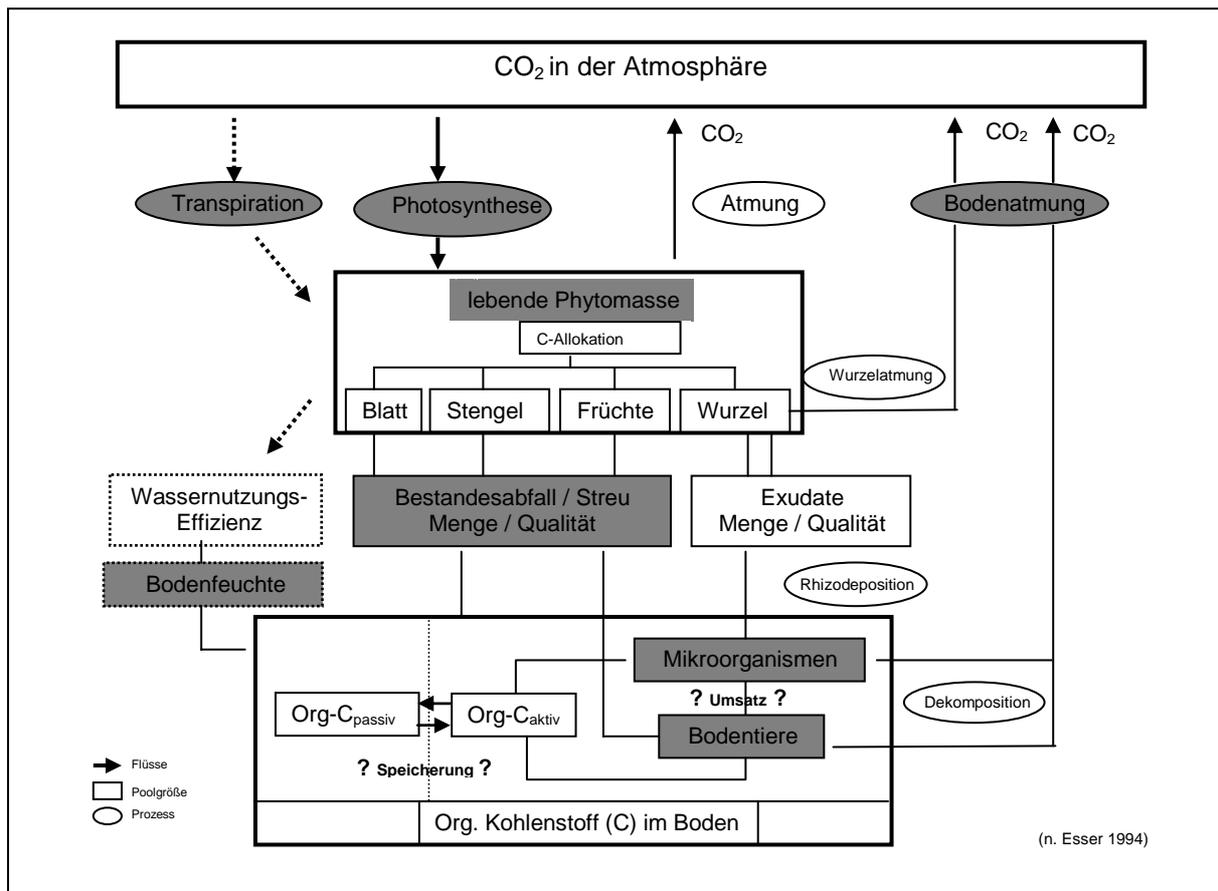


Abb. 5

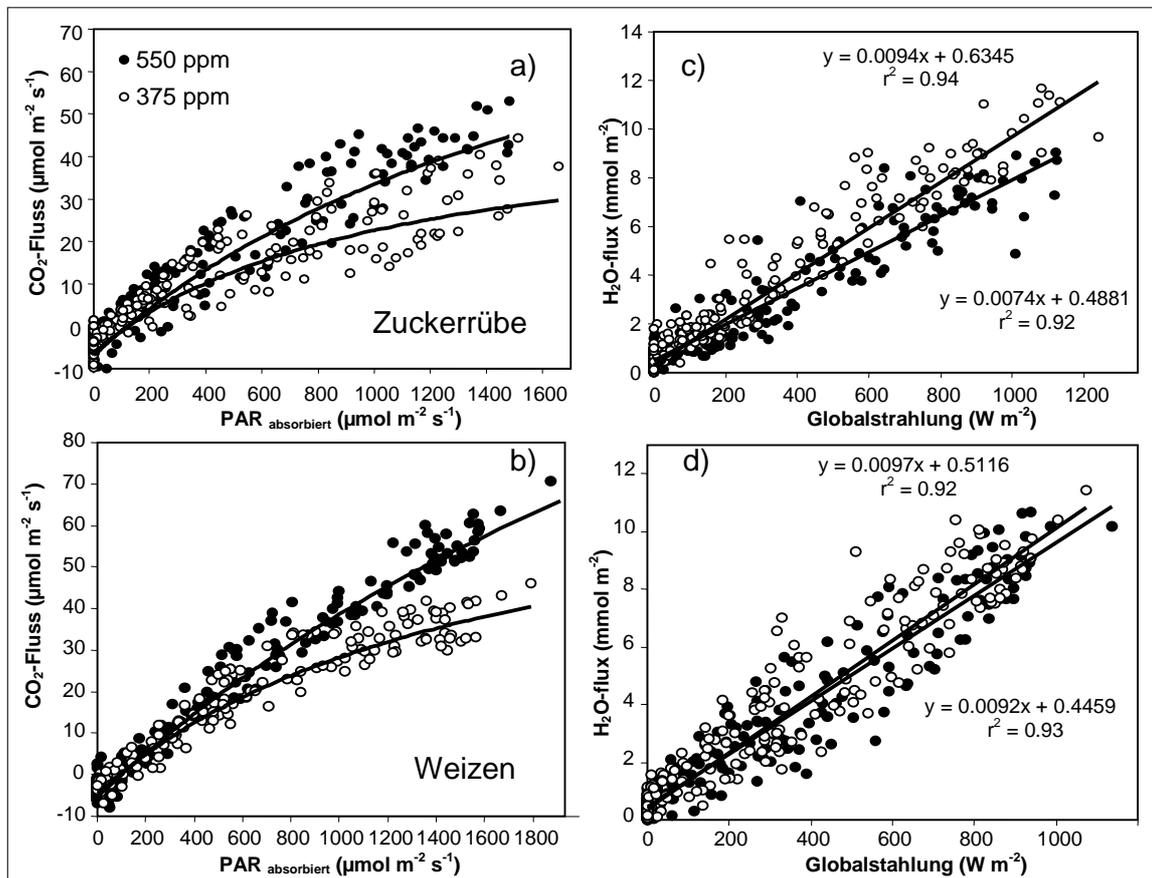
Schematische Darstellung des Umsatzes von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre im System Pflanze-Boden eines Agrarökosystems. Die grau unterlegten Elemente kennzeichnen Prozesse bzw. Strukturen und Pool-Größen, die im Rahmen des Braunschweiger FACE-Versuches untersucht wurden, um mögliche Effekte der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Anreicherung zu charakterisieren. Dargestellt ist auch die Beeinflussung der Transpiration durch erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, über die wiederum die Bodenfeuchte beeinflusst werden kann.

### Bestandesphotosynthese (CO<sub>2</sub>-Flüsse)

Messungen von CO<sub>2</sub>-Flüssen auf der Bestandesebene sind für die Bewertung der Folgen von Klimaänderungen für die Produktivität und Ökosystemfunktion relevanter als entsprechende Einzelblattuntersuchungen. Derartige Flussmessungen liefern erste Informationen über Veränderungen der CO<sub>2</sub>-Aufnahme in das System Pflanze-Boden. CO<sub>2</sub>-Bestandesflussmessungen im Feld unter CO<sub>2</sub>-Anreicherungs-szenarien der Atmosphäre liegen für Agrarökosysteme bisher kaum vor (Brooks et al. 2001)

Im Braunschweiger FACE-Versuch wurden die Bestandes-CO<sub>2</sub>-Nettoflüsse während der Tageslichtstunden gemessen und als Bestandesphotosyntheseraten interpretiert (Burkart et al. 2000). Abb. 6 a,b zeigt am Beispiel von Zuckerrübe und Winterweizen die Auswirkung der erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration auf die Bestandesphotosyntheserate (Bestandesnetto-CO<sub>2</sub>-Fluss). Es wird deutlich, dass insbesondere zu Zeiten hoher Strahlungsintensitäten bei CO<sub>2</sub>-Anreicherung der Atmosphäre erheblich mehr CO<sub>2</sub> durch den Bestand fixiert wird. Gemittelt über mehrere Messkampagnen pro Vegetationsperiode (Blattflächenindex > 2; nur Stufe N-100) ergab sich, dass die CO<sub>2</sub>-Anreicherung die Bestandesphotosynthese der

Fruchtfolgeglieder Gerste, Zuckerrübe und Weizen um ca. 18%, 45% bzw. 37% gegenüber der Umgebungsluft stimulierte (Daten nicht gezeigt). Damit wird deutlich, dass das zusätzlich angebotene CO<sub>2</sub> assimiliert wurde bzw. dass erheblich mehr C in die Bestände eingebaut wurde.



**Abb.6**  
Bestandesphotosyntheserate (Bestandesnetto-CO<sub>2</sub>-Fluss;a,b) und Bestandes-H<sub>2</sub>O-Fluss (Evapotranspiration; c,d) als Funktion der Strahlungsintensität ermittelt in einem Zuckerrüben- und Weizenbestand mit CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Gaswechselkammern bei 375 ppm und 550 ppm CO<sub>2</sub> in FACE-Ringen. Gezeigt sind 10 min Mittelwerte, die im Laufe einer Woche im August (Zuckerrübe) bzw. Mai (Weizen) gemessen wurden.

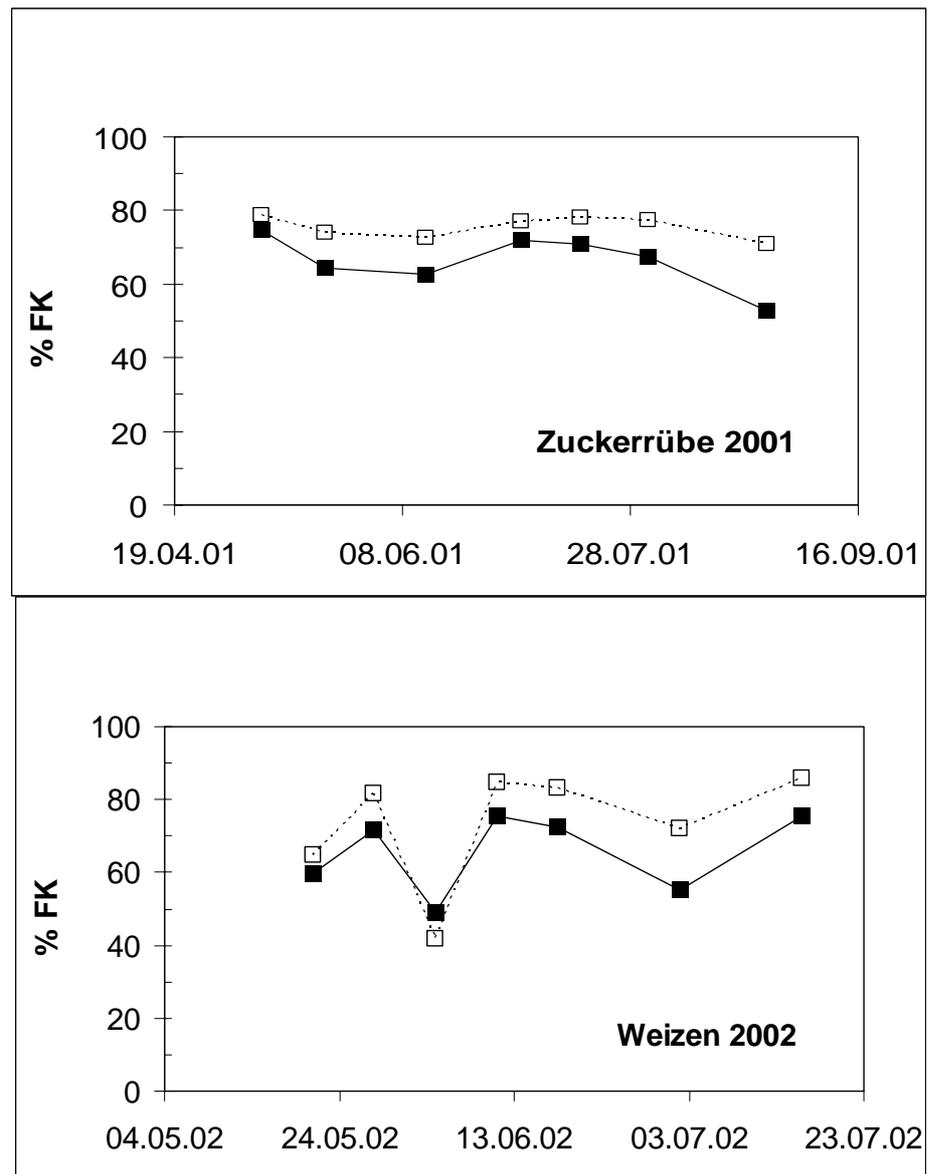
### Evapotranspiration (H<sub>2</sub>O-Flüsse) und Bodenfeuchte

Bisherige Messungen von Bestandes-H<sub>2</sub>O-Flüssen (Evapotranspiration) unter CO<sub>2</sub>-Anreicherung in verschiedenen Ökosystemen mit unterschiedlichen Methoden ergaben kein einheitliches Bild; es wurden sowohl verminderte, unveränderte als auch - in Einzelfällen - erhöhte Evapotranspirationsraten ermittelt. Abb. 6 c,d zeigt als Beispiel einer kürzen Messperiode die mit der gleichen Versuchstechnik wie die CO<sub>2</sub>-Flüsse gemessenen H<sub>2</sub>O-Flüsse auf der Bestandesebene (= Evapotranspiration) in Abhängigkeit von der Einstrahlung. Eine verminderte Evapotranspiration unter CO<sub>2</sub>-Anreicherung ist insbesondere bei der Zuckerrübe erkennbar. Die mittlere tägliche Evapotranspiration unter CO<sub>2</sub>-Anreicherung lag im Vergleich zur Kontrolle generell niedriger, die Höhe des Effektes variierte jedoch zwischen Gerste (-7,5%), Zuckerrübe (-19,8%) und Weizen (-2,6%) (Daten nicht gezeigt).

Vergleichbare Ergebnisse für Gerste und Zuckerrüben liegen in der Literatur bisher nicht vor. In einem FACE-Experiment mit Weizen in Maricopa/Arizona wurde eine Minderung der Evapotranspiration durch erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (550 ppm) von ca. - 4,5% bis - 11,5%, d.h. in einer ähnlichen Größenordnung wie im vorliegenden Fall, ermittelt (Kimball et al. 1995). Offensichtlich ist aus den Ergebnissen des Braunschweiger FACE-Versuches, dass die Bestände in den unterschiedlichen Versuchsjahren weniger Wasser an die Atmosphäre abgegeben haben.

**Abb. 7**

**Verlauf der nutzbaren Feldkapazität (%) in 0-30 cm Bodentiefe von Zuckerrübe und Winterweizen ermittelt in Fruchtfolgeversuchen unter Freiland-CO<sub>2</sub>-Anreicherung (offene Symbole = 550 ppm CO<sub>2</sub>; gefüllte Symbole = 380 ppm CO<sub>2</sub>). Die Feldkapazität wurde gravimetrisch ermittelt (nach Löpmeier, DWD)**



Die über die Wirkung der erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen verminderten Wasserflüsse in die Atmosphäre resultierten bei Zuckerrübe und Weizen in einer gegenüber der Kontrollbehandlung erhöhten Bodenfeuchte (Abb.7). Dieser über die physiologische Wirkung auf die Stomataöffnung der Blätter vermittelte Effekt entwickelte sich im Laufe der Bestandesentwicklung mit zunehmendem Blattflächenindex. Vergleichbare Resultate wurden sowohl über gravimetrische Messungen als auch durch den Einsatz von TDR-Sonden zur

Messung der Bodenfeuchte erzielt. Für Zuckerrüben und Weizen lag die unter den erhöhten CO<sub>2</sub>-Atmosphäre gemessene nutzbare Feldkapazität im Vegetationsdurchschnitt der Jahre 2001 und 2002 um ca. 11% bzw. 8% höher als in den Kontrollen (Daten nicht gezeigt). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass unter erhöhten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen mehr Bodenwasser zur Verfügung stehen könnte.

### *Oberirdisches Wachstum und Qualität der Biomasse*

Möglicherweise resultierend aus der durch erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen stimulierten Bestandesphotosyntheserate und einer positiven Wirkung auf die Bodenfeuchte konnte bei allen untersuchten Fruchtfolgliedern am Ende der Vegetationsperiode eine signifikante Stimulation des oberirdischen Biomassewachstums nachgewiesen werden (Tab. 2).

**Tabelle 2**

**Oberirdische Gesamtbiomasseproduktion (g m<sup>-2</sup>) der Fruchtfolgliedern im Rahmen des Braunschweiger FACE-Projektes. Die Bestände wurden während der gesamten Vegetationszeit der erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration ausgesetzt. Gezeigt sind die Daten der Endernten (Behandlungsmittelwerte ± Standardabweichung). N50/N100 = reduzierte/ ortsübliche Stickstoff-Düngung (vgl. Table 1);**

\* Signifikanz: P < 0.05

N	CO <sub>2</sub>	Fruchtart			
		Wintergerste	Weidelgras	Zuckerrübe	Winterweizen
		g m <sup>-2</sup>			
<b>N50</b>	<b>380 ppm</b>	1360 ± 44	484 ± 19	1919 ± 44	1163 ± 33
<b>N50</b>	<b>550 ppm</b>	1546 ± 26	531 ± 24	2036 ± 29	1292 ± 37
<b>Relativer CO<sub>2</sub> Effekt (%)</b>		+13.7 *	+ 9.6	+ 6.1	+ 11.1 *
<b>N100</b>	<b>380 ppm</b>	1679 ± 19	484 ± 16	2295 ± 42	1272 ± 27
<b>N100</b>	<b>550 ppm</b>	1815 ± 3	543 ± 27	2481 ± 23	1456 ± 43
<b>Relativer CO<sub>2</sub> Effekt (%)</b>		+ 8.1 *	+ 12.1	+ 8.1 *	+ 14.4 *

Diese Wachstumsstimulation lag zwischen ca. 6% (Zuckerrübe) und ca. 14% (Weizen). Während bei Wintergerste die relative Wachstumsstimulation unter limitierter N-Versorgung größer war als bei ortsüblicher N-Düngung, war dies bei den anderen beiden Fruchtfolgliedern umgekehrt. Die Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-bedingten Wachstumsstimulation lassen sich gegenwärtig nur eingeschränkt interpretieren, da noch offen bleiben muss, ob die Unterschiede in der Reaktion der einzelnen Fruchtarten auf Unterschieden zwischen den Arten selbst oder auf den unterschiedlichen Klimabedingungen der einzelnen Versuchsjahre basieren. In den wenigen bisher mit Ackerkulturen (Reis, Weizen, Futtergras) durchgeführten FACE-Versuchen wurde im Durchschnitt über alle Versuche und unter optimaler Ressourcenverfügbarkeit eine Wachstumsförderung von ca. 11% ermittelt (Kimball et al.

2002). Dies entspricht etwa der im vorliegenden Fall ermittelten Größenordnung, wenn die Ergebnisse über alle Fruchtarten gemittelt werden. Es wird damit deutlich, dass unter dem veränderten CO<sub>2</sub>-Szenario mehr Phytomasse gebildet wurde, wobei die Größenordnung des „CO<sub>2</sub>-Düngeeffektes“ deutlich geringer war, als die der Stimulation der Bestandesphotosynthese.

In den meisten bisherigen CO<sub>2</sub>-Anreicherungsversuchen ist beobachtet worden, dass die chemische Zusammensetzung der untersuchten vegetativen und generativen Pflanzenteile sich verändert (Idso and Idso, 2001). Ein besonders deutliches Beispiel dafür ist die Abnahme der Stickstoffkonzentration in Blättern, Nadeln und Samen bzw. Früchten (Cotruffo et al., 1998; Weigel and Manderscheid 2005). Wie Tab. 3 am Beispiel der Gerste zeigt, wurde dies auch im Braunschweiger FACE-Versuch beobachtet. Die N-Konzentration des Gerstenstrohs nahm unter erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen bei ortsüblicher N-Düngung um ca. 19% und unter reduzierter N-Düngung um ca. 4% ab. Ähnliche Wirkungen der CO<sub>2</sub>-Anreicherung wurden auch bei den anderen Fruchtarten gefunden (Daten nicht gezeigt). Das Beispiel demonstriert, dass Pflanzenreste mit einem möglicherweise größeren C-/N-Verhältnis in den Boden gelangten. Die im vorliegenden FACE-Versuch ermittelte Veränderung der N-Konzentration liegt in der gleichen Größenordnung, die auch in anderen FACE-Versuchen mit Gräsern des C<sub>3</sub>-Typs bei ausreichender N-Versorgung ermittelt wurde (Kimball et al. 2002).

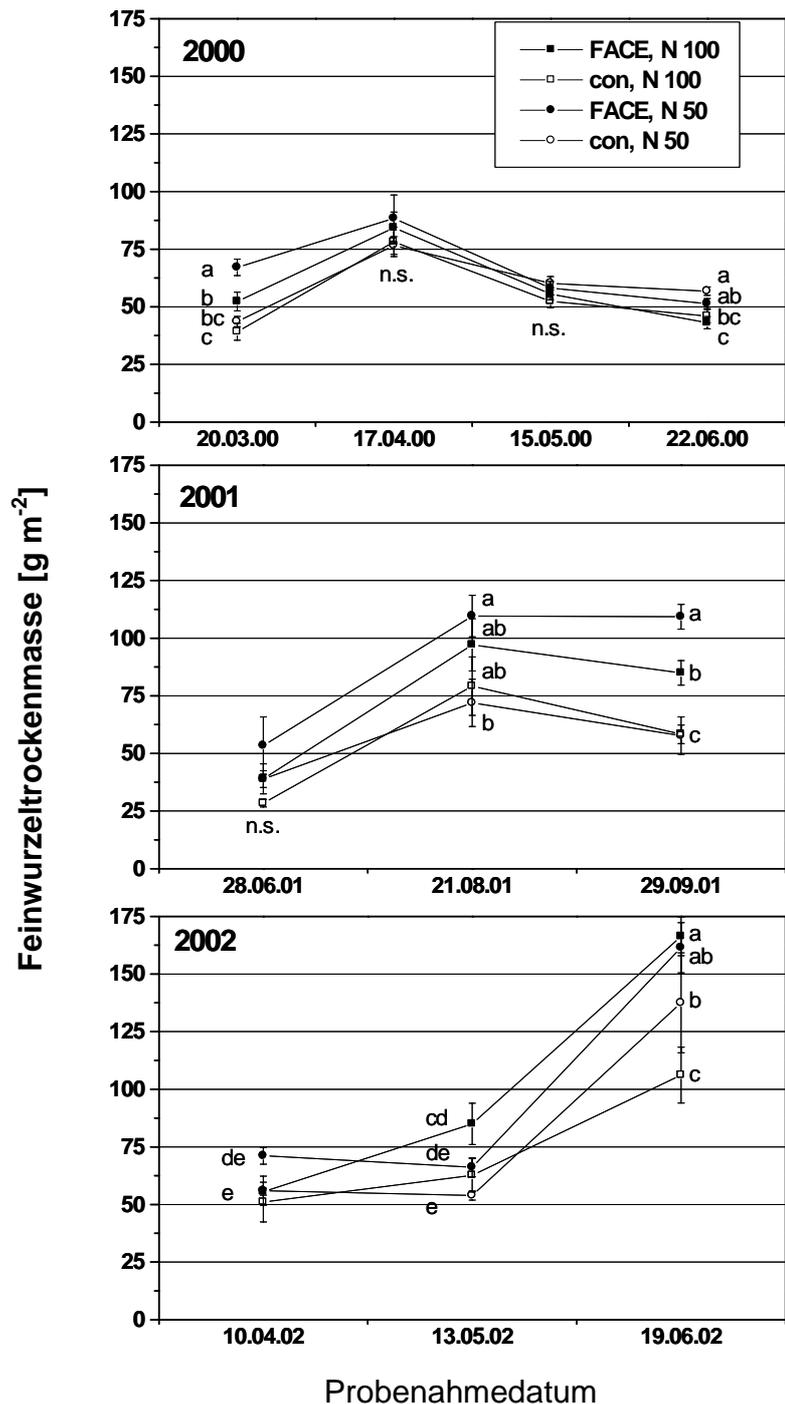
**Tabelle 3**  
**Stickstoff(N)Gehalt und N-Ertrag von Wintergerstenstroh nach Wachstum unter erhöhten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Feld. Gezeigt sind die Daten der Endernte (Behandlungsmittelwerte ± Standardabweichung). N50/N100 = reduzierte/ ortsübliche N-Düngung (vgl. Table 1); \* Signifikanz: P < 0.05; n.s. nicht signifikant**

Düngungsstufe	N-50		N-100			
	380 ppm	550 ppm	CO <sub>2</sub> -Effekt	380 ppm	550 ppm	CO <sub>2</sub> -Effekt
CO <sub>2</sub> - Behandlung			%			%
<b>Stroh-N</b>	0.45	0.43	- 3.8	0.68	0.55	- 19.3
(%)	± 0.021	± 0.007	(n.s.)	± 0.057	± 0.024	(p = 0.08)
<b>Stroh-N</b>	2.43	2.65	+ 9.1	4.69	4.10	- 12.6
(g m <sup>-2</sup> )	± 0.12	± 0.05	(n.s.)	± 0.46	± 0.22	(n.s.)

## Wurzelwachstum

Im Vergleich zu der Zahl der Ergebnisse über mögliche Effekte erhöhter atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf die oberirdische Biomassebildung liegen sehr viel weniger Befunde zu den möglichen Reaktionen des Wurzelwachstums von Pflanzen unter diesen Bedingungen vor (Rogers et al. 1997). Die meisten dieser Untersuchungen wurden zudem unter vergleichsweise naturfernen Bedingungen (Topfversuche in Klimakammern etc.) durchgeführt. FACE-Experimente mit Sommerweizen und Baumwolle in den USA zeigten jedoch, dass die Feinwurzelbiomassebildung als Reaktion auf die CO<sub>2</sub> Anreicherung im Feld zunahm (Wechsung et al. 1999; Prior et al. 1994).

Abb. 8  
Verlauf der Feinwurzelbiomasse in 0-30 cm Bodentiefe von Winterweizen (oben), Zuckerrübe (Mitte) und Winterweizen (unten) ermittelt in Fruchtfolgeversuchen unter Freiland-CO<sub>2</sub>-Anreicherung (FACE = 550 ppm CO<sub>2</sub>, Kon = 380 ppm CO<sub>2</sub>). Gezeigt sind Mittelwerte (n = 4 ± Standardabweichung); N50/N100 = reduzierte/ ortsübliche N-Düngung (vgl. Table 1); n.s. = nicht signifikant



Im Braunschweiger FACE-Experiment wurden die Feinwurzel-Biomassen der unterschiedlichen Fruchtfolgeglieder zu mehreren Terminen während der Vegetationsperioden untersucht (Abb.8). Die Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration beeinflusste das Feinwurzelwachstum der verschiedenen Fruchtfolgeglieder in unterschiedlicher Weise. Generell konnte zwar eine Tendenz zu mehr Feinwurzelwachstum unter der CO<sub>2</sub>-Anreicherung festgestellt werden, die Ergebnisse waren jedoch meist nicht signifikant. Das Wurzelwachstum der Wintergerste wurde z.B. bei beiden N-Düngungsstufen vorwiegend vor dem Blühstadium der Pflanzen positiv beeinflusst (ca. 30% - 50% Stimulation), wobei der Effekt unter reduzierter N-Versorgung höher war (+ 50%) als unter ortsüblicher N-Düngung (+ 30%). Dagegen war das Feinwurzelwachstum der Zuckerrübe unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration nur gegen Ende Vegetationsperiode erhöht. Winterweizen reagierte dagegen unter ortsüblicher N-Düngung am stärksten auf CO<sub>2</sub>-Anreicherung, da hier das Wurzelwachstum signifikant gefördert war. Es bleibt abzuwarten, ob und inwieweit sich diese Ergebnisse im zweiten Fruchtfolgedurchgang des FACE-Versuches bestätigen lassen. Die Reaktion des Wurzelwachstums deutet aber darauf hin, dass mehr C aus der Atmosphäre über diesen Weg in den Boden gelangen kann.

#### ***Bodenorganismen: Mikrobielle Biomasse und Pilz-/Bakterienverhältnis***

Bodenmikroorganismen (Bakterien, Pilze, Actinomyceten) machen zwar nur einen sehr geringen Teil der Gesamtbiomasse eines Ökosystems aus, die mikrobielle Biomasse spielt jedoch eine Schlüsselrolle beim C- und N-Umsatz im Boden. Veränderungen der mikrobiellen Biomasse sind daher u.a. ein „früher“ Indikator für Veränderungen im organischen C-Gehalt (C<sub>org</sub>) des Bodens. Rückschlüsse auf die Umsatzleistungen der beteiligten Mikroorganismen selbst lassen sich daraus jedoch nur eingeschränkt ziehen. Ausgehend von einem unter erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen beobachteten veränderten Wurzelwachstum und veränderten Bodenfeuchten (s.o.) haben sich eine Reihe von Untersuchungen in unterschiedlichen Ökosystemtypen bzw. mit unterschiedlichen Modellökosystemen mit den Auswirkungen auf die mikrobielle Biomasse befasst (Zak et al. 2000). Zwar überwiegen dabei die Befunde, die eine Zunahme der mikrobiellen Biomasse unter CO<sub>2</sub>-Anreicherung beobachteten (ca. 65% der vorliegenden Studien), es wurden jedoch auch häufig keine Reaktionen bzw. Abnahmen festgestellt.

Im Braunschweiger FACE-Experiment wurde die mikrobielle Biomasse der verschiedenen Versuchsvarianten zunächst 14-tägig, später monatlich über den Versuchszeitraum beprobt. Bedingt u.a. durch die auftretende Variabilität der Bodenproben konnten bisher keine signifikanten Effekte der CO<sub>2</sub>-Anreicherung (und der N-Düngung) beobachtet werden (Daten nicht gezeigt). Es muss offen bleiben bis zum Abschluss der Auswertungen des FACE-Versuches in Braunschweig, ob und inwieweit sich die Reaktion der mikrobiellen Biomasse für die Bewertung von Langzeiteffekten veränderter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre auf Böden eignet.

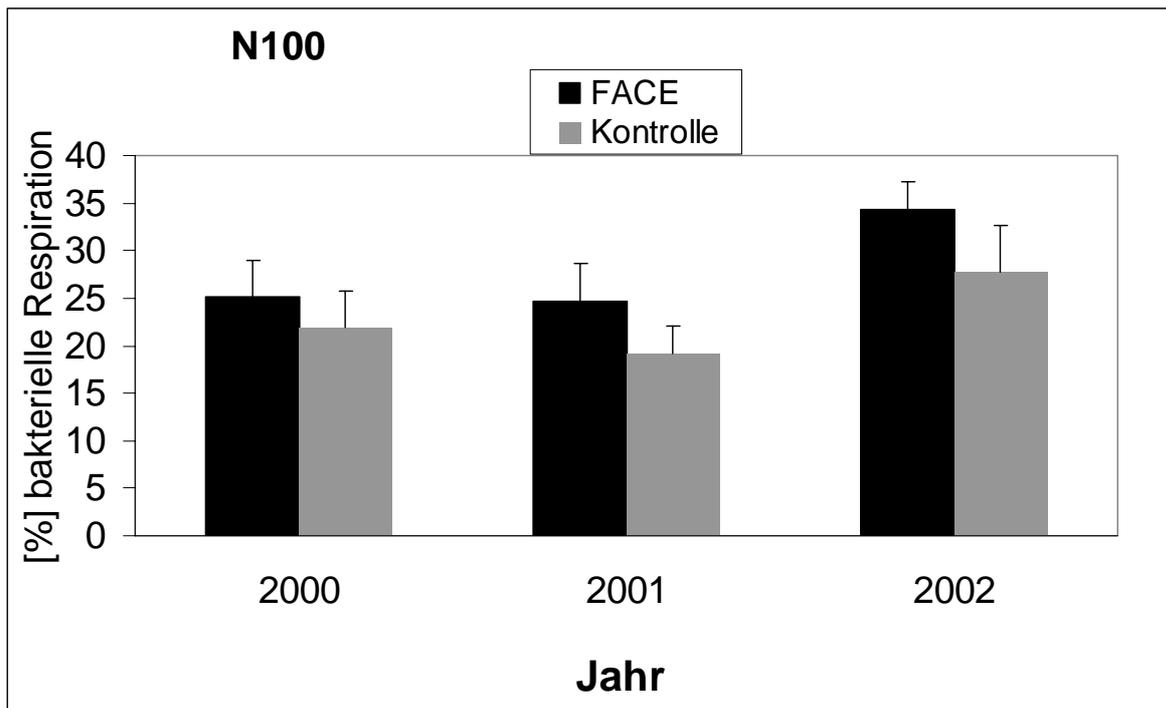


Abb. 9

**Pilz-/Bakterien-Verhältnis der mikrobiellen Biomasse (dargestellt als Prozentanteil bakterieller Respiration an der Gesamtrespiration von Bodenproben) im Boden einer Fruchtfolge (2000: Wintergerste; 2001: Zuckerrübe; 2002: Winterweizen) unter Freiland-CO<sub>2</sub>-Anreicherung (FACE = 550 ppm CO<sub>2</sub>; Kontrolle = 375 ppm CO<sub>2</sub>). Dargestellt sind Jahresmittelwerte (± Standardabweichung) für die einzelnen Fruchtarten und Behandlungen (nur ortsübliche Düngungsvariante N100) ermittelt aus monatlicher Beprobung der Böden.**

Dagegen konnten im Verlauf der ersten Fruchtfolge Hinweise darauf gefunden werden, dass sich die Zusammensetzung der mikrobiellen Biomasse im Boden ändert. Pilze und Bakterien der mikrobiellen Biomasse eines Bodens stehen in einem ganz bestimmten Verhältnis zueinander. Mit Hilfe der Methode der *Selektiven Hemmung* (Anderson and Domsch 1975) kann das respiratorische Pilz/Bakterien-Verhältnis bestimmt werden. So liegt das durchschnittliche Pilz/Bakterien-Verhältnis bei einem Boden-pH um  $\sim > 6.0$  bei 80/20% (Ackerböden) oder 70/30% (Waldböden) (Anderson und Kreitz 1998; Blagodatskaya and Anderson 1998). Dies bedeutet, dass z.B. 80% der Gesamtrespiration der Mikroflora eines Ackerbodens auf pilzliche Atmungsaktivität zurückzuführen ist und 20% auf bakterielle.

Die im Braunschweiger FACE-Versuch beobachteten Veränderungen des Pilz/Bakterien-Verhältnisses zugunsten erhöhter bakterieller Respiration unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration ((Abb.9) lassen die Vermutung zu, dass unter diesen Bedingungen von den Pflanzen leicht verfügbare C-Quellen in den Boden abgegeben werden (erhöhter Exsudatfluss), von denen am schnellsten Bakterien profitieren. Die beobachtete Erhöhung der Feinwurzelproduktion (s.o.) unter FACE als zusätzliche Quelle leicht abbaubarer organischer Substanz könnte ebenfalls eine Ursache des sich verändernden Pilz/Bakterien-Verhältnisses sein. Während im Jahr 2000 von der Gesamtrespiration in den Kontrollen 22% und unter FACE 25% der Atmung bakterieller Herkunft war, stieg die bakterielle Atmung auf 34% unter FACE im Jahr 2002 an (Abb. 9). Die Unterschiede zu den nicht begasten Flächen ließen sich ab dem 2. Versuchsjahr

statistisch sichern ( $p > 0.001$ ). Eine Zunahme von Bakterien unter erhöhter  $\text{CO}_2$  Konzentration wird auch von Sonnemann and Wolters (2005) berichtet.

***Bodenorganismen: Collembolen und Enchytraeiden***

Bodentiere sind in ihrer funktionellen Bedeutung als Destruenten maßgeblich an Dekompositionsprozessen und damit am C-Umsatz und der Nährstofffreisetzung in Böden beteiligt. Nach wie vor ist nicht geklärt, ob und in welchem Maße sich Abundanzen und Biodiversität sowie funktionelle Leistungen der Bodentiere in Agrarökosystemen als Folge einer erhöhten atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration und eines damit verbundenen erhöhten C-Eintrages in den Boden verändern. Bisherige Arbeiten beziehen sich primär auf Grünlandstandorte und liefern keine eindeutigen Ergebnisse (Niklaus et al. 2003; Sonnemann and Wolters 2005; Yeates et al. 1997). Das im Braunschweiger FACE-Projekt beobachtete erhöhte Feinwurzelwachstum und der damit verstärkte C-Eintrag in den Boden sowie die erhöhte Bodenfeuchte unter erhöhter atmosphärischer  $\text{CO}_2$ -Konzentration verbessern die Randbedingungen für Bodenorganismen, so dass eine indirekte Wirkung erhöhter atmosphärischer  $\text{CO}_2$ -Konzentration auf Bodentiere zu erwarten ist (Wardle et al. 1998). Unter den Bodentieren stellen Collembolen (Springschwänze) und Enchytraeiden (kleinere Verwandte der Regenwürmer) wichtige Bindeglieder im Nahrungsnetz des Bodens dar und standen deshalb hier im Mittelpunkt des Interesses.

**Tabelle 4**  
**Artenzahlen und Individuen-Dichten (Ind.  $\text{m}^{-2}$ ) verschiedener Familien von Collembolen im Boden eines Winterweizenbestandes während des Braunschweiger FACE-Versuches.**

Familie	550 ppm $\text{CO}_2$		370 ppm $\text{CO}_2$	
	Art	[Ind. $\text{m}^{-2}$ ]	Art	[Ind. $\text{m}^{-2}$ ]
Entomobryidae	4	199	2	40
Isotomidae	10	5968	11	3839
Onychiuridae	3	1572	2	1949
Poduridae	5	875	4	617
Sminthuridae	6	1930	4	995
<b>Total</b>	<b>28</b>	<b>10544</b>	<b>23</b>	<b>7440</b>
Juv.; unbest..		696		80
<b>Total</b>		<b>11240 *</b>		<b>7520</b>

Die Abundanz der Collembolen stieg unter Winterweizen bei erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre signifikant um mehr als 30 %, wie Tab. 4 zeigt. Insgesamt wurden 35 verschiedene Collembolen-Arten aus 5 Familien gefunden. Die Diversität war größer unter erhöhtem  $\text{CO}_2$  (28 Arten) im Vergleich zu Umgebungsluft (23 Arten). Der Effekt der  $\text{CO}_2$

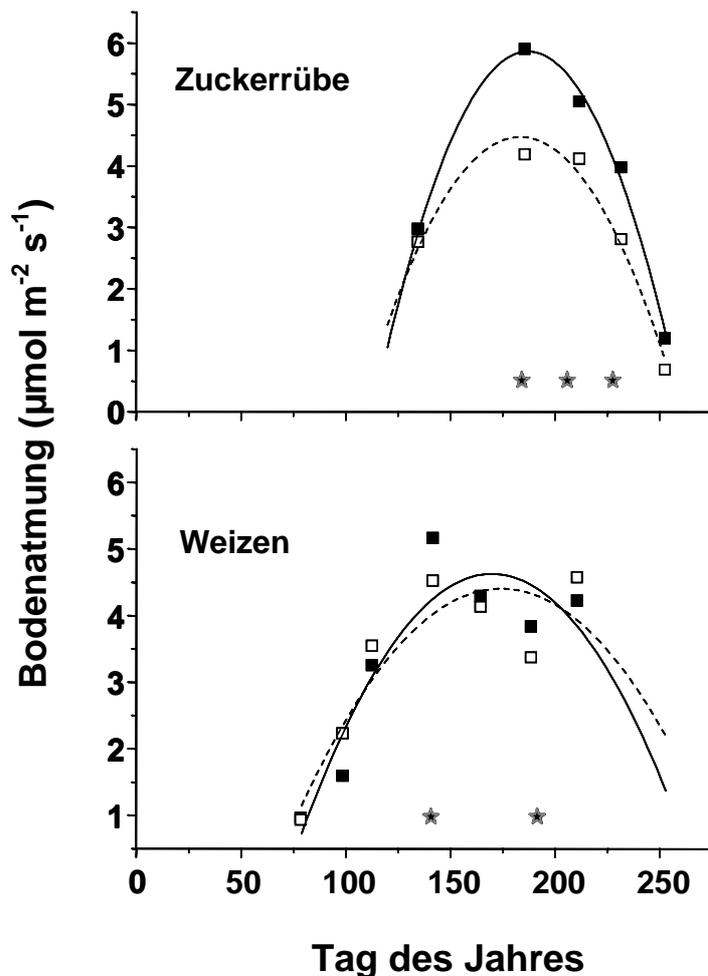
Anreicherung unterschied sich zwischen den häufigen Arten: z.B. wurden ca. 75 % der Individuen von *Folsomia inoculata*, die im System vorhanden waren, unter CO<sub>2</sub> Anreicherung gefunden, lediglich 25 % befanden sich in der Kontrolle. Die Ergebnisse für *Folsomia listeri* hingegen waren genau entgegengesetzt. Als Ursachen für diese Verschiebungen in der Verteilung kommen Änderungen hinsichtlich der Nahrungsressourcen, der Konkurrenz, des Feinddruckes etc. in Frage. *Isotomodes productus* ist ein Beispiel für eine Art, die nicht durch CO<sub>2</sub>-Anreicherung beeinflusst wurde. Aufgrund solcher artspezifischer Reaktionen müssen bei zukünftigen Untersuchungen Folgen für Abbau- und Mineralisierungsprozesse in Betracht gezogen werden. Diversitätsänderungen dieser Bodentiere könnten zu Verschiebungen der Zersetzungsraten und damit der Nährstofffreisetzung in Böden führen, was besonders in Agrarökosystemen weitreichende Folgen hätte.

Für Enchytraeiden erfolgte ein monatliches Langzeit-Monitoring ganzjährig als geschlossene Zeitreihe, um eventuelle Memory-Effekte, z.B. durch extreme klimatische Bedingungen außerhalb der Vegetationsperioden oder durch die Fruchtfolge, interpretieren zu können. Innerhalb der 3 Jahre des ersten Fruchtfolge-Zyklus konnte für jede Vegetationsperiode ein signifikanter Unterschied in den Abundanzen der Enchytraeiden unter erhöhten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Vergleich zur Kontrollbehandlung festgestellt werden (Daten nicht gezeigt). Allerdings ist das Bild uneinheitlich, d.h. es lässt sich bislang nicht sagen, ob eine CO<sub>2</sub>-Erhöhung in der Atmosphäre zu einer Steigerung oder Abnahme der Abundanzen führt, wie auch z.B. Yeates et al. (1997) in Grünland feststellten. So ließen sich im Braunschweiger FACE-Projekt unter Wintergerste eine Zunahme und unter Zuckerrübe eine Abnahme der Enchytraeiden-Abundanzen gegenüber der Kontrolle mit Umgebungsluft verzeichnen. Die bekannte Fruchtabhängigkeit der Bodentiere zeigt sich auch unter diesen Versuchsbedingungen, wobei die spezifischen Management-Maßnahmen der einzelnen angebauten Früchte zu berücksichtigen sind.

### ***Bodenatmung***

Die CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus Böden (*in-situ* Bodenatmung) repräsentiert die Atmung der Pflanzenwurzeln (autotrophe Atmung) und der Bodenorganismen (heterotrophe Atmung). Sie ist damit ein integrativer Indikator für das Prozessgeschehen des C-Umsatzes in Böden. Zur Untersuchung möglicher Effekte erhöhter atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf die *in-situ* Bodenatmung liegen Untersuchungen an unterschiedlichen Vegetationstypen (Wald, Grasland, Ackerkulturen) vor, die unter unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Expositionsbedingungen durchgeführt wurden (Zak et al. 2000). Die dabei erzielten Ergebnisse deuten zwar im Mittel über alle Studien auf eine Stimulation der Bodenatmung unter erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen hin, allerdings sind sehr hohe Schwankungsbreiten dieses Mittelwertes zu verzeichnen. Trotz der hohen Variabilität dieser Befunde und der offenen Frage, welche Anteile des CO<sub>2</sub>-Flusses aus dem Boden aus der autotrophen bzw. der heterotrophen Bodenatmung stammen, sind diese Ergebnisse dahingehend interpretiert worden, dass der C-Umsatz im Boden als Reaktion auf erhöhte atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentrationen beschleunigt sein könnte (Schlesinger and Richter 2001). Im Braunschweiger FACE-Versuch kann diese Tendenz bisher nicht

durchgehend bestätigt werden. Abb.10 zeigt den Effekt der CO<sub>2</sub>-Anreicherung auf den saisonalen Verlauf der Bodenatmung am Beispiel der Zuckerrübe und es Weizens. Während für die Zuckerrübe über eine langen Zeitraum im Laufe der Vegetationsperiode eine deutliche Stimulation der Bodenatmung (bis max. ca. 30%) durch erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nachweisbar war, war dieser Effekt für Weizen nur ansatzweise zu erkennen.



**Abb.10**

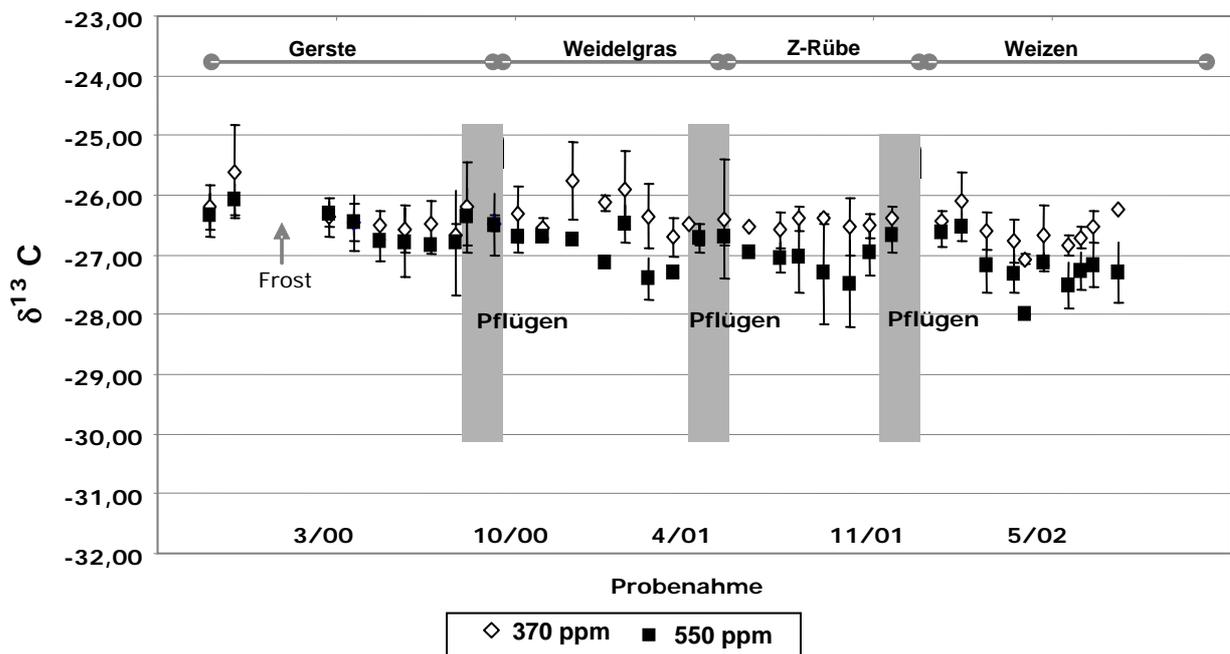
Saisonaler Verlauf der *in-situ* Bodenatmung unter Zuckerrübe (2001) und Winterweizen (2002) ermittelt im Rahmen des Braunschweiger FACE-Versuches. Dargestellt sind mittlere Tageswerte der Bodenatmung für die unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (gefüllte Symbole = 550 ppm CO<sub>2</sub>; offene Symbole = 375 ppm CO<sub>2</sub>) der ortsüblichen N-Düngungsstufe (N100). Die Tagesmittelwerte wurden aus Messungen an unterschiedlichen Stellen innerhalb der FACE-Ringe zu unterschiedlichen Zeiten im Laufe eines Tages errechnet. \* = signifikante Effekte

### ***Bodenkohlenstoff***

Ein wichtiger Aspekt bei der Bewertung von Folgen einer CO<sub>2</sub>-Anreicherung in der Atmosphäre besteht in der Aufklärung der Frage, ob und in welchem Umfang die wachstumsstimulierenden Effekte erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen durch den gesteigerten Eintrag von Wurzeln und Ernteresiduen sich in einer Erhöhung von Boden-C-Gehalten niederschlagen. Dadurch würde ein Teil des anthropogen emittierten CO<sub>2</sub> wieder in die Böden zurückgebunden werden.

Bei der Untersuchung dieser Fragestellung tritt das grundlegende methodische Problem auf, dass aufgrund der geringen jährlichen Eintragsraten von „neuem“ C im Vergleich zu den in

Böden vorhandenen C-Mengen eine mögliche Zunahme des C-Gehaltes bei den kurzen Laufzeiten von FACE-Experimenten statistisch nur schwer zu sichern ist. Häufig wird daher die Methode der stabilen C-Isotopenmarkierung eingesetzt, mit deren Hilfe sich auch relativ kleine Änderungen im Boden-C nachweisen lassen, sofern sich das C-Isotopenverhältnis des neu zugeführten von dem des vorhandenen C unterscheidet. In einem Vergleich bisheriger FACE-Experimente, die mit landwirtschaftlichen Kulturpflanzen unter Einsatz der stabilen C-Isotopentechnik durchgeführt wurden, ließ sich zwar ein Trend zu höheren Boden-C-Gehalten unter CO<sub>2</sub>-Anreicherung feststellen, die Ergebnisse waren aber in keinem der Fälle statistisch signifikant (Kimball et al. 2002).



**Abb. 11**  
Zeitlicher Verlauf des  $\delta^{13}\text{C}$ -Wertes des Bodenkohlenstoffes im Braunschweiger FACE-Experiment im Zeitraum der ersten Fruchtfolge (Bodentiefe 0-10 cm).

Auch im Braunschweiger FACE-Experiment wurde nach Durchlaufen der ersten Fruchtfolge ein nicht signifikanter Trend zu höheren C-Gehalten ermittelt (Daten nicht gezeigt). In Abb. 11 wird demonstriert, wie die stabil-isotopische Signatur ( $\delta^{13}\text{C}$ -Wert) des Boden-C im Verlauf der jeweiligen Vegetationsperioden unter erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen deutlich negativer wird, d.h. sich auf den Wert des zusätzlich angebotenen C aus der CO<sub>2</sub>-Anreicherung hinbewegt. Dies ist ein Hinweis darauf, dass „neues“ Pflanzenmaterial in den C-Speicher des Bodens eingebracht wird. Diese Veränderung der C-Isotopensignatur wurde jedoch durch die jeweilige Pflugbearbeitung am Ende der Vegetationsperiode teilweise wieder nivelliert. Nach Abschluss des sechsjährigen FACE-Versuches soll eine endgültige Abschätzung der neu eingebrachten C-Mengen unter erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen vorgenommen werden. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass die gezeigte Stimulation der Bodenatmung durch die CO<sub>2</sub>-Erhöhung einerseits und der im gleichen Zeitraum aus älterem C-Material durch Mineralisierung freigesetzte C eventuell nur geringe Effekte erwarten lassen

## 5 Fazit

Die hier vorgestellten ersten Ergebnisse zum Braunschweiger FACE-Experiment deuten darauf hin, dass steigende atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentrationen das Potential haben, die Produktivität sowie den Wasser- und Stoffhaushalt und die Biozönosen des Bodens in Agrarökosystemen zu beeinflussen. Bisher wurden folgende Effekte beobachtet:

- eine deutliche Stimulation der Bestandes-Photosynthese,
- eine Reduktion der Bestandeswasserabgabe und eine Erhöhung der Bodenfeuchte,
- eine im Vergleich zu vielen Kammerversuchen relativ niedrige Wachstumsstimulation der Feldfrüchte,
- eine Veränderung der Gewebe-/Produktqualität im Hinblick auf die Stickstoffgehalte,
- eine Beeinflussung von Leistungen und Vielfaltsmerkmalen von Bodenorganismen, wobei hier eine deutliche Fruchtartenspezifität der Effekte zu beobachten war und
- (noch) keine konsistenten Effekte auf den Boden-C-Umsatz insgesamt.

Da das FACE-Experiment in Braunschweig auf insgesamt sechs Jahre mit zwei dreigliederigen Fruchtfolgedurchgängen angelegt ist, bleibt abzuwarten, inwieweit sich diese Effekte bestätigen. Darüber hinaus sind noch zahlreiche weitere Informationen z.B. zum Nährstoffhaushalt der Flächen und zu den Klimabedingungen der einzelnen Jahre zu erheben bzw. auszuwerten, die für eine Interpretation der Ergebnisse bzw. eine Gesamtbewertung benötigt werden.

Die gezeigten Effekte deuten jedoch darauf hin, dass für die Abschätzung der möglichen Folgen von Klimaänderungen für landwirtschaftlich genutzte Böden nicht nur Aspekte sich ändernder Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse relevant sind, sondern dass auch aus den direkten Effekten einer sich ändernden Atmosphärenchemie auf die Vegetation Rückkoppelungsphänomene zu erwarten sind, die den Boden in seiner Produktions-, Regelungs- und Lebensraumfunktion betreffen und damit in eine Bewertung der Folgen des Klimawandels mit eingeschlossen werden müssen.

## 6 Literatur

- Amthor JS (2001) Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on wheat yield: review of results from experiments using various approaches to control CO<sub>2</sub> concentration. *Field Crops Res* 73: 1–34
- Anderson JPE, Domsch KH (1975) Measurement of bacterial and fungal contributions to respiration of selected agricultural and forest soils. *Can J Microbiol* 21: 315-322
- Anderson T-H, Kreitz S (1997) Verschiebung des Pilz/Bakterien-Verhältnisses und der Substratnutzung von Mikroorganismen-Gesellschaften in Abhängigkeit vom Boden-pH. *SchrR Bundesminist Ernähr Landwirtsch Forsten. Reihe A, Angew Wiss* 465:408-410
- Bender J, Hertstein U, Black CR (1999) Growth and yield responses of spring wheat to increasing carbon dioxide, ozone and physiological stresses: a statistical analysis of ESPACE wheat results. *Eur J Agron* 10: 185- 196
- Blagodatskaya E, Anderson T-H (1998) Interactive effects of pH and substrate quality on the fungal-to-bacterial ration and QCO<sub>2</sub> of microbial communities in forest soils. *Soil Biol Biochem* 30(10/11):1269-1274
- Brooks TJ, Wall GW, Pinter PJ, Kimball BA, LaMorte RL, Leavitt S, Matthias AD, Adamsen FJ, Hunsacker DJ, Webber AN (2001) Acclimation response of spring wheat in a free air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) atmosphere with variable soil nitrogen regimes. 3. Canopy architecture and gas exchange. *Photosynthesis Res* 66: 97-108.
- Burkart S, Manderscheid R, Weigel HJ (2000) Interacting effects of photosynthetic flux density and temperature on canopy photosynthesis of spring wheat under different CO<sub>2</sub> concentrations. *J Plant Physiol* 157: 31-39.
- Buyanowski GA, Wagner GH (1998) Carbon cycling in cultivated land and its global significance. *Global Change Biol* 4: 131-141.
- Cotrufo MF, Ineson P, Scott A (1998) Elevated CO<sub>2</sub> reduces the nitrogen concentration of plant tissue. *Global Change Biol* 4: 43-54
- Dämmgen U, Weigel HJ (1998) Trends in atmospheric composition (nutrients and pollutants) and their interaction with agroecosystems. In: *Sustainable agriculture for food, energy and industry*. James & James Science Publishers Ltd., pp 85-93
- Fuhrer J (2003) Agroecosystem responses to combinations of elevated CO<sub>2</sub>, ozone, and global climate change. *Agriculture Ecosys Environ* 97: 1-20
- Giesemann A (2005) Changes in soil C-isotopic composition in an agroecosystem under Free Air Carbon dioxide Enrichment (FACE) treatment during a crop rotation period. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 19: 1373-1380
- Graefe U (1984) Eine einfache Methode zur Extraktion von Enchytraeiden aus Bodenproben. *Protokoll des Workshops zu Methoden der Mesofaunaerfassung und zur PCB-Wirkung auf Collembolen und andere Mesofauna-Gruppen*, Bremen 1984, 17.

- Heinemeyer O, Insam H, Kaiser EA, Walenzik G (1989) Soil microbial biomass and respiration measurements: an automated technique based on infra-red gas analysis. *Plant Soil* 116: 191-195.
- Hendrey G (1992) Global greenhouse studies: Need for a new approach to ecosystem manipulation. *Crit Rev Plant Sci* 11 (2-3): 61-74.
- Hodge A, Paterson E, Grayston SJ, Campbell CD, Ord BG, Killham K (1998) Characterisation and microbial utilisation of exudate material from the rhizosphere of *Lolium perenne* grown under CO<sub>2</sub> enrichment. *Soil Biol Biochem* 30: 1033-1043
- Idso SB, Idso KE (2001) Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on plant constituents related to animal and human health. *Environ Exp Bot* 45: 179–199
- IPCC (2001) In: Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Xiaosu D (eds.). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, UK
- Kimball B, Pinter P, Garcia R, Lamorte R, Wall G, Hunsaker D, Wechsung G, Wechsung F, Kartschall T (1995) Productivity and water use of wheat under free-air CO<sub>2</sub> enrichment. *Glob Change Biol* 1: 429-442.
- Kimball BA, Kobayashi K, Bindi M (2002) Responses of agricultural crops to free-air CO<sub>2</sub> enrichment. *Adv Agron* 77: 293–368.
- Körner CH (2000) Biosphere responses to CO<sub>2</sub> enrichment. *Ecol Appl*: 1590-1619.
- Luo Y, Mooney HA (eds.) (1999) *Carbon Dioxide and Environmental Stress*. Academic Press, San Diego, London, Boston, New York, Sydney, Tokyo, 415 S.
- MacFadyen A (1961) Improved funnel-type extractors for soil arthropods. *J Animal Ecol* 30: 171-184.
- Morgan JA, Pataki DE, Körner CH, Clark H, Delgrosso SJ, Grünzweig JM et al. (2004) Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Oecologia* 140:11-25
- Morison JIL (1998) Stomatal response to increased CO<sub>2</sub> concentration. *J Exp Bot* 49: 443-452
- Mosier AR (1998) Soil processes and global change. *Biol Fertil Soils* 27: 221-229
- Niklaus PA, Alpehi J, Ebersberger D, Kampichler C, Kandeler E, Tscherko D (2003) Six years of in situ CO<sub>2</sub> enrichment evoke changes in soil structure and biota of nutrient-poor grassland. *Global Change Biol* 9: 585-600.
- Norby RJ, Cotrufo MF, Ineson P, O'Neill EG, Canadell JG (2001) Elevated CO<sub>2</sub>, litter chemistry and decomposition: A synthesis. *Oecologia*. 127: 153-165.
- Parry ML, Rosenzweig C, Iglesias A, Livermore M, Fischer G (2004) Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environ Change – Human Policy Dimensions* 14: 53-67.
- Petit JR, Jouzel J., Raynaud D, Barkov NI, Barnola JM, Basile I, et al. (1999) Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostoc ice core, Antarctica. *Nature* 399: 429-436.
- Polley HW (2002) Implications of atmospheric and climatic change for crop yield. *Crop Sci* 42: 131–140.

- Prior S A, Rogers HH, Runion GB, Hendrey GR (1994) Free-air CO<sub>2</sub> enrichment of cotton: Vertical and lateral root distribution patterns. *Plant Soil* 165: 33-44.
- Reddy KR, Hodges HF (eds.) (2000) *Climate Change and Global Crop Productivity*. CAB International; Wallingford.
- Rees RM, Bingham IJ, Baddeley JA, Watson CA (2005) The role of plants and land management in sequestering soil carbon in temperate arable and grassland ecosystems. *Geoderma* 128: 130-154.
- Rogers HH, Runion GB, Krupa SV, Prior SA (1997) Plant responses to atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment: implications in root-soil-microbe interactions. In: Allen LH et al. (eds.) *Advances in carbon dioxide effects research*. ASA Special Publications No.61. pp 1-34.
- Rosenzweig C, Hillel D (eds.) (1998) *Climate Change and the Global Harvest*. Oxford University Press, New York, Oxford.
- Rouhier H, Billes G, Billes L, Bottner P (1996) Carbon fluxes in the rhizosphere of sweet chestnut seedlings (*Castanea sativa*) grown under two atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations: <sup>14</sup>C partitioning after pulse labeling. *Plant Soil* 180: 101-111
- Schlesinger WH, Richter J (2001) Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature* 411:466-469.
- Soe A, Gieseemann A, Anderson TH, Weigel HJ, Buchmann N (2004): Influence of elevated CO<sub>2</sub> on soil respiration and its partitioning into recently assimilated and older carbon sources. *Plant Soil* 262: 85-94.
- Sonnemann I, Wolters V (2005) The microfood web of grassland soils responds to a moderate increase in atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Change Biol* 11: 1148-1155.
- Volk M, Niklaus PA, Körner C (2000) Soil moisture effects determine CO<sub>2</sub> responses of grassland species. *Oecologia* 125: 380-388.
- Wechsung G, Wechsung F, Wall GW, Adamsen F J, Kimball BA, Pinter PJ, Lamorte RL, Garcia RL, Kartschall T (1999) The effects of free-air CO<sub>2</sub> enrichment and soil water availability on spatial and seasonal patterns of wheat root growth. *Global Change Biol* 5: 519-529.
- Wenkel KO, Mirschel W (1995) *Agroökosystemmodellierung*. Grundlagen für die Abschätzung der Auswirkungen möglicher Landnutzungs- und Klimaänderungen ZALF-Berichte 24, 187 S.
- Wardle DA, Verhoef HA, Clarholm M (1998) Trophic relationships in the soil microfood-web: predicting the responses to a changing global environment. *Global Change Biol* 4: 713-727.
- Weigel HJ, Dämmgen U (2000) The Braunschweig Carbon Project: Atmospheric Flux Monitoring and Free Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE). *J Appl Bot* 74: 55-60.
- Weigel HJ (2005) Der CO<sub>2</sub>-Anstieg in der Atmosphäre: Folgen für Vegetation und Böden. In: *Biologische Senken für atmosphärischen Kohlenstoff in Deutschland* (Weigel HJ, Dämmgen U; Hrsg.) *Landbauforschung Völkenrode SH* 280, 131-144

- Weigel HJ, Manderscheid R (2005) CO<sub>2</sub> enrichment effects on forage and grain nitrogen content of pasture and cereal plants. *Journal Crop Improvement* 1/2: 73-89.
- Yeates GW, Tate KR, Newton PCD (1997) Response of the fauna of a grassland soil to doubling of atmospheric carbon dioxide concentration. *Biol Fertil Soils* 25: 307-315.
- Zak DR, Pregitzer KS, King JS, Holmes WE (2000) Elevated atmospheric CO<sub>2</sub>, fine roots and the response of soil microorganisms: a review and hypothesis. *New Phytol* 147: 201-222.



# Erntemehrgefahrenversicherung als agrarpolitisches Instrument



Geschäftsbereich Corporate Underwriting/Global Clients - Agro Tel.: +49 (89) 3891-6587  
Frau Engelhard Fax: +49 (89) 3891-76587

E-Mail: bengelhard@munichre.com

Die Ernte unserer Landwirte ist vom Wetter abhängig - und jeder kennt die Bilder: zerstörte Felder nach Hagelschlag, dürre Halme bei Trockenheit, überschwemmte Flächen nach Starkregen. Eine Erntemehrgefahrenversicherung bietet Landwirten finanzielle Sicherheit im Falle solcher Ernteverluste. In vielen Ländern nutzt die Regierung die Möglichkeit einer staatlich gestützten Erntemehrgefahrenversicherung, um die Landwirte im Fall von Naturkatastrophen schnell und effektiv zu unterstützen. Durch die staatliche Unterstützung und Trägerschaft entsteht zudem die Möglichkeit, steuernd einzugreifen: zum Beispiel die Teilnahme an der Versicherung an die Einhaltung der guten fachlichen Praxis und die Erfüllung von Cross Compliance-Vorgaben - und damit an die Erfüllung von Umweltauflagen - zu binden.

Im vorliegenden Beitrag werden zunächst einige Aspekte zum Thema Klima und Wetterextreme aufgegriffen, dann geht es um das Konzept einer Erntemehrgefahrenversicherung als agrarpolitisches Instrument, und schließlich werden einige Beispiele von Erntemehrgefahrenversicherungssystemen vorgestellt.

## Klima und Wetterextreme

In diesem Teil wird das Thema Klimawandel und einige Schadenbeispiele aus der Ernteversicherung in aller Kürze besprochen. Da die Teilnehmer des Workshops mit diesem Thema wohl vertraut sein dürften, hier nur drei Kernaussagen aus unserer Sicht:

1. durch die Zunahme der globalen Mitteltemperatur und den erhöhten Feuchtegehalt der Luft wird es zu mehr extremen Wetterereignissen kommen, d.h. häufigere und stärkere Stürme, Gewitter, Hagelschläge, Dürren etc.
2. die Hagelversicherung gibt es in Deutschland und Mitteleuropa seit über 200 Jahren. Lange Zeit wurde Hagel als die Hauptgefahr für die Landwirtschaft in Mitteleuropa betrachtet. Jahr für Jahr wird die landwirtschaftliche Produktion durch Hagelschläge geschädigt – deshalb ist dem Landwirt das Risiko Hagel stets vor Augen. Die Chance, dass das Feld des einzelnen Landwirts getroffen wird, ist zwar gering, aber die Ernte kann total zerstört werden. Nun hat aber eine Schadenanalyse der Vereinigten Hagelversicherung ergeben, dass nicht Hagel die meisten Schäden in Deutschland verursacht, sondern Trockenheit. 63% aller Schäden zwischen 1991 und 2003 gehen auf Trockenheit zurück. Der Grund hierfür ist, dass Trockenheit großflächig auftritt und deshalb auch großflächig Schäden verursacht. Ähnlich sieht es aus mit Gefahren wie Sturm, Überschwemmung, Auswinterung etc. Der Risikoausgleich fehlt und das Schadenpotential ist groß.
3. während es in anderen Ländern bereits existierende, staatlich gestützte Erntemehrgefahrenversicherungssysteme gibt, müssen die Landwirte in Deutschland diese Schäden alleine tragen. Sie haben einen klaren Wettbewerbsnachteil. Hier sehen wir Handlungsbedarf.

## Konzept einer Erntemehrgefahrenversicherung

Eine Analyse der beiden Trockenheitsjahre 1992 und 2003 hinsichtlich der Schäden, die die deutsche Landwirtschaft erlitten hat, und den staatlichen Hilfen, die die Landwirte als Ausgleichszahlungen erhalten haben, hat folgendes ergeben: Im Jahr 1992 war der Schaden in der Landwirtschaft 1,8 Mrd. €, dem standen Katastrophenhilfen von 230 Mio. € gegenüber. Im Jahr 2003 waren es 1,5 Mrd. € Schaden und 82 Mio. € Katastrophenhilfe. Hier sieht man deutlich, dass die Landwirte den allergrößten Teil der Schäden selbst finanzieren müssen.

Staatliche Katastrophenhilfe hat zwar den Vorteil, dass sie für den Landwirt kostenlos ist. Sie hat aber auch entscheidende Nachteile: der Landwirt hat keinen Rechtsanspruch auf Katastrophenhilfe, er ist abhängig von Verwaltungsentscheidungen. Die Zahlungen sind meist unzureichend und kommen sehr spät. Katastrophenhilfe ist somit kein Instrument des Risikomanagements.

Anders die Erntemehrgefahrenversicherung: sie ist ein verlässliches Instrument des Risikomanagements. Der Landwirt hat einen Rechtsanspruch auf eine zeitnahe und auf seinem Ertrag basierende Entschädigung. Eine Erntemehrgefahrenversicherung wirkt stabilisierend auf das landwirtschaftliche Einkommen, ist die Grundlage für Eigenkapitalbildung, bietet Planungssicherheit und verbessert die Kreditfähigkeit. Sie ist ein Ausgleich für Standortnachteile und eine Gleichstellung mit Landwirten in anderen Ländern, wo staatlich gestützte Erntemehrgefahrenversicherungssysteme die Ertragseinbußen der Landwirte ersetzen.

Folgende Grundsätze kennzeichnen eine Erntemehrgefahrenversicherung:

- gedeckte Gefahren sind Witterungsrisiken wie Hagel, Sturm, Frost, Überschwemmung, Starkregen, Trockenheit, Auswinterung, Auswuchs. In manchen Systemen – v.a. in USA – sind auch Krankheiten und Schädlinge versichert.
- in der Regel orientiert sich die Entschädigung am mengenmäßigen Ertragsverlust. Qualitätsverluste werden meist nicht gedeckt, auch nicht das Marktrisiko.
- Wichtig bei der Erntemehrgefahrenversicherung ist eine regional- und fruchtartenspezifische Tarifierung. Die Prämienrate, die der einzelne Landwirt bezahlt, sollte die Gefährdung seiner Region und die Empfindlichkeit seiner Kultur möglichst genau widerspiegeln. Ansonsten kommt es zu dem Effekt der Antiselektion: es versichern sich nur die am meisten exponierten Landwirte, und es fehlt der Risikoausgleich.
- Der Landwirt muss durch einen Selbstbehalt am Risiko beteiligt werden. Das sichert das Interesse des Landwirts an standortangepasster Produktion und an der Schadenverhütung. Und es wird sichergestellt, dass normale Schwankungen des Ertrages von Jahr zu Jahr sowie Kleinschäden nicht entschädigt werden.
- Eine hohe Marktdurchdringung und eine gute Risikostreuung sind Voraussetzungen für den wirtschaftlichen Erfolg eines solchen Systems.
- Ein ganz wesentlicher Grundsatz für eine Erntemehrgefahrenversicherung ist die Risikopartnerschaft zwischen Staat, Versicherungswirtschaft und Landwirt. Der Landwirt kann Risiken wie Trockenheit etc. nicht alleine tragen, die Versicherungswirtschaft kann es aufgrund des großen Schadenpotentials und der Vielzahl der versicherten Gefahren auch nicht – der Staat muss hier eingreifen und die Erntemehrgefahrenversicherung als agrarpolitisches Instrument initiieren, organisieren und finanziell unterstützen.

Die Funktionen der einzelnen Partner sind im Folgenden beschrieben:

Der Staat schafft die gesetzlichen Voraussetzungen und betrachtet die Erntemehrgefahrenversicherung als *das* Hilfsprogramm. Das heißt, andere Programme wie beispielsweise Katastrophenhilfen werden abgeschafft, denn sie be- oder verhindern eine hohe Beteiligung der Landwirte. Der Staat muss vor allem die Erntemehrgefahrenversicherung finanziell unterstützen: mit einer Prämiensubvention und möglichst mit einer staatlichen Katastrophenrückversicherung. Darüber hinaus gibt es noch die Möglichkeit der Steuerbefreiung der Prämien und Rücklagen. Die Vorteile für den Staat liegen in der Budgetierbarkeit der Steuermittel, im geringen Verwaltungsaufwand und in der EU- und WTO-Konformität. Der Staat kann beispielsweise seine Unterstützung an bestimmte Auflagen wie Cross Compliance knüpfen oder durch die prozentuale Prämiensubvention die Nachteile der Landwirte in höher exponierten Regionen ausgleichen, denn je höher die Exponierung, desto höher die Prämienrate, desto höher (absolut gesehen) die Unterstützung vom Staat.

Der Landwirt zahlt seinen Anteil der Prämie, er betreibt aktives Risikomanagement und hält alle Auflagen und Regeln der guten fachlichen Praxis ein. Vorteile für ihn sind die individuelle Risikoabdeckung, der Rechtsanspruch, die zeitnahe Entschädigung und die Erhöhung seiner Kreditwürdigkeit bei Banken (Basel II). Staatliche gestützte Systeme haben zudem den Vorteil, dass sie für alle Landwirte offen sind – niemand kann aufgrund seiner Exponierung vom Versicherer abgelehnt werden.

Der Versicherer schließlich bietet seine Infrastruktur, sein ganzes Agenten- und Verkaufnetz, sein EDV-System, seine Agrarspezialisten und Schadensschätzer. Und er übernimmt die Haftung. Die Rückversicherer arbeiten aktiv mit an der technischen Entwicklung und Etablierung solcher Systeme, um dann maßgeschneiderte Rückversicherungskonzepte anzubieten, d.h. sie sind Träger des überwiegenden Risikos.

## **Erntemehrgefahrenversicherungssysteme in der EU und den USA**

Als Überblick zunächst die zehn wichtigsten Hagel- und Ernteversicherungsmärkte weltweit im Jahr 2004: USA ist mit Abstand der größte und wichtigste Erntemehrgefahrenversicherungsmarkt weltweit: 4,2 Mrd. € Beiträge aus weltweit 5,2 Mrd. € stammen aus den USA. Der nächst wichtige Markt ist Kanada, dann kommt Spanien.

Das Erntemehrgefahrenversicherungssystem in den USA ist das umfangreichste System überhaupt. Es geht zurück auf eine Gesetzesinitiative aus den 30-er Jahren. Seitdem wurde das System schrittweise erweitert und verbessert. Heute deckt das amerikanische Erntemehrgefahrenversicherungssystem alle Naturgefahren (Trockenheit, Überschwemmung, Starkregen, Frost, Sturm, Hagel, Feuer), Krankheiten, Schädlinge und sogar Preisschwankungen. Der Staat unterstützt das System durch eine bis zu 60%-ige Prämiensubvention, es gibt eine umfangreiche staatliche Rückversicherung, und der Staat übernimmt die Abwicklungs- und Verwaltungskosten von 21% des Nettobeitrags. Das amerikanische System bietet eine Vielzahl von Produkten: angefangen von einer reinen Katastrophenabsicherung, die lediglich 50% des Ernteertrages absichert, aber quasi kostenlos ist, über so genannte „Buy-ups“, also Produkten, die eine höhere Absicherung gegen höhere Prämienraten bieten, bis hin zu Produkten, die eine Preiskomponente enthalten und so die betrieblichen Einnahmen absichern.

Das in Europa am weitesten entwickelte Erntemehrgefahrenversicherungssystem existiert seit 1980 in Spanien. Es deckt ebenfalls alle nennenswerten Naturgefahren sowie Krankheiten und Schädlinge, wobei Sonderkulturen wie z.B. Obst und Wein nur eine eingeschränkte Deckung haben. Es gibt eine 58%-ige Prämiensubvention und eine staatliche Rückversicherung. Spanische Versicherungsgesellschaften haben ein Spezialunternehmen – Agroseguro - gegründet, das die Erntemehrgefahrenversicherung betreibt und alle technischen Aufgaben inklusive Schadensschätzung übernimmt. Versicherungsbedingungen und Prämienraten werden vom Staat festgelegt.

Weitere Länder mit Erntemehrgefahrenversicherungssystemen in Europa sind Portugal, Österreich, Luxemburg und Frankreich. In Italien wird derzeit ein System entwickelt. All diese Systeme unterscheiden sich in ihrer Ausprägung und Form der staatlichen Unterstützung. Auch in anderen Ländern wie Ungarn, Polen, Türkei und Russland wird an Gesetzen zur Einführung einer Erntemehrgefahrenversicherung konkret gearbeitet. Selbst Brasilien und China interessieren sich für diese Modelle.

### Situation in Deutschland

Der GDV (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft) hat in Zusammenarbeit mit Versicherern, Rückversicherern und Bauernverband ein Konzept einer staatlich gestützten Erntemehrgefahrenversicherung für Deutschland entwickelt. Das Produkt samt Tarifierung liegt sozusagen „fertig in der Schublade“ und wartet auf staatliche Unterstützung. Es deckt die Gefahren Hagel, Sturm, Frost, Überschwemmung, Starkniederschlag, Auswinterung und Trockenheit. Das Tarifierungsmodell basiert auf dem Gefährdungspotenzial und berücksichtigt Klimadaten über einen Zeitraum von 30 Jahren, Bodenfaktoren und Topographie sowie die Empfindlichkeiten der Pflanzen.

### Fazit:

Durch den Klimawandel ist die landwirtschaftliche Produktion auch in Deutschland zunehmend durch Wetterextreme gefährdet. Nicht Hagel, sondern Trockenheit ist die Gefahr, die die meisten Schäden verursacht. Der Landwirt in Deutschland kann sich aber derzeit nur gegen Hagel versichern, alle anderen Schäden trägt er selbst – oder bekommt fallweise Gelder aus Hilfsprogrammen, die aber in der Vergangenheit nur unzureichende Entschädigungsleistungen geboten haben. Landwirte in anderen Ländern können aktives Risikomanagement betreiben – vor allem in den USA, aber auch in etlichen EU-Ländern sind die Landwirte durch umfangreiche staatlich gestützte Erntemehrgefahrenversicherungen vor Naturgefahren geschützt. Dies stellt einen Wettbewerbsnachteil für unsere Landwirte dar. Die deutsche Versicherungswirtschaft hat bereits ein Konzept für eine Erntemehrgefahrenversicherung erarbeitet und wartet nun auf ein entsprechendes Signal der Regierung. Darüber hinaus hat die Regierung durch die Unterstützung einer Erntemehrgefahrenversicherung die Möglichkeit steuernd einzugreifen, indem die Teilnahme an gewisse Bedingungen geknüpft wird, oder gezielt bestimmte Anbauformen unterstützt oder von der Subventionierung ausgeschlossen werden.



# Aktivitäten des Klima-Bündnis zur Vermeidung von Treihausgasen und zur Anpassung an Klimawandel

181

**Dr. Andreas Kress**

Climate Alliance - Klima-Bündnis - Alianza del Clima e.V.

[www.climatealliance.org](http://www.climatealliance.org)

A photograph of a city skyline at dusk or dawn, with buildings illuminated against a blue and purple sky. The foreground shows the rooftops of residential houses.

## **Das Klima-Bündnis:**

**Eine Partnerschaft  
europäischer Städte  
und Gemeinden**

**... reduzieren  
Treibhausgas-Emissionen**

A photograph of a lush green rainforest landscape, showing dense vegetation and distant hills under a bright sky.

**und den indigenen  
Völkern der  
Regenwälder**

**... schützen den  
Regenwald**

**... für den Erhalt des globalen Klimas !**





# Das Klima-Bündnis

CLIMATE ALLIANCE  
KLIMA-BÜNDNIS  
ALIANZA DEL CLIMA e.V.

Klima-Bündnis 2005

184

Über 1200 Mitgliedsstädte und -gemeinden in 14 europäischen Ländern repräsentieren 49.5 Millionen Bürger

# Städte und Gemeinden....

- sind zentrale Akteure im globalen Klimaschutz;
- können die meisten Verbrauchs-Sektoren beeinflussen;
- können sich vieler politischer und administrativer Instrumente bedienen;
- sind größtenteils verantwortlich für Raumplanung, für lokale Infrastruktur und öffentliche Dienstleistungen.



# Kommunen und Klimaschutz

**Kommunaler Klimaschutz ist mehr als einzelne Maßnahmen, sondern**

- **Organisation des Klimaschutz-Prozesses**
- **langfristige Visionen und Ziele**
- **Aktionsplan, Prioritätensetzung**
- **Monitoring und Berichterstattung**
- **kontinuierliche Weiterentwicklung des Klimaschutzprogramms**



- Europäische Geschäftsstelle und  
nationale Koordinationstellen

- Arbeitsbereiche:

### Kommunaler Klimaschutz

(Energie, Verkehr, Wald, Beschaffung)

### Kooperation mit indigenen Völkern

(Projektunterstützung, politische Arbeit,  
Bewusstseinsbildung)



## Aktuelles aus der Arbeit des Klima-Bündnis

**rund 15 europäische Projekte**  
und zahlreiche weitere Projekte, die von den nationalen Koordinationsstellen des Klima-Bündnis durchgeführt werden

### **Bandbreite:**

Methodik, strategische Vorgehensweisen und Umsetzung von Maßnahmen, Kampagnen,  
Bewusstseinsbildung



## Aktuelles aus der Arbeit des Klima-Bündnis

# Projekte, die methodische Vorgehensweisen von Kommunen unterstützen:



Sustainable  
Mobility  
Initiatives for  
Local  
Environment





# AMICA - Adaptation and Mitigation

- **INTERREG Projekt (Adaptation and Mitigation - an Integrated Climate Policy Approach);**
- **Zusammenführen von Maßnahmen, die sowohl zur Anpassung an den Klimawandel (*Adaptation*) als auch zum Erhalt des Klimas (*Mitigation*) notwendig sind;**
- **Themen: Hochwasser an Flüssen und Küsten, Dürren und Überhitzung von Städten.**





## Aktuelles aus der Arbeit des Klima-Bündnis

# Projekte zur Bewusstseinsbildung:

## CLARITY

Climate Action  
reaching and  
teaching the  
Young



**Schwarzes Gold aus grünen Wäldern**

**Erdöl in Amazonien**

KLIMA-BÜNDNIS/ALIANZA DEL CLIMA e.V.  
KLIMABÜNDNIS ÖSTERREICH  
ASTM / KLIMABÜNDNIS LUXEMBURG



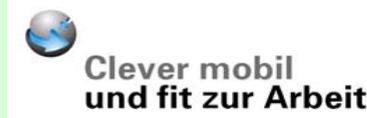
## Aktuelles aus der Arbeit des Klima-Bündnis

# KAMPAGNEN



**ZOOM**  
Kids on the move

und zahlreiche nationale Kampagnen, wie:



In 2004:



... und in Österreich



Weitere Informationen unter

**[www.klimabuendnis.org](http://www.klimabuendnis.org)**

und :

[www.smile-europe.org](http://www.smile-europe.org), [www.climateforchange.net](http://www.climateforchange.net),

[www.zoom-europe.org](http://www.zoom-europe.org), [www.mobilityweek-europe.org](http://www.mobilityweek-europe.org),

[www.wald21.de](http://www.wald21.de), [www.clever-mobil.org](http://www.clever-mobil.org), [www.climate-star.net](http://www.climate-star.net),

[www.erdoelinamazonien.org](http://www.erdoelinamazonien.org), [www.aim-solarcity.net](http://www.aim-solarcity.net),

[www.regenwaldmenschen.de](http://www.regenwaldmenschen.de), [www.klimastaffel.de](http://www.klimastaffel.de),...

**ELSA e. V.**

**Alianza para los Suelos**  
de las Ciudades y Municipalidades Europeas

**Alleanza per il suolo**  
delle città e dei comuni europei

**Alliance en faveur du sol**  
des villes et communes européennes

**Boden-Bündnis**  
europäischer Städte und Gemeinden

**Soil & Land Alliance**  
of European Cities and Towns

**Zveza za zemljo**  
evropskih mest in občin



**Bienvenido**  
**Benvenuto**  
**Bienvenue**  
**Willkommen**  
**Welcome**  
**Witamy**



CLIMATE ALLIANCE  
KLIMA-BÜNDNIS  
ALIANZA DEL CLIMA e.V.

# Informationen und Publikationen

195

## 4. Internationale Jahrestagung



*European Land and Soil Alliance*  
Boden-Bündnis europäischer Städte, Kreise und Gemeinden (ELSA) e.V.

„Kommunale Strategien zum  
nachhaltigen Umgang mit Böden“

6. und 7. Oktober 2005

Haus der Regionen in Krems/Stein  
Niederösterreich

[www.bodenbuendnis.org](http://www.bodenbuendnis.org)





CLIMATE ALLIANCE  
KLIMA-BÜNDNIS  
ALIANZA DEL CLIMA e.V.

# Beispiele aus der europäischen Praxis

- **Beispiel: Klima-Bündnis Luxemburg**
- **Leitfaden: Nachhaltige Siedlungen**
- **Ziel: Nachhaltige Bodennutzung**

196



## Nachhaltige Siedlungen

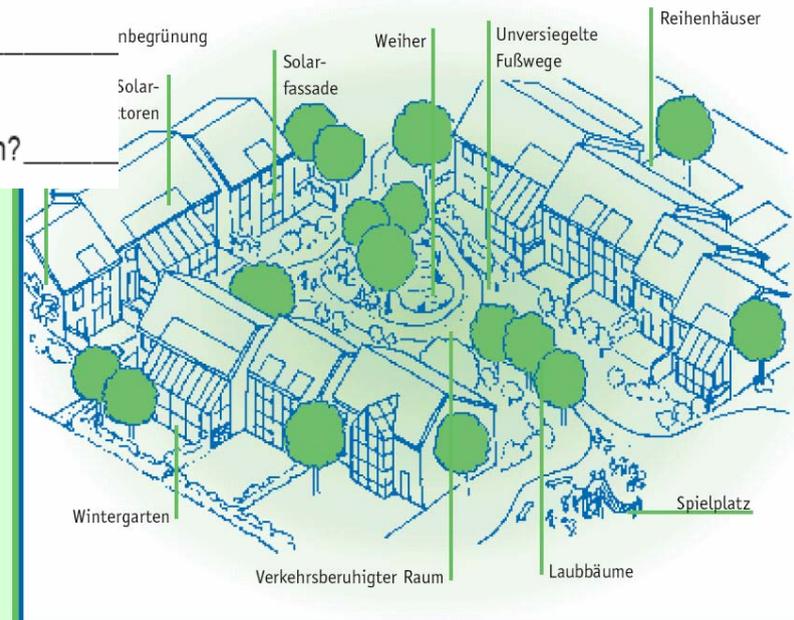
Informationsblatt für Gemeindeverantwortliche,  
Planer, Architekten und Promotoren



# Check-Liste

## Flächenverbrauch

- Wie groß sind die Grundstücke? \_\_\_\_\_
- Wieviel Fläche (in %) wird für die Verkehrserschließung (Straßen, Wege, Stellplätze) abgetreten? \_\_\_\_\_
- Wie hoch ist der Anteil von nichtversiegelten Verkehrsflächen (z.B. nicht versiegelte Fußwege oder Stellplätze)? \_\_\_\_\_
- Wieviel Fläche (in %) wird für öffentliche Erholungsflächen (Plätze, Grünflächen, andere öffentliche Einrichtungen) abgetreten? \_\_\_\_\_





CLIMATE ALLIANCE  
KLIMA-BÜNDNIS  
ALIANZA DEL CLIMA e.V.

# Klima-Bündnis Österreich

198

**Klimabündnis-  
Gemeinde-Wettbewerb  
2005**

**Bodenschutz = Klimaschutz**

*„Der Boden ist eines der  
kostbarsten Güter der  
Menschheit. Er ermöglicht  
es Pflanzen, Tieren und  
Menschen, auf der  
Erdoberfläche zu leben.“  
(Europäische Bodencharta)*



ELSA e.V.



lebensministerium.at



KLIMABÜNDNIS  
ÖSTERREICH

# Empfehlungen

- **Die engen Zusammenhänge von Boden, Klima und Wasser sind in Zukunft in der Politik ernst zu nehmen;**
- **Bodenschutz ist präventiv zum Klimaschutz erforderlich und kann seinen Teil mit dazu beitragen, Klimaerwärmungen zu begrenzen bzw. zeitlich zu verzögern;**
- **alle Maßnahmen des Bodenschutzes , die die Puffer- und Speicherkapazitäten der Böden schützen sind zu unterstützen (Trend zur weiteren massiven Versiegelung ist endlich umzukehren);**

# Empfehlungen (Fortsetzung)

- **Vergleichbar den Klimaschutzmaßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion sind verbindliche Ziele (wie z.B. Bebauungslimits) festzulegen und durch wirksame Maßnahmen zu realisieren;**
- **Kommunen sind bei ihrer Arbeit zur Umsetzung des Bodenschutzes (wie z.B. der Planung zum vorbeugenden Hochwasserschutz) zu stärken;**
- **Anpassungsmaßnahmen an Klimawandel nie ohne Klimaschutzmaßnahmen;**

## **Empfehlungen (Fortsetzung)**

- **Kommunen sollten mit ihren vielfältigen Erfahrungen in die nationalen Programme und Maßnahmen zum Klimaschutz einbezogen werden;**
- **erforderliche Kapazitäten für den lokalen Klimaschutz fördern (Weiterbildungsmaßnahmen für MitarbeiterInnen, einheitliches Monitoring von Treibhausgasemissionen);**
- **Fonds für eine strukturelle Förderung von Klimaschutzprogrammen einrichten (Mittel für Kommunen die sich auf bestimmte Ziele sowie auf entsprechende Erfolgskontrolle verpflichten).**

A photograph of a signpost in a lake. The signpost is a wooden pole with a white rectangular sign attached. The sign has a blue border and contains the Greek word 'Κλίμα' (Climate) and the German word 'Klima' (Climate) stacked vertically. The signpost is partially submerged in the water. In the background, there is a large body of water, a forested shoreline, and a hazy sky.

Κλίμα  
Klima

**Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit**

**UBA-Workshop am 28./29.09.2005  
„Klimaänderungen – Herausforderungen für den  
Bodenschutz“**

# **Nationales Klimaschutzprogramm der Bundesregierung**

**Astrid Harnisch  
BMU, AG Z III 6**

# Gliederung

- Hintergrund und nationale Emissionsminderungsziele
- Nationales Klimaschutzprogramm: Wo stehen wir heute und was wollen wir erreichen?
- Klimaschutzpolitik und Bodenschutz
- Ausblick und weiteres Vorgehen

# Hintergrund

- **Kyoto-Protokoll:** am 16. Februar 2005 in Kraft getreten
- **Ziel für D:** Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 21 % im Zeitraum 2008-2012 bezogen auf 1990
- **Perspektive:**
  - Mittel- und langfristige Zielsetzungen nach der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls notwendig
  - **30 % / 40 % - Minderungsziel** bis 2020 für D

- Festlegung der 2°C-Obergrenze für die durchschnittliche globale Erwärmung gegenüber vorindustriellen Zeiten
- Formulierung von Zielkorridoren für die Industrieländer von 15-30 % bis 2020 und 60-80 % bis 2050 (gegenüber 1990) auf EU-Ebene

# Nationale Rahmenbedingungen

- **1990:** Einrichtung der IMA „CO<sub>2</sub>-Reduktion“ unter dem Vorsitz des BMU am 13. Juni
- **2000:** Verabschiedung des 5. Berichts der IMA - des Nationalen Klimaschutzprogramms am 18. Oktober
- **2005:** Verabschiedung der Fortschreibung des Nationalen Klimaschutzprogramms am **13. Juni**

# Sektorale Entwicklung der CO<sub>2</sub>- Emissionen in Deutschland

CO <sub>2</sub> - Emissionen in D	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Energie- erzeugung	441,6	402,9	402,9	390,5	387,5	379,2	382,4	364,2	366,8	351,6	364,0	368,9	378,1	385,1
Industrie	195,5	169,8	160,0	150,7	153,5	152,9	148,3	149,0	143,1	141,3	141,8	137,3	134,0	130,9
Verkehr	158,1	161,5	167,8	172,5	168,9	172,5	172,6	173,1	176,4	181,9	178,3	174,6	172,5	166,5
Haushalte	129,3	131,5	123,5	134,0	128,4	129,2	142,5	138,4	132,0	119,9	116,8	131,2	120,1	122,4
Gewerbe	90,6	86,3	75,4	72,4	67,4	68,5	79,2	68,8	66,8	62,6	59,2	61,8	59,1	60,3
<b>Gesamt- emissionen</b>	<b>1015,0</b>	<b>976,9</b>	<b>929,5</b>	<b>920,0</b>	<b>905,6</b>	<b>902,2</b>	<b>924,9</b>	<b>893,5</b>	<b>885,2</b>	<b>857,4</b>	<b>860,0</b>	<b>873,8</b>	<b>863,8</b>	<b>865,3</b>

# CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele

THG-Sektor (Zahlen in Mio. t)	Ist 1990	Ist 2003	Ziele 2008/12	Rechnerische Differenz 2003- 2008/2012
CO <sub>2</sub> Äquivalente	1.248	1.017	986	- 31
Sonstige THG	233	152	142	- 10
CO <sub>2</sub>	1.015	865	844	- 21
Haushalte	129	122	120	
Verkehr	158	167	171	
Haushalte + Verkehr	287	289	291	+ 2
Gew./Handel/DL	91	60	58	- 2
Industrie	195	131		
Energiewirtschaft	442	385		
Energie + Industrie	637	516	495	- 21

# Handlungsbedarf

- bis 2003 konnten die Treibhausgasemissionen insgesamt um **18,5 %** bezogen auf 1990 reduziert werden
- **Industrie und Energiewirtschaft** abgedeckt durch Emissionshandel
- **Verkehr: ca. 5 Mio. t**
- **Private Haushalte: ca. 10 Mio. t**
- Gewerbe, Handel und Dienstleistungen im Zielkorridor

# Maßnahmenvorschläge Verkehr I

	CO <sub>2</sub> - Minderungspotenzial
<b>Anreizmechanismen zur Verminderung der Transportintensität und zur Steigerung der Energieeffizienz des Verkehrssektors</b>	
Ausbau der Lkw-Maut zu einem echten „road pricing“ mit örtlich und zeitlich unterschiedlichen Mautsätzen	nicht quantifizierbar
Aufkommensneutrale steuerliche Förderung von Pkw mit geringen Verbrauch unter Berücksichtigung entsprechender Aktivitäten der EU-KOM	1 Mio. t
Einführung emissionsabhängiger Landegebühren auf deutschen Flughäfen	0,5 Mio. t
Unterstützung internationaler Maßnahmen zur Förderung der Energieeffizienz im Luftverkehr	nicht quantifizierbar
Maßnahmen zum Abbau von Wettbewerbsverzerrungen zwischen den Verkehrsträgern	nicht quantifizierbar

# Maßnahmenvorschläge Verkehr II

212

<b>Technische Verbesserungen an Fahrzeugen und Kraftstoffen und Förderung alternativer Kraftstoffe und innovativer Antriebe</b>	
Kraftstoffstrategie der Bundesregierung <ul style="list-style-type: none"> <li>• Substitution von herkömmlichem Kraftstoff durch Biokraftstoffe</li> <li>• Innovative Antriebstechniken und Effizienzsteigerung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5 Mio. t</li> <li>• nicht quantifizierbar</li> </ul>
Weiterentwicklung der ACEA-Zusage der Automobilindustrie zur Reduzierung der spez. CO <sub>2</sub> -Emissionen von Neufahrzeugen	nicht quantifizierbar
Substitution von F-Gasen in mobilen Klimaanlage entsprechend der geplanten EU-Richtlinie über Emissionen aus Klimaanlage in Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG	0,5 - 1 Mio. t
Forcierte Einführung von Verbrauchsanzeigen in Neufahrzeugen	nicht quantifizierbar
<b>Information der Öffentlichkeit über ressourcenschonendes Verkehrsverhalten</b>	
Verstärkung der Kampagne „Neues Fahren“ (u. a. durch dena-Kampagne „effizient und mobil“)	3 Mio. t
<b>Summe der quantifizierbaren Maßnahmen</b>	<b>ca. 10 Mio. t</b>

# Maßnahmenvorschläge Private Haushalte

	CO <sub>2</sub> - Minderungspotenzial
<b>Öffentlichkeitsarbeit, Beratung, Innovation</b>	<b>0,7</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausbau der Deutschen Energie-Agentur (dena) als Kompetenzzentrum für Energieeffizienz</li> <li>• Durchführung von breit angelegten Öffentlichkeitskampagnen</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weiterbildungs- und Qualitätsoffensive (Investoren, Handwerk, Planer, Bauherren)</li> <li>• Ausbau der Ressortforschung des BMVBW für Innovationen zur Steigerung der Energieeffizienz; Verbesserung der Bauprodukte</li> <li>• Ausbau des Energieeinspar-Contracting im Wärmemarkt</li> </ul>	
<b>Fördermaßnahmen</b>	<b>2,8</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• KfW-Programme im Gebäudebereich</li> <li>• Marktanreizprogramm Biomasse</li> <li>• Marktanreizprogramm Sonne</li> <li>• Vor-Ort-Beratung</li> <li>• Stadtumbau Ost, Sozialer Wohnungsbau</li> </ul>	1,6 0,8 0,2 0,1 0,1
<b>Ordnungsrechtliche Maßnahmen</b>	<b>0,4</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einführung der EnEV 2006 und Energieausweise</li> <li>• Änderung des Wohneigentumsgesetzes</li> </ul>	
<b>Autonome Minderungseffekte</b>	<b>1,3-1,5</b>
<b>Summe</b>	<b>5,3</b>

# Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft

- Ökologischer Landbau
- Bodenschutz
- Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft
  - Biokraftstoffe
- Forstpolitik

## **Bodenschutz und Klimaschutz**

- Potenziale sollten weiter sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene ausgeschöpft werden
- 2. Bodenschutzbericht der Bundesregierung soll Anfang 2006 erscheinen

# Ausblick

- Durchführung eines **jährlichen Monitorings** unter der Federführung des BMU ab 2006
- Erfüllung der internationalen und europäischen Klimaschutzberichterstattungspflichten, z.B.
  - Nationaler Fortschrittsbericht (2005) (einmalig)
  - 4. Nationalbericht (2005) (alle 3-5 Jahre)
  - Nationaler Inventarreport 2006 (jährlich)

**Vielen Dank!**

weitere Informationen unter  
[www.bmu.de/klimaschutz](http://www.bmu.de/klimaschutz)



## Entwicklung von Strategien zur Anpassung an den Klimawandel – Herausforderungen und Lösungsvorschläge

Nicole Munz

### 1 Herausforderungen

Der Klimawandel ist eine der größten Herausforderungen vor denen die Menschheit heute steht. Trotz bereits eingeleiteter, anspruchsvoller Klimaschutzmaßnahmen werden sich die schon jetzt beobachtbaren Auswirkungen des Klimawandels verstärken. Es kommt nun vor allem darauf an, zukünftige Risiken des Klimawandels für die einzelnen Regionen in Deutschland zu erkennen und drohende Schäden durch aktiven Klimaschutz und Maßnahmen zur Anpassung zu begrenzen.

Um die Verwundbarkeit bestimmter Regionen oder Wirtschaftsbereiche gegenüber dem Klimawandel erfassen zu können, muss neben der unterschiedlichen Intensität des Klimawandels in Regionen und der Sensibilität der einzelnen Bereiche (Land-, Forst-, Wasserwirtschaft, Gesundheit, Tourismus etc.) gegenüber potenziellen Auswirkungen auch ihre strukturelle oder finanzielle Fähigkeit zur Anpassung betrachtet werden.

Die Ergebnisse von Klimamodellrechnungen unter Anwendung verschiedener Emissionsszenarien zeigen, dass bis 2080 unter anderem mit folgenden **Klimaänderungen** in Deutschland gerechnet werden muss<sup>1</sup>:

- Temperaturanstieg um 1,6 – 3,8 °C (Südwestdeutschland bis 4 °C)
- Mehr Hitzeextreme im Sommer
- Weniger Frosttage
- Feuchtere, wärmere Winter
- Niederschläge im Winter fallen vermehrt als Regen, weniger als Schnee
- Abnahme der Niederschläge im Sommer (insbes. Ostdeutschland)

Dieser Klimawandel wird schwerwiegende Folgen haben. Beispielsweise wird sich die Land- und Forstwirtschaft bis 2080 unter anderem auf die folgenden **Klimawirkungen** einstellen müssen:

- Sommerliche Abflüsse sinken um fast die Hälfte
- Verlust wildlebender Arten bis 50% im Osten Deutschlands
- Anbaueignung für nachwachsende Rohstoffe sinkt von 27 auf 22 Arten
- Bodenfruchtbarkeit sinkt durch den Abbau von Bodenkohlenstoff
- Erhöhte (Wind-) Erosionsgefahr durch trockenere Böden
- Verstärkte Ausbreitung von Pflanzenschädlingen und Pflanzenkrankheiten sowie Einwanderung neuer Schädlingsarten
- Waldbrandgefahr wächst
- Holzzuwachs sinkt um 14%

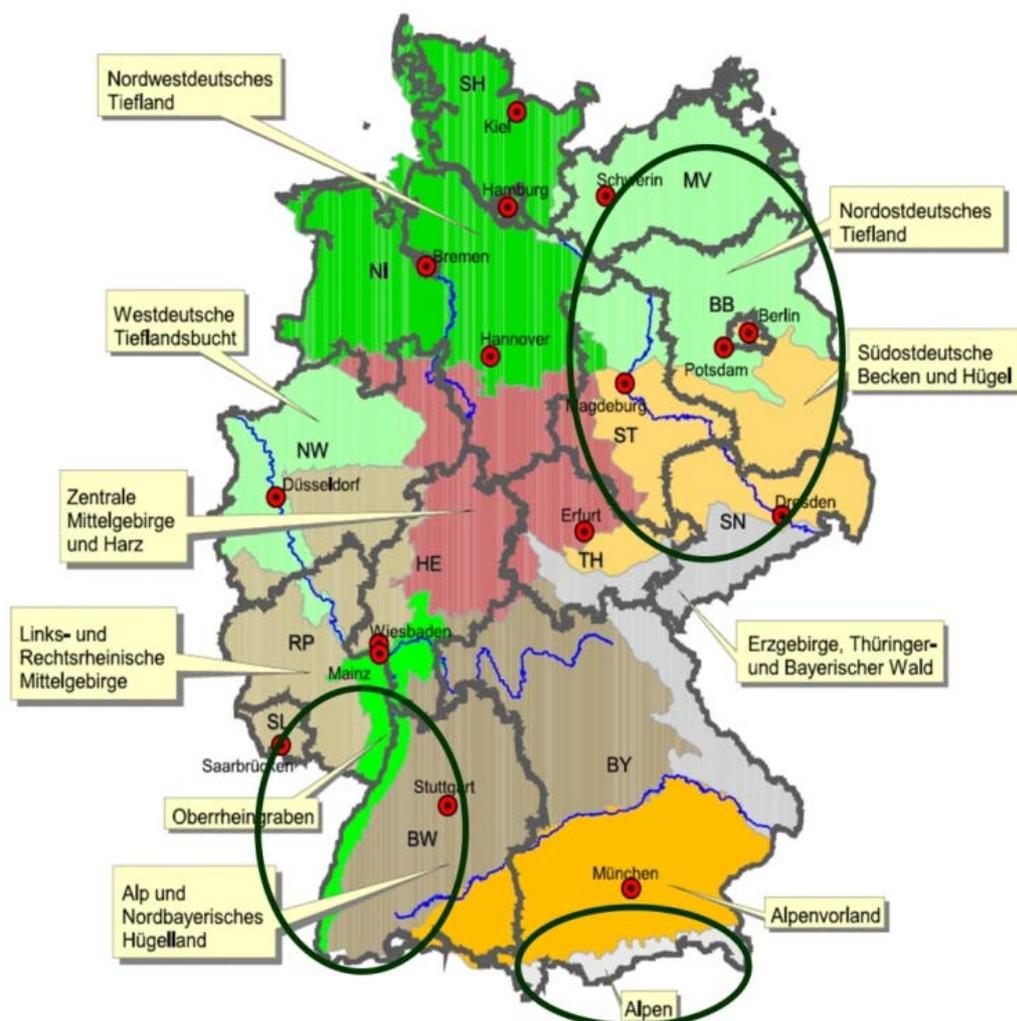
---

<sup>1</sup> „Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme“  
<http://www.uba.de/klimaschutz/index.htm>

Eine Expertenumfrage zeigte, dass Entscheidungsträger teilweise nur ungenügend für das Thema Klimaänderungen und die Notwendigkeit für **Anpassungsmaßnahmen** sensibilisiert sind. Das Wissen insbesondere zu regionalen Klimaänderungen und deren Folgen ist noch lückenhaft. Leicht verdrängt das Tagesgeschäft eine Problematik die eher mittel- oder langfristig angesiedelt werden muss. Es besteht die Herausforderung, ein größeres Bewusstsein für die Wichtigkeit der Anpassung an den Klimawandel zu schaffen.

Für alle untersuchten Regionen und Bereiche sind jedoch mehr oder weniger aufwändige Anpassungsoptionen verfügbar, die die Verwundbarkeit auf ein geringes Ausmaß reduzieren könnten. Die Umsetzung ist unterschiedlich weit voran geschritten: Im Hochwasserschutz und der Forstwirtschaft wurden bereits Maßnahmen ergriffen, während in Bereichen wie Gesundheitsschutz, Verkehr und Tourismus der Fortschritt der Maßnahmenumsetzung noch als mangelhaft benannt wird.

Zusammenfassend können in Deutschland viele verwundbare Gebiete identifiziert werden, wobei Südwestdeutschland (insbesondere der Oberrheingraben), die zentralen Teile Ostdeutschlands (Nordostdeutsches Tiefland, Südostdeutsche Becken und Hügel) und der Alpenraum als hoch vulnerabel einzustufen sind (siehe Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Besonders stark verwundbare Regionen in Deutschland

## 2 Handlungsnotwendigkeiten

Der Handlungsdruck, Anpassungsstrategien an Klimaänderungen zu entwickeln, entsteht nicht nur unmittelbar aus den sich voraussichtlich einstellenden, nachteiligen Folgen der Klimaänderungen und den sich daraus ergebenden Schäden und volkswirtschaftlichen Kosten in Deutschland. Die bestehenden Risiken durch Klimafolgen veranlassten auch die Vertragsparteien der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen, Verpflichtungen zur Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen in das Vertragswerk aufzunehmen:

*UNFCCC, Artikel 4 – Verpflichtungen*

*(1) **Alle Vertragsparteien werden unter Berücksichtigung ihrer gemeinsamen, aber unterschiedlichen Verantwortlichkeiten und ihrer speziellen nationalen und regionalen Entwicklungsprioritäten, Ziele und Gegebenheiten***

*a) [...]*

*b) **nationale [...] Programme erarbeiten, umsetzen, veröffentlichen und regelmäßig aktualisieren, in denen Maßnahmen zur Abschwächung der Klimaänderungen durch die Bekämpfung anthropogener Emissionen [...] sowie Maßnahmen zur Erleichterung einer angemessenen Anpassung an die Klimaänderungen vorgesehen sind;**[...]*

Mit der Ratifizierung der Klimarahmenkonvention ist Deutschland die völkerrechtliche Verpflichtung eingegangen, Maßnahmenprogramme umzusetzen, die eine systematische Anpassung an zu erwartende Klimaänderungen und deren Folgen ermöglichen. In dem am 13.07.2005 durch das Bundeskabinett verabschiedete neue deutsche Klimaschutzprogramm 2005 greift die Bundesregierung diese Herausforderung auf und beschließt, die erforderlichen Schritte einzuleiten, um ein umfassendes nationales Konzept zur Anpassung an Klimaänderungen in Deutschland zu entwickeln und umzusetzen.

## 3 Lösungsvorschläge

Ziel einer nachhaltigen Anpassungsstrategie ist es, alle gesellschaftlichen Akteure – vom Individuum über die Gemeinde bis hin zur nationalen Ebene – zu mobilisieren, so dass sie für ihren Entscheidungsbereich die durch Klimaänderungen entstehenden Risiken limitieren und Schäden vermeiden, aber auch sich eröffnende Chancen besser nutzen können.

Zur Unterstützung dieser Aufgabe – einschließlich einer fachlichen und umweltpolitischen Begleitung der Implementierung dieser Maßnahmen – beabsichtigt das Umweltbundesamt, ein Kompetenzzentrum „Klimafolgen und Anpassung“ einzurichten. Das Kompetenzzentrum soll das Wissen zu nationalen und regionalen Klimafolgen bündeln und als Informations- und Beratungsplattform für Entscheidungsträger in Verwaltung und Unternehmen fungieren. Die Entwicklung von geeigneten Konzepten und Maßnahmen zur Anpassung soll dadurch neben der nationalen auch auf regionaler und sektoraler Ebene angeregt und unterstützt werden. Die konzeptionelle und inhaltliche Arbeit ist bereits vorangeschritten:

### 1. Aktuelle, homogene Datengrundlage zu regionalen Klimaänderungen in Deutschland schaffen

Das Umweltbundesamt lässt im Rahmen eines F&E-Vorhabens zeitlich und räumlich hoch aufgelöste, regionale Klimaszenarien entwickeln, die unter Verwendung drei verschiedener Emissionsszenarien des IPCC<sup>2</sup> (A1B, B1, A2) Aussagen über das mögliche Klima in Deutschland bis zum Jahre 2100 wiedergeben. Dabei werden zwei unterschiedliche Regionalisierungsmethoden eingesetzt: das dynamische Klimamodell REMO des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg und das statistische Regionalisierungsverfahren WETREG von Meteo-Research. Diese Daten werden etwa ab Mitte 2006 vorliegen und interessierten Nutzern kostenfrei zu weiterführender regionaler Klimafolgenforschung zur Verfügung gestellt.

## **2. „Fachinformationssystem Klimaangepassung“ entwickeln**

Die errechneten Rohdaten der Klimaszenarien werden aufbereitet, analysiert und – mit anderen Geodaten verknüpft – zu einem Fachinformationssystem Klimaangepassung zusammengestellt. Das Fachinformationssystem wird in Form von thematischem, interaktivem Kartenmaterial die künftigen Chancen und Risiken des Klimawandels visualisieren und soll als Werkzeug zur Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen genutzt werden können.

## **3. Wissenssynthese zu Klimafolgen und Anpassung durchführen**

Mit der Zusammenstellung und Synthese bestehender und zukünftiger Studien und Forschungsergebnisse zu Klimafolgen und Anpassung sollen existierendes Know-how zur Anwendung gebracht und Synergien entwickelt werden.

## **4. Forschungsimpulse ableiten**

Sowohl durch die Bereitstellung einer homogenen Datengrundlage, als auch durch die zielgruppenorientierte Zusammenführung des Fachwissens zu Klimafolgen und Anpassung, sollen neue Impulse für weitere Forschungsaktivitäten zu Klimawirkungen gegeben werden.

## **5. Kommunikation und Netzwerkarbeit**

Eine wichtige Aufgabe zur Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen ist die breite Kommunikation des Wissens, um einerseits Sensibilität für das Thema zu schaffen (z.B. durch Öffentlichkeitsarbeit, gezielte Pressekontakte) und andererseits inhaltlich-fachliche Information zu vermitteln (z.B. über Netzwerkarbeit, Rundschreiben). Die Netzwerke, die das Umweltbundesamt bereits aufgebaut hat, sind auf den Informations- und Erfahrungsaustausch auf internationaler Ebene (Netzwerk der europäischen Umweltagenturen, darin die „Interest Group Climate Change and Adaptation“) wie auch auf nationaler Ebene („Fachgespräch Klimafolgen“ mit Länderexperten, Stakeholder-Workshop „Klimaangepassung“ mit Entscheidungsträgern aus Verwaltung, Unternehmen und Interessensverbänden) ausgerichtet.

Das Erreichen von Emissionsminderungszielen bleibt die prioritäre Aufgabe des Klimaschutzes, da es an den Ursachen des Klimawandels ansetzt und dessen Ausmaß reduziert. Aus diesem Grund wird die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen Anstrengungen zur Emissionsminderung nicht ersetzen, sondern ergänzen. Frei nach dem Zitat von Erich Kästner: *„Es ist ungleich besser, beizeiten Dämme zu bauen, als darauf zu hoffen, dass die Flut Vernunft annimmt.“* – ist aufgrund der unausweichlichen Klimawirkungen ein zusätzliches Handeln dringend erforderlich.

---

<sup>2</sup> IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

*Manuskript zum Workshop Klimaänderungen - Herausforderung für den Bodenschutz  
UBA, Dessau  
28.-29. September 2005*

**Klimawandel – Adaptation und Mitigation im Bereich Land- und Forstwirtschaft  
aus der Sicht des BMVEL**

Dr. Claus Bormuth

Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft  
Referat Koordination der Umweltangelegenheiten

*Folie 1*

**Übersicht**

1. Ausgangssituation
2. Maßnahmen der Agrarpolitik
3. Aktivitäten des BMVEL im Rahmen der Klimarahmenkonvention und des Kyoto-  
Protokolls
4. Klimaforschung im BMVEL
5. Ausblick

**Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft 1990/2003**  
**[Mt a<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>-Äquivalent]<sup>1</sup>**

Emissionsbereich	CO <sub>2</sub>		CH <sub>4</sub>		N <sub>2</sub> O	
	1990	2003	1990	2003	1990	2003
Wiederkäuerverdauung <sup>2</sup>	-	-	34,3	25,2	-	-
Wirtschaftsdünger	-	-	27,1	23,1	4,5	2,9
Emissionen aus Bodennutzung	43,6	42,8	-0,7	-0,6	43,9	36,8
Energieemissionen	13,3	6,7	0,3	0,0	0,1	0,1
Emissionen aus der N-Düngerherstellung <sup>3</sup>	5,3	5,1	8,8	8,4	0,3	0,3
Summe Emissionen	62,2	54,6	69,8	56,1	48,8	40,1
Emissionen aller Sektoren	1.022,6	879,1	132,1	75,2	86,4	63,7

1 Soweit nicht anders angegeben entstammen die Daten den CRF-Tabellen zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2003, Nationaler Inventarbericht 2005 (NIR) für die Bundesrepublik Deutschland.

2 Darin sind die Emissionen aus der Schweinehaltung enthalten (rd. 3 % der Emissionen aus der Tierhaltung)

3 Berechnung nach Patyk und Reinhardt, 1997 zitiert in F.-J. Bockisch (Hrsg.), Bewertung der Verfahren der ökologischen und konventionellen landwirtschaftlichen Produktion im Hinblick auf den Energieeinsatz und bestimmte Schadgasemissionen, Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 211, 2000

Folie 3

**THG-Bilanz für den Sektor Land- und Forstwirtschaft [Mt a<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>-Äquivalent]**

<b>Emissionen</b>	<b>151</b>
Weitere Betriebsmittel	?
Ober- und unterirdische Biomasse der Wälder	75
Holzeinschlag	47
Nahrungsmittel und Nachwachsende Rohstoffe	46
<b>Summe Festlegungen</b>	<b>168</b>

*Folie 4*

### **Maßnahmen der Agrarpolitik für den Klimaschutz**

- Gemeinsame Agrarpolitik
- Ökologischer Landbau
- Bodenschutz
- Agrarumweltmaßnahmen
- Agrarinvestitionsförderung
- Erneuerbare Energien Gesetz
- Biokraftstoffe
- Forstpolitik

Folie 5

**Gemeinsame Agrarpolitik**

Maßnahme	Wirkung
<ul style="list-style-type: none"><li>• Rückführung der klassischen Instrumente der GAP</li><li>• Entkopplung von Direktzahlungen</li><li>• Obligatorische Modulation</li></ul>	Begünstigung extensiver Formen der Landwirtschaft: <ul style="list-style-type: none"><li>• Rückgang des N-Düngemittel-einsatzes</li><li>• Rückgang der Rinderbestände</li></ul>

Folie 6

**Ökologischer Landbau**

Maßnahmen	Wirkung
Bundesprogramm Ökologischer Landbau: <ul style="list-style-type: none"><li>• Verbesserung der Rahmenbedingungen</li><li>• Unterstützung der Wirtschaftsbeteiligten hin zu größeren Marktanteilen für Öko-Produkte</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rückgang des mineralischen N-Dünger-Einsatzes</li><li>• Abnahme der Tierzahlen</li></ul>

Folie 7

**Bodenschutz**

Maßnahme	Wirkung
Bundes-BodenschutzG (Gute fachliche Praxis)	Schutz der organischen Substanz der Böden
BundesnaturschutzG (Verbot des Grünlandumbruchs)	Schutz der organischen Substanz der Böden
EU-Bodenschutzstrategie (GD-Umwelt plant BodenrahmenRL)	Schutz der organischen Substanz der Böden
Düngemittelrecht (z.Z. Novellierung DüngeVO)	Begrenzung des N-Düngemittleinsatzes

### Agrarumweltmaßnahmen

Maßnahme	Wirkung
<p>Bund und Länder fördern im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• extensive Produktionsverfahren im Ackerbau, Dauerkulturen und Grünland</li><li>• Umwandlung von Ackerland in Grünland</li><li>• Ökologischer Landbau</li><li>• Mehrjährige Stilllegung</li></ul>	<p>Begünstigung extensiver Formen der Landwirtschaft:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Rückgang des Düngemittleinsatzes</li><li>• Rückgang der Rinderbestände</li></ul>

*Folie 9*

**Agrarinvestitionsförderprogramm (AFP)**

Z.B. Biogasanlagen, Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern oder Wärme- und Kälte­dämmung, Umstellung von Heizanlagen, etc.

Das AFP macht die Begrenzung der Tierdichte zur Fördervoraussetzung

Folie 10

**Erneuerbare Energien Gesetz (EEG)**

Maßnahme	Wirkung
Novellierung des EEG zum 1.08.2004 verbessert die Vergütung der Verstromung von Biomasse (Preisbindung und ohne staatliche Förderung)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Substitution von fossilen Energieträgern</li><li>• Nutzung von Methan aus Wirtschaftsdüngern</li></ul>

*Folie 11*

## **Biokraftstoffe**

Gemäß Richtlinie 2003/30/EG zu Biokraftstoffen muß sich der Anteil Biokraftstoffe am mineralischen Treibstoffverbrauch des Verkehrssektors wie folgt entwickeln:

- Bis 2005 mindestens 2 % Anteil Biokraftstoffe
- Bis 2010 mindestens 5,75 % Anteil Biokraftstoffe

## Forstpolitik

Maßnahme	Wirkung
<ul style="list-style-type: none"><li>• Landesplanerische Vorgaben</li><li>• WaldG des Bundes und der Länder</li><li>• Umweltverträglichkeitsprüfung</li></ul>	Praktisch keine Entwaldung ohne vergleichbare Erstaufforstung
Weitere Förderungen insbesondere von Erstaufforstungen und zur nachhaltigen Waldbewirtschaftung	<ul style="list-style-type: none"><li>• Zunahme der Waldfläche</li><li>• Verbesserung der Anpassungsfähigkeit</li></ul>
Charta für Holz (Steigerung des Holzverbrauchs um 20 % in den nächsten 10 Jahren)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vermehrte Nutzung von Holz zur Substitution von fossilen Energieträgern</li></ul>

**Aktivitäten des BMVEL im internationalen Zusammenhang**

- Nationaler Inventarbericht
- Flexible Kyoto-Mechanismen (Senken)
- Einführung von Politiken und Maßnahmen im Rahmen der Weiterentwicklung der Kyoto-Architektur nach 2012 (Schutz biologisch terrestrischer Kohlenstoffvorräte, d.h. insbesondere Schutz von Urwäldern)

**Klimaforschung im Geschäftsbereich des BMVEL bzw durch das BMVEL institutionell geförderte Einrichtungen**

- Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig
- Bundesforschungsanstalt für Holz- und Forstwirtschaft (BFH), Hamburg
- Bundesanstalt für Züchtungsforschung an Kulturpflanzen (BAZ), Quedlinburg
- Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA), Berlin und Braunschweig
- Bundesforschungsanstalt für Fischerei (BFAFi), Hamburg
- Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e.V. (ZALF), Müncheberg
- Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), Potsdam-Bornim

### **Senatsarbeitsgruppe Klimaänderungen**

- koordiniert die konkreten anstaltsübergreifenden Aktivitäten
- besteht aus Fachleuten der verschiedenen Einrichtungen, die ähnliche Gebiete aus unterschiedlichen Blickwinkeln bearbeiten
- bündelt Kompetenzen und macht Informationen für den Senat, das BMVEL oder die Fachwelt verfügbar (Symposien, Workshops, ad hoc Papiere etc.)
- regen neue Forschungsthemen an
- z.Z. 157 laufende, abgeschlossene bzw. geplante Einzelvorhaben
- Sprecher: U. Dämmgen (FAL), W.U. Kribitzsch (BFH)
- [www.klima-bmvel.de](http://www.klima-bmvel.de)

*Folie 16*

**Ausblick**

Nationales Klimaschutzprogramm. Sechster Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe „CO<sub>2</sub>-Reduktion“  
(Bundestagsdrucksache 15/5931)

*Fortsetzung der benannten Maßnahmen... Die Möglichkeiten weitere Anreize, um die positiven Leistungen der Land- und Forstwirtschaft für den Klimaschutz weiterhin zu nutzen und auszubauen, sind zu prüfen.*

*Folie 17*

**Zum Nachlesen**

Bericht zum Klimaschutz im Bereich Land- und Forstwirtschaft.  
BMVEL, 18.01.2005

<http://www.verbraucherministerium.de/index-000DBD387CAD11EEACE36521C0A8D816.html>



## **Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen – Fördermaßnahmen des BMBF**

Paul Bergweiler, Gerd-Henning Klein  
Projekträger des BMBF im DLR, Bonn

### 1. Forschungsförderprogrammatischer Hintergrund

Auf der VN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung (UNCED), in der neben der Agenda 21 auch die Klimarahmenkonvention (UNFCCC) beschlossen wurde, präsentierte Deutschland im Jahr 1992 die BMBF-Forschungsrahmenkonzeption „Globale Umweltveränderungen“. Die seitdem erschienenen Ausgaben (1993, 1996, 2000, 2004) des Bundesberichts Forschung dokumentieren eine dem internationalen umwelt- und entwicklungspolitischen Diskurs folgende Tendenz der BMBF-Forschungsförderung zur Aufweitung des Fokus vom engeren Kontext „Umwelt“ hin zum umfassenderen Kontext „Nachhaltigkeit“ mit seinen drei Dimensionen Umwelt, Wirtschaft und Soziales.

Analog verlief die forschungsförderprogrammatische Entwicklung beim Thema Klimawandel, dessen Erforschung ((Klimasystem, Klimawirkungen, Vulnerabilität, Handlungsoptionen) BMBF im Rahmen des Förderschwerpunkts „Globaler Wandel“ seit vielen Jahren massiv fördert: durch Projektförderung (zuletzt u.a. DEKLIM), institutionelle Förderung (u.a. HGF, MPG, WGL) und Forschungsinfrastruktur (u.a. DKRZ). Vor dem Hintergrund internationaler Forschungsprogramme zum globalen Wandel (WCRP, IGBP, IHDP), darunter zum Klimawandel, sowie internationaler Bemühungen (IPCC) um Konsensfindung über den Wissensstand und die daraus zu ziehenden Folgerungen, sowie vor dem Hintergrund der Resultate der Nachfolgekonferenzen (u.a. Kyoto) zur Klimarahmenkonvention, gewann das Thema Klimaschutz mit seinen komplementären Aspekten Mitigation (Minderung der für den Klimawandel als ursächlich angesehenen Treibhausgasemissionen) und Adaptation (Anpassung an Auswirkungen eines Klimawandels) in der Forschungsförderung an Bedeutung.

Den nachhaltigkeitspolitischen Hintergrund dieser forschungsförderprogrammatischen Entwicklung bilden die im Jahr 2001 von der EU verabschiedete Nachhaltigkeitsstrategie ([http://europa.eu.int/comm/sustainable/docs/strategy\\_en.pdf](http://europa.eu.int/comm/sustainable/docs/strategy_en.pdf)), zur Zeit Gegenstand eines Konsultationsprozesses zur Überprüfung/Fortschreibung ([http://www.auswaertiges-amt.de/www/de/infoservice/download/pdf/eu/sds\\_041101.pdf](http://www.auswaertiges-amt.de/www/de/infoservice/download/pdf/eu/sds_041101.pdf)), und die im Jahr 2002 von der Bundesregierung beschlossene nationale Nachhaltigkeitsstrategie (Bilanz 2005: <http://www.bundesregierung.de/Anlage871514/wegweiser.pdf>), in der Klimaschutz zu den prioritären Handlungsfeldern zählt („Energie effizient nutzen – das Klima wirksam schützen“), sowie das inzwischen (in 2005) novellierte nationale Klimaschutzprogramm (<http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/35742.php>).

Schlüsselfunktion hat beim Klimaschutz das Problemlösungspotential klimaschutzrelevanter Innovationen in Industrie und Wirtschaft. Nicht zuletzt das im Jahr 2005 in deutsches Recht umgesetzte EU-Recht zum Handel mit Treibhausgasemissionsrechten stellt große Herausforderungen an die Innovationsfähigkeit der deutschen Wirtschaft – zunächst vor allem in energieintensiven Branchen. Forschungsförderung soll und kann hier exemplarisch demonstrieren helfen, wie Unternehmen innovatorisch zum Klimaschutz beitragen und damit zugleich ihre Wettbewerbsfähigkeit stärken können.

Vor diesem Hintergrund verlagert sich die Klimaschutzbezogene Projektförderung des BMBF von bisher mehr wissensorientierter Forschung (Klimasystem, Klimawirkungen, Vulnerabilität, Handlungsoptionen), zuletzt im Deutschen Klimaforschungsprogramm DEKLIM (Laufzeit 2001-2005; Fördervolumen 39,4 Mio. €), immer stärker hin zu mehr umsetzungsorientierter Forschung – ohne Vernachlässigung des auch weiterhin bestehenden Bedarfs an Grundlagenwissen (dessen Deckung künftig primär im Rahmen institutionell geförderter Forschung erfolgen soll, v.a. im Programm „Atmosphäre und Klima“ des HGF-Forschungsbereichs „Erde und Umwelt“) und diesbezüglicher Forschungsinfrastruktur (u.a. Deutsches Klimarechenzentrum, DKRZ).

## 2. Rahmenprogramm „Forschung für die Nachhaltigkeit“

Der o.g. Trend in der Forschungsförderung manifestiert sich auch in den Rahmenprogrammen, in welche die BMBF-Förderung der Forschung zum globalen Wandel (darunter Klima- und Atmosphärenforschung) eingebettet war bzw. ist: das im Jahr 1997 aufgelegte Rahmenprogramm „Forschung für die Umwelt“ wurde abgelöst durch das im Jahr 2004 aufgelegte, umsetzungsorientierte Rahmenprogramm „Forschung für die Nachhaltigkeit“ (<http://www.fona.de>) und das hierzu komplementäre, wissensorientierte Rahmenprogramm „System Erde“,

Das Rahmenprogramm „Forschung für die Nachhaltigkeit“ hat folgende Struktur (Aktionsfelder und nachgeordnete Themenfelder):

- Konzepte für Nachhaltigkeit in Industrie und Wirtschaft
  - Bedürfnisfelder und zugehörige Wertschöpfungsketten
  - Rohstoffnahe Produktionssysteme
  - Schlüsseltechnologien für den Systemwandel
  - Erfolgreiche Geschäftsmodelle in einer nachhaltigen Wirtschaft
  - Klimaschutzstrategien
- Nachhaltige Nutzungskonzepte für Regionen
  - Urbane Räume: Flächenmanagement, mega-urbane Agglomerationen
  - Ländliche Räume: Nachhaltige Land- und Forstwirtschaft
  - Sensible Räume: Küstenregionen, marine Aquakultur
- Konzepte für eine Nachhaltige Nutzung von natürlichen Ressourcen
  - Ressource Wasser
  - Biologische Ressourcen
- Gesellschaftliches Handeln in Richtung Nachhaltigkeit
  - Wirkungsmechanismen der Globalisierung verstehen; dem Weltmarkt eine soziale und ökologische Richtung geben
  - Soziodemografischer Wandel
  - Ökologische Modernisierung der Gesellschaft

In diesem Programm zu fördernde Forschung ist typischerweise sparten-, disziplinen- und ressortübergreifend angelegt. Ziele und Förderrichtlinien von Fördermaßnahmen zur Umsetzung des Rahmenprogramms sollen daher vom BMBF mit den betreffenden Fachressorts abgestimmt werden – über das vor der Bewilligung von Einzelprojekten bereits praktizierte Verfahren der Forschungsfrühkoordination weit hinausgehend.

## 3. „Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“

Das einem dualen Ansatz (Mitigation/Adaptation) folgende Konzept des Themenfeldes „Klimaschutzstrategien“ im Aktionsfeld „Konzepte für Nachhaltigkeit und Wirtschaft“ des Rahmenprogramms „Forschung für die Nachhaltigkeit“ wurde Sondierungen in der deutschen Wirtschaft (Durchführung zum Thema Mitigation durch DECHEMA, zum Thema Adaptation durch VDI-TZ) mit der im Herbst Ende 2004 aufgelegten Fördermaßnahme „Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ umgesetzt (Laufzeit: 2005-2009; Fördersumme: 30 Mio. €; Bekanntmachung der Förderrichtlinien: <http://www.bmbf.de/foerderungen/3165.php>):

- Teilaspekt A (Mitigation): Entwicklung neuer Technologien, Verfahren und Strategien, mit denen eine deutliche Emissionsminderung klimarelevanter Gase, besonders aus industriellen Prozessen, erreicht werden kann (die Maßnahme flankiert thematisch verwandte Maßnahmen anderer Ressorts, darunter BMWA, BMVBW, BMVEL, BMU); Förderansätze:
  - Forschungs- und Entwicklungs-Vorhaben, die auf kurzfristig umsetzbare Technologien, Produkte, Dienstleistungen oder Strategien abzielen – und zugleich auf kurzfristige Stärkung der Konkurrenzfähigkeit;
  - Entwicklung von mittel- bis langfristig verfügbaren Innovationen, bei denen noch deutliche Vorarbeiten konzeptioneller oder wissenschaftlicher Art notwendig sind;
  - Erarbeitung oder Anpassung von Methoden zur Vermittlung des Nachhaltigkeitsziels Klimaschutz, insbesondere im Hinblick auf Kommunikation und Transfer des erarbeiteten Wissens in die gewerbliche Wirtschaft und die Gesellschaft;
  
- Teilaspekt B (Adaptation): Entwicklung, Umsetzung und Verbreitung von Techniken und Strategien für eine effektive und effiziente Anpassung an das gegenwärtige Klima mit seinen Wetterextremen und seinen absehbaren Veränderungen; Förderansätze:
  - Forschungs- und Entwicklungs-Vorhaben, die konkrete Technologien, Produkte, Dienstleistungen oder Strategien für eine verbesserte Anpassung zum Ziel haben – und zugleich eine Stärkung der Konkurrenzfähigkeit;
  - Entwicklung oder Weiterentwicklung von thematischen oder regionalen Kompetenznetzwerken (für die Dauer von zunächst einem Jahr) für eine verbesserte Anpassung an Klimatrends und Extremwetter;
  - Erarbeitung oder Anpassung von Methoden zur Vermittlung nachhaltigen Umgangs mit dem Klimawandel auf verschiedenen Ebenen der Bildung, insbesondere im Hinblick auf Information und Kommunikation, den Transfer erarbeiteten Wissens sowie die Zusammenarbeit zwischen unterschiedlichen Akteuren.

Aus den unterschiedlichsten Bereichen von Wirtschaft und Gesellschaft sind insgesamt 228 Skizzen eingegangen, davon 60% zum Thema Mitigation (Branchenspektrum: u.a. Energie, Chemie, Stahl/Eisen, Mobilität/Verkehr, Baustoffe, Abfall/Abwasser, Agrar, Forst/Holz) und 40% zum Thema Adaptation (Branchenspektrum: u.a. Agrar, Forst/Holz, Wasser, Städteplanung/Städtebau, Touristik, Finanzdienstleistung). Bezug zum Thema Bodenschutz haben einige Skizzen, primär zur Adaptation (Land-, Forst- und Wasserwirtschaft), aber auch zur Mitigation (Landwirtschaft). Die Prüfung der nach Abschluss des Skizzenauswahlverfahrens vom Förderer erbetenen Förderanträge ist im Gange.



## Zusammenfassung und weiterer Handlungsbedarf

Die Ergebnisse des zweitägigen Workshops: „Klimaänderungen- Herausforderungen für den Bodenschutz“ lassen sich in den folgenden 5 Kernaussagen zusammenfassen.

### **I. Klimawandel ist real.**

Auf Grundlage der vorliegenden Klimaprognosen ergeben sich für den Bodenschutz neue Herausforderungen im Sinne einer nachhaltigen Ressourcennutzung.

### **II. Böden sind von den Klimaauswirkungen unmittelbar betroffen.**

Gebraucht werden Strategien und Maßnahmen, welche die negativen Auswirkungen der Klimaänderungen auf die Ressource Boden so gering wie möglich halten.

### **III. Wirkungen der Klimaänderungen werden regional unterschiedlich sein.**

Die für den Bodenschutz zu erarbeitenden Konzepte und Strategien müssen daher den regionalspezifischen Aspekten Rechnung tragen.

### **IV. Boden beeinflusst das Klimageschehen. Er spielt eine entscheidende Rolle im globalen Kohlendioxid-Haushalt.**

Mit umweltfreundlichen Bodennutzungs- und Bewirtschaftungssystemen kann Kohlenstoff im Boden und in den terrestrischen Ökosystemen gebunden werden.

### **V. Die landwirtschaftliche Bodennutzung, insbesondere der Pflanzenbau, ist von den Klimaänderungen unmittelbar betroffen.**

Änderungen der Fruchtfolgengestaltung, Anpassungen der Saattermine, die Wahl alternativer Sorten und Arten, Änderungen des Wassermanagements, Anpassungen der Düngung und Bodenbearbeitung (Schutz vor Bodenerosion) an die prognostizierten Klimaänderungen sind mögliche Wege diesen Entwicklungen Rechnung zu tragen.

Der Workshop zeigte, dass die Wechselwirkungen zwischen Klimaänderungen und den Veränderungen des Bodenzustandes sehr komplexer Natur und noch nicht in ihrer Gesamtheit untersucht sind.

Im Vordergrund der Forschungsaktivitäten stehen bisher die Vorhersage und Quantifizierung der terrestrischen Kohlenstoffbilanz von Böden und die Prozesse des Kohlenstoff-Umsatzes im System Atmosphäre-Bestand-Boden.

Hier ist zukünftig eine Betrachtung der Gesamtprozesse im Boden (Wasserhaushalt, Gehalt an organischer Substanz) und der Wechselwirkungen zwischen Boden, Vegetation, Atmosphäre und Klima notwendig.

**Es fehlt die zusammenfassende komplexe Darstellung und Analyse aller mit den Klimaänderungen in Zusammenhang stehenden Sachverhalten zum Bodenschutz und eine darauf aufbauende Ableitung/ Empfehlung geeigneter Methoden- und Anpassungsstrategien.** Bestehende Daten- und Kenntnisdefizite können nur erkannt und aufgearbeitet werden, wenn alle von den Klimaänderungen betroffenen Fachbereiche ressortübergreifend zusammenarbeiten und einen fortlaufenden Datenaustausch realisieren.

## **I. Klimawandel ist real.**

Auf Grundlage der vorliegenden Klimaprognosen ergeben sich für den Bodenschutz neue Herausforderungen im Sinne einer nachhaltigen Ressourcennutzung.

Änderungen der Durchschnittswerte für Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeiten sind weltweit bereits zweifelsfrei nachweisbar. Zahlreiche Studien zeigen, dass die Klimaänderungen des 20. Jahrhunderts deutliche Auswirkungen auf die extremen Wetterereignisse haben. Eine im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführte Studie des Instituts für Atmosphäre und Umwelt der Universität Frankfurt/Main weist beispielsweise für Deutschland folgende Tendenzen aus: Die Temperatur ist im Mittel gestiegen. In allen Jahreszeiten werden extrem warme Tage und weniger kalte Tage wahrscheinlicher. Die größten Risiken stellen beim Niederschlag winterliche Starkniederschläge und Sommertrockenheit dar.

Auf Grundlage der vorliegenden Klimaprognosen ergeben sich für den Bodenschutz neue Herausforderungen im Sinne einer nachhaltigen Ressourcennutzung.

### Empfehlungen aus dem Workshop:

→ Es besteht Bedarf an Maßnahmen und Handlungsstrategien:

- a) zum Schutz des Klimas (Verminderung des Ausstoßes klimarelevanter Spurengase: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) und
- b) zur vorbeugenden Minderung klimabedingter Schäden.

Zur Ableitung geeigneter Vorsorge-, Anpassungs- und Managementstrategien sind Projekte mit interdisziplinären, ganzheitlichen Ansätzen erforderlich.

→ Vernetztes Arbeiten von Klimaforschung, Bodenschutz, Bauleitplanung, Landwirtschaft u.a. sowie der Politik

## **II. Böden sind von den Klimaauswirkungen unmittelbar betroffen.**

Gebraucht werden Strategien und Maßnahmen, welche die negativen Auswirkungen der Klimaänderungen auf die Ressource Boden so gering wie möglich halten.

### **Betroffenheit des Bodens**

Vergleichsweise kleine bzw. lokale Änderungen meteorologischer Parameter (insbesondere Temperatur und Niederschlag) haben erhebliche Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt, insbesondere auf Verdunstung, Grundwasserneubildung und Gebietsabfluss.

Höhere Temperaturen, geringere Niederschläge und längere Trockenperioden führen insbesondere im Sommer zu einer verringerten Bodenfeuchte und zu einer Verstärkung der Erosionsgefahr. Diese hat beispielsweise Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Nutzung des Bodens.

In Folge der prognostizierten Anstiege der winterlichen Starkniederschläge muss mit einer Risikoverstärkung von Hochwasserereignissen bzw. Überschwemmungen gerechnet werden.

### Empfehlungen aus dem Workshop:

→ Anpassung landwirtschaftlicher Betriebsstrukturen an die prognostizierten Änderungen des Ertragspotentials in Folge verminderten Wasserdargebots und der Klimaerwärmung.

→ Entwicklung von Strategien und Konzepten für umweltfreundliche und standortangepasste Bewirtschaftungssysteme, um die Ressource Boden zu schützen.

- Aufrechterhaltung der Grundwasserneubildungsrate von land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen als Grundlage zur Sicherung einer nachhaltigen Trinkwasserversorgung in Deutschland.
- Erhaltung des Wasserspeichervermögens im Boden durch konservierende Bodenbearbeitung.
- Verstärkte Berücksichtigung zu erwartender Änderungen im Wasserhaushalt bei der Entwicklungsplanung von Landschaftsgebieten (standortangepasste Wasserbewirtschaftung).
- Nutzung der langjährig in den Lysimeterstationen erhobenen bodenhydrologischen und meteorologischen Daten zur Validierung und Kalibrierung von Modellen zur Abschätzung von Bodenzustandsdaten im Hinblick auf Klimaänderungen.
- Wasser in der Landschaft halten z.B. durch landschaftstypische Elemente (Sölle), Schaffung von Retentionsflächen für Hochwasserereignisse.

### **Rolle der Landnutzung**

Erfahrungen aus der Landnutzung der vergangenen Jahrhunderte zeigen: Falsche (nicht standortangepasste und nachhaltige) Landnutzung verstärkt die Einflüsse der Klimaereignisse auf den Boden und das Grundwasser (Verminderung des Wasserspeichervermögens, Erosion, Verdichtung und Versiegelung)

#### Empfehlung aus dem Workshop:

- Ausbau der standortangepassten und nachhaltigen Bodennutzung.

### **III. Wirkungen der Klimaänderungen werden regional unterschiedlich sein.**

Die für den Bodenschutz zu erarbeitenden Konzepte und Strategien müssen daher den regionalspezifischen Aspekten Rechnung tragen.

Es ist unstrittig, dass regionalspezifische lokale Klimaänderungen eintreten, die sich insbesondere beim wichtigen Klimaparameter Niederschlag, deutlich von der Entwicklung in anderen Regionen Deutschlands unterscheiden. Extreme Starkniederschläge treten im Osten Deutschlands seltener, im Westen dagegen häufiger auf. Die für den Bodenschutz zu erarbeitenden Konzepte und Strategien müssen daher den regionalspezifischen Aspekten Rechnung tragen. Die Bundesländer haben Klimastudien beauftragt, um regionalspezifische Klimaänderungen und ihre Auswirkungen auf Mikroorganismen, Pflanzen, Tiere und den Menschen zu untersuchen. Diese Studienergebnisse bilden eine gute fachliche Basis, um in der Diskussion um Anpassungsstrategien weiter voran zu kommen.

#### Empfehlungen aus dem Workshop:

- Entwicklung und Umsetzung regionaler Handlungs- und Anpassungsstrategien für den Umgang mit der Ressource Boden.
- Einrichtung von Fonds zur strukturellen Förderung von Klimaschutzprogrammen.
- Einbeziehung der Kommunen in die nationalen Programme und Maßnahmen zum Klimaschutz.
- Verbesserung der Zusammenarbeit und des Informationsaustausches auf kommunaler Ebene im Rahmen der Klimadiskussion und der Abstimmung der weiteren regionalspezifischen Handlungsstrategien.
- Förderung von Kapazitäten für den lokalen Klimaschutz (z.B. durch Weiterbildungsmaßnahmen für MitarbeiterInnen).

#### **IV. Boden beeinflusst das Klimageschehen. Er spielt eine entscheidende Rolle im globalen Kohlendioxid-Haushalt.**

Mit umweltfreundlichen Bodennutzungs- und Bewirtschaftungssystemen kann Kohlenstoff im Boden und in den terrestrischen Ökosystemen gebunden werden.

Kohlendioxid ist mit einem Anteil von 50 Prozent das wichtigste anthropogene Treibhausgas. Eine weitere Erhöhung des Kohlendioxids in der Atmosphäre lässt eine Zunahme der globalen Temperaturen erwarten. Weltweit der größte und gleichzeitig langfristige aktive terrestrische Speicher für organischen Kohlenstoff ist Boden.

Eine Schlüsselrolle spielt dabei der Humusanteil im Boden, welcher durch die Verrottung organischer Substanzen entsteht. Er kann Kohlenstoff im Boden binden und damit einen Beitrag zur Minderung des Kohlendioxid-Gehaltes in der Atmosphäre leisten.

Die Rodung von Wäldern, die Trockenlegung von Sümpfen und Mooren, sowie die Ausdehnung der Landwirtschaftsflächen beschleunigen den Abbau und Zerfall von Humus. Landnutzungsänderungen dieser Form bilden neben industrielle Aktivitäten, die eigentlichen Ursache für den anthropogen bedingten Anstieg der Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre.

Mit umweltfreundlichen Bodennutzungs- und Bewirtschaftungssystemen kann Kohlenstoff im Boden und in den terrestrischen Ökosystemen gebunden werden.

Eine Verbesserung der Kohlendioxid-Bilanz für landwirtschaftlich genutzten Boden wird auf zwei Wegen erreicht:

- a) Vermehrte Zufuhr an organischer Substanz, beispielsweise durch erhöhte Zufuhr an Pflanzenrückständen, reduzierte Bodenbearbeitung, Zwischenfruchtanbau, Anbau mehrjähriger Futterpflanzen, Düngung und
- b) Verlangsamung des Abbaus organischer Substanz, beispielsweise durch nachhaltige standortangepasste Bodennutzung (Verhinderung der Boden- und Winderosion, konservierende Bodenbearbeitung mit Mulchsaat und Verringerung der Bodenbearbeitungsintensität).

#### Empfehlungen aus dem Workshop:

- Weitere Forschung zu Fragen der Kohlenstoffstabilisierung im Boden, z.B. Interaktion zwischen chemischen und biologischen Prozessen.
- Zusammenstellung der notwendigen Basisdaten, zur belastbaren Abschätzung der Entwicklung der Boden-Kohlenstoff-Vorräte.
- Untersuchungen von Wechselwirkung und Einfluss des Stickstoff- und Kohlenstoffkreislauf im Boden. Gewinnung verlässlicher Aussagen darüber, wie die organische Bodensubstanz auf veränderte Umweltbedingungen, wie erhöhtes Angebot an Stickstoff und steigende Temperaturen, reagiert.
- Untersuchungen zur Steuerung der Kohlenstoff-Flüsse durch Pflanzen- und Bodenprozesse.
- Entwicklung von Strategien zur langfristigen Kohlenstoff-Speicherung in Böden.
- Beschreibung des Status Quo: Inventur der Kohlenstoff-Vorräte in den Böden Deutschlands (alle Landnutzungen, Kohlenstoff-Gehalte, Lagerungsdichte, Moore: Mächtigkeit des Torfkörpers).
- Datenauswertung/-rekonstruktion zum Wandel bei der Flächennutzung und dem Flächenmanagement der letzten Jahrzehnte, um den Einfluss der Landnutzung auf die gegenwärtigen Kohlenstoff-Vorräte quantifizieren zu können.
- Erhaltung und Förderung existierender Kohlenstoff-Vorräte mit Fokus auf Hot-Spots und Risiken: Kohlenstoffreiche und organische Böden, Ackerböden und eine praktische Kohlenstoff-konservierende Bodennutzung:

- Mineralböden / Acker: Regelmäßige Kohlenstoff-Zufuhr und Förderung der Bodenstruktur (z.B. durch Förderung der Bodenfauna, Wiedereinführung von überjährigem Gras oder Klee gras in den ackerbaulichen Fruchtfolgen und mehrjährige Pflanzen, z.B. nachwachsende Rohstoffe, sowie organischer Landbau
- Organische Böden: Erhöhung des Wasserspiegels zur Bremsung des Torfabbaus.

→ Fortlaufendes Monitoring der Freisetzung klimarelevanter Gase.

### **Rolle der Moore**

Moore spielen eine wichtige Rolle bei der Bindung und Freisetzung klimarelevanter Gase. Dies betrifft auch naturnahe Moore, die zwar im erheblichen Umfang CO<sub>2</sub> binden, die aber aufgrund der Methan-Emissionen insgesamt als Emissionsquelle bezeichnet werden müssen. Höchstwerte der Emission werden von entwässerten Moorwäldern erreicht. Sehr hohe Emissionswerte sind auf Ackerstandorten, auf Niedermoor sowie auf intensiv genutzten Grünlandstandorten (mit Umbruch) zu erwarten.

#### Empfehlungen aus dem Workshop:

- Renaturierung der Moore zur Emissionsminderung. (Erhöhung der CO<sub>2</sub> Bindungsfunktion)
- Erhalt von wachsenden Mooren und Initiierung von Torfwachstum als wirksame und kostengünstige Beiträge zum Klimaschutz.

### **V. Die landwirtschaftliche Bodennutzung, insbesondere der Pflanzenbau, ist von den Klimaänderungen unmittelbar betroffen.**

Änderungen der Fruchtfolgengestaltung, Anpassungen der Saattermine, die Wahl alternativer Sorten und Arten, Änderungen des Wassermanagements, Anpassungen der Düngung und Bodenbearbeitung (Schutz vor Bodenerosion) an die prognostizierten Klimaänderungen sind geeignete Wege diesen Entwicklungen Rechnung zu tragen.

Auswirkungen von Klimaänderungen auf Pflanzen betreffen Parameter wie Photosynthese und Atmung, Ruhezeiten, Reproduktion, Wachstums- bzw. Blühbeginn, Wanderungsmuster.

Ebenso nehmen die Gefahren bei der landwirtschaftlichen Bodennutzung durch Witterungsrisiken zu (zerstörte Flächen nach Hagelschlag, Sturm, Frost, überschwemmte Flächen bei Starkregen). Das Ertragsrisiko für den Landwirt steigt. Der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft hat in Zusammenarbeit mit Versicherern, Rückversicherern und Bauernverband ein Konzept einer staatlich gestützten Erntemehrgefahrenversicherung für Deutschland entwickelt.

Änderungen der Fruchtfolgengestaltung, Anpassungen der Saattermine, die Wahl alternativer Sorten und Arten, Änderungen des Wassermanagements, Anpassungen der Düngung und Bodenbearbeitung (Schutz vor Bodenerosion) an die prognostizierten Klimaänderungen sind mögliche Wege diesen Entwicklungen Rechnung zu tragen.

#### Empfehlungen aus dem Workshop:

- Acker- und pflanzenbauliche Anpassungsstrategien an wärmere und trocknere Witterungsbedingungen zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit, zur Schonung der Umwelt und zur Sicherung künftiger wirtschaftlicher Erträge.
- Verbesserung der Modelle zur besseren Analyse der regionalen Unterschiede im Zusammenhang Klimaänderungen / Pflanzenentwicklung.
- Entwicklung neuer Strategien und eine verbesserte Zusammenarbeit von Boden- und Naturschutz bei der Ausweisung von Schutzgebieten und der Vernetzung von Biotopen.
- Ergänzung der Klimaszenarien durch genauere Aussagen zum räumlich-zeitlichen Auftreten extremer Ereignisse wie Sturm, Starkniederschläge, Gewitter, Hagel, Eisregen oder Trockenperioden.

Teilnehmerliste

<b>Name</b>	<b>Institution</b>	<b>Anschrift (Straße, PLZ, Ort)</b>	<b>Tel.-Nr. Fax-Nr. e-mail</b>
Augustin, Sabine	Umweltbundesamt Fachgebiet II 4.4	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 20 30 Fax +49 3 40 21 04 20 30 e-mail: sabine.augustin@uba.de
Bergweiler Dr., Paul	PT-DLR Umweltforschung und -technik	Heinrich-Konenstraße 1 D-53227 Bonn	Tel +49 22 88 19 96 10 Fax +49 22 88 19 96 40 e-mail: paul.bergweiler@dlr.de
Bischert, Martina	Ministerium für ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz	Heinrich-Mann-Allee 103 14473 Potsdam	Tel +49 33 18 66 77 54 Fax +49 e-mail: martina.bischert@mluv.brandenburg.de
Böken, Holger	Umweltbundesamt Fachgebiet II 4.2	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 33 56 Fax +49 3 40 21 04 33 56 e-mail: holger.boeken@uba.de
Bork Prof. Dr., Hans-Rudolf	Ökologie-Zentrum Kiel Christian-Albrechts-Universität zu Kiel	Olshausenstraße 75 D-24118 Kiel	Tel +49 43 18 80 - 39 53 Tel +49 43 18 80 40 30 (office) Tel +49 43 15 37 78 30 (home) Fax +49 43 18 80 40 83 (office) Fax +49 43 15 37 78 31 (home) e-mail: hrbork@ecology.uni-kiel.de

Teilnehmerliste

Bormuth Dr., Claus	Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Referat 226	Rochusstraße 1 D-53123 Bonn	Tel +49 22 85 29 43 47 Fax +49 22 85 29 43 32 e-mail: claus.bormuth@bmvvel.bund.de
Busche, Julia	Umweltbundesamt Fachgebiet I 4.6	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 24 94 Fax +49 3 40 21 04 24 94 e-mail: julia.busche@uba.de
Chmielewski Dr., Frank-Michael	Humboldt-Universität zu Berlin Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät Institut für Pflanzenbauwissenschaften Lehrgebiet Agrarmeteorologie	Albrecht-Thaer-Weg 5 D-14195 Berlin	Tel +49 30 31 47 12 10 Fax +49 30 31 47 12 11 e-mail: chmielew@agrar.hu-berlin.de
Cramer, Friedel	BMVEL , Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft	53123 Bonn	Tel +49 22 85 29 38 39 e-mail: friedel.kramer@bmvvel.bund.de
Dickow-Hahn, Regine	Umweltbundesamt Fachgebiet I 2.3	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 27 12 Fax +49 3 40 21 04 27 12 e-mail: regine.dickow-hahn@uba.de
Dietrich Dr., Ottfried	Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V.; Institut für Landschaftswasserhaushalt	Eberswalder Straße 84 D-15374 Münchenberg	Tel +49 33 43 28 23 05 Fax +49 33 43 28 23 01 e-mail: odietrich@zalf.de
Dorendorf, Sonja	Umweltbundesamt Fachgebiet I 4.1	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 25 11 Fax +49 3 40 21 04 25 11 e-mail: sonja.dorendorf@uba.de

**„Klimaänderungen – Herausforderungen für den Bodenschutz „**  
 Workshop 28./29. September 2005 in Dessau

Teilnehmerliste

Dornbusch, Peter	Biosphärenreservat Mittlere Elbe	PF 13 82 06813 Dessau	Tel +49 3 49 04 42 10 e-mail: bioresme@t-online.de
Doyle Dr., Ulrike	Umweltbundesamt SRU	Reichpietschufer 60 10785 Berlin	Tel +49 3 02 63 69 61 23 e-mail: ulrike.doyle@uba.de
Düwel, Olaf	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)	Stilleweg 2 30655 Hannover	Tel +49 51 16 43 28 41 Fax +49 51 16 43 23 04 e-mail: olaf.duewel@bgr.de
Elsner Dr., Cornelia	Umweltbundesamt Fachgebiet III 1.4	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 34 06 Fax +49 3 40 21 04 34 06 e-mail: cornelia.elsner@uba.de
Emmerich, Karl-Heinz	HLUG	PF 32 09 65022 Wiesbaden	Tel e-mail:
Engelhard, Brigitte	Münchener Rückversicherungs- Gesellschaft	Königsstraße 107 D-80802 München (Briefe: 80791)	Tel +49 89 38 91 65 87 Fax +49 8 93 89 17 65 87 e-mail: bengelhard@munichre.com
Feldhaus Dr., Dieter	Landesanstalt für Geologie und Bergwesen	Köthener Straße 34 06118 Halle	Tel: +49 34 55 21 21 03 Fax: +49 3 45 22 99 10 e-mail: feldhaus@lagb.mw.lsa-net.de
Fiedler, Heide	Regierungspräsidium Chemnitz	Barbarossastr. 19 09112 Chemnitz	Tel: +49 3 71 35 83 51 Fax: +49 3 71 35 82 85 e-mail: heide.fiedler@rpc.sachsen.de

Teilnehmerliste

Fischer Dr., Frank	SMUL	Wilhelm-Buck-Str. 2 01097 Dresden	Tel +49 35 15 64 23 57 e-mail: frank.fischer@smul.sachsen.de
Fock, Christina	Umweltbundesamt Fachgebiet IV 2.4	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 29 53 Fax +49 3 40 21 04 29 53 e-mail: christina.fock@uba.de
Forstreuter Dr., Manfred	TU Berlin, Institut für Ökologie	Königin-Luise-Str. 22 14195 Berlin	Tel: +49 30 31 47 12 74 e-mail: m.forstreuter@tu-berlin.de
Franke, Werner	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg	Griesbachstraße 1 D-76185 Karlsruhe	Tel +49 72 19 83 14 65 Fax +49 72 19 83 15 41 e-mail: werner.franke@lfuka.lfu.bwl.de
Franzius Dr., Volker	Umweltbundesamt Abteilungsleiter II 4	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 34 96 Fax +49 3 40 21 04 34 96 e-mail: volker.franzius@uba.de
Freibauer Dr., Annette	Max-Planck-Institut für Biogeochemie	Hans-Knöll-Straße 10 D-07745 Jena	Tel +49 36 41 57 61 64 Fax +49 36 41 57 71 00 e-mail: afreib@bgc-jena.mpg.de
Gensior, Andreas	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie	Bundesallee 50 38116 Braunschweig	Tel +49 53 15 96 26 37 Fax +49 53 15 96 10 99 e-mail: andreas.gensior@fal.de
Glante Dr., Frank	Umweltbundesamt Fachgebietsleiter II 4.2	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 34 34 Fax +49 3 40 21 04 34 34 e-mail: frank.glante@uba.de

Teilnehmerliste

Götz Dr., Bernhard	Forstbotanischer Garten Eberswalde	Am Zainhammer 5 D-16225 Eberswalde	Tel +49 3 33 46 55 63 Fax +49 3 33 46 55 67 e-mail: bgoetz@fh-egerswalde.de
Grathwohl Prof. Dr., Peter	Universität Tübingen Institut für Geowissenschaften	Sigwartstraße 10 D-72076 Tübingen	Tel +49 7 07 12 97 54 29 Fax +49 70 71 50 59 e-mail: peter.grathwohl@uni-tuebingen.de
Harnisch, Astrid	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Arbeitsgruppe Z III 6	D-11055 Berlin	Tel +49 3 05 36 60 Fax +49 3 05 36 70 e-mail: astrid.harnisch@bmu.bund.de
Hartmann Dr., Klaus-Jörg	Landesanstalt für Geologie und Bergwesen	Köthener Straße 34 06118 Halle	Tel: +49 34 55 21 21 17 Fax: +49 3 45 22 99 10 e-mail: joerg.hartmann@lagb.mw.lsa-net.de
Heinemeyer, Otto	Bundeforschungsanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie	Bundesallee 50 38116 Braunschweig	Tel +49 53 15 96 26 41 Fax +49 53 15 96 10 99 e-mail: otto.heinemeyer@fal.de
Helbig, Henrik	Landesanstalt für Geologie und Bergwesen	Köthener Straße 34 06118 Halle	Tel +49 34 55 21 21 21 Fax +49 3 45 52 99 10 e-mail: helbig@lagb.mw.lsa-net.de

**„Klimaänderungen – Herausforderungen für den Bodenschutz „**  
 Workshop 28./29. September 2005 in Dessau

Teilnehmerliste

Henneberg, Petra	Umweltbundesamt Fachgebiet II 4.2	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 24 84 Fax +49 3 40 21 04 24 84 e-mail: petra.henneberg@uba.de
Herwig Dr., Gundula	Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg	Heinrich-Mann-Allee 103 14473 Potsdam	Tel +49 33 18 66 73 50 e-mail: gundula.herwig@mluv- brandenburg.de
Hesse, Jürgen	Landwirtschaftskammer Nordrhein- Westfalen	Endenicher Allee 60 53115 Bonn	Tel +49 27 87 03 12 98 e-mail: juergen.hesse@lwk.nrw.de
Heustreu, Sabine	Umweltbundesamt AS II 2	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 21 33 Fax +49 3 40 21 04 21 33 e-mail: sabine.heustreu@uba.de
Hierold Dr., Wilfried	ZALF	Eberswalder Str. 84 15374 Müncheberg	Tel: +49 3 33 48 24 36 e-mail: whierold@zalf.de
Holsten, Anne	Umweltbundesamt	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 21 75 Fax +49 3 40 21 04 21 75 e-mail: Prakt12-L@uba.de
Hornemann, Corinna	Umweltbundesamt Fachgebiet II 2.1	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 20 19 Fax +49 3 40 21 04 20 19 e-mail: corinna.hornemann@uba.de
Hörnicker, Fritz	Amt für Landwirtschaft und Flurneuordnung Anhalt	Ferd.-v.-Schill-Str. 25 06844 Dessau	Tel +49 34 02 30 30

Teilnehmerliste

Huck, Sabine	Umweltbundesamt Fachgebiet IV 2.4	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 33 25 Fax +49 3 40 21 04 33 25 e-mail: sabine.huck@uba.de
Iser, Ivonne	Umweltbundesamt Abteilung II 4	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 35 85 Fax +49 3 40 21 04 35 85 e-mail: ivonne.iser@uba.de
Jering, Almut	Umweltbundesamt Fachgebiet I 1.4	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 21 14 Fax +49 3 40 21 04 21 14 e-mail: almut.jering@uba.de
Joneck Dr., Michael	Bayrisches Landesamt für Umwelt	Leopoldstraße 30 95615 Marktredwitz	Tel +49 92 31 95 11 16 e-mail: michael.joneck@lfu.bayern.de
Kalies Dr., Heiko	BISANTECH-NUOVA GmbH & Co. KG, NL Leipzig	Berliner Straße 81a 04129 Leipzig	Tel +49 3 41 90 99 90 e-mail: heiko.kalies@bisantech.de
Kaltz Dr., Andrea	Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG)	Zur Wetterwarte 11 01109 Dresden	Tel +49 35 18 92 84 12 e-mail: andrea.kaltz@lfug.smul.sachsen.de
Kamp Dr., Thomas	Institute for Biodiversity - Network	Dr.-Johann-Maier-Str. 4 93049 Regensburg	Tel +49 94 12 97 77 60 01 60/ 97 51 51 19 Fax +49 94 12 97 77 62 e-mail: kamp@biodiv.de

Teilnehmerliste

Karlowsky, Karl Heinz	Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, Ref. Bodenschutz, Altlasten	Beethovenstraße 3 99096 Erfurt	Tel +49 36 13 79 96 51 Fax +49 36 13 79 99 50 e-mail: k.karlowsky@tmInu.thueringen.de
Kleefisch Dr., Bernd	NLFB – BTI Bremen	Friedrich-Mißler-Str. 46/50 28211 Bremen	Tel +49 42 12 03 46 43 e-mail: bernd.kleefisch@nlfb.de
Klein Dr., Gerd–Henning	Deutsches Zentrum für Luft- u. Raumfahrt e. V. PT-DLR Umweltforschung und –technik	Heinrich-Konenstraße 1 D-53227 Bonn	Tel +49 22 88 19 96 57 Fax +49 22 88 19 96 40 e-mail: gerd-henning.klein@dlr.de
Knappe, Florian	ifeu-Institut Heidelberg	Wilckensstraße 3 69120 Heidelberg	Tel +49 62 21 47 67 26 e-mail: florian.knappe@ifeu.de
Knie, Joachim	Umweltbundesamt Fachgebiet II 4	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 23 13 Fax +49 3 40 21 04 23 13 e-mail: joachim.knie@uba.de
Koch, Ines	Umweltbundesamt Fachgebiet II 5.2	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 24 63 Fax +49 3 40 21 04 24 63 e-mail: ines.koch@uba.de
Krakau Dr., Ute	Forstbotanischer Garten Eberswalde	Am Zainhammer 5 D-16225 Eberswalde	Tel +49 3 33 46 54 29 Fax +49 3 33 46 55 67 e-mail: ukrakau@fh-eberswalde.de

Teilnehmerliste

Kress Dr., Andreas	Klima-Bündnis der europäischen Städte mit indigenen Völkern der Regenwälder Climate Alliance – Alianza del Clima e. V. European Secretariat	Galvanistraße 28 D-60486 Frankfurt am Main	Tel +49 69 71 71 39 33 Fax +49 69 71 71 39 93 e-mail: a.kress@klimabuendnis.org
Kretschmar, Ev	Umweltbundesamt Fachgebiet IV 2.4	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 30 31 Fax +49 3 40 21 04 30 31 e-mail: ev.kretschmar@uba.de
Kühne, Th.	Bundesanstalt für Züchtungsforschung an Kulturpflanzen	Neuer Weg 22 / 23 06484 Quedlinburg	Tel +49 3 94 64 72 01 e-mail: t.kuehne@bcfz.de
Kuhnt Dr., Dorit	Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein	Mercatostraße 3 24106 Kiel	Tel +49 43 19 88 73 58 e-mail: dorit.kuhnt@mlur.landsh.de
Kuhnt Prof. Dr., Gerald	Physische Geographie und Landschaftsökologie, Universität Hannover	Schneiderberg 50 30167 Hannover	Tel +49 51 17 62 35 91 e-mail: kuhnt@geog.uni-hannover.de
Kuntze, David	Umweltbundesamt Fachgebiet II 2.2	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 20 64 Fax +49 3 40 21 04 20 64 e-mail: david.kuntze@uba.de
Lahmer Dr., Werner		Bergstraße 4 D-12169 Berlin	Tel +49 30 79 70 59 75 Fax +49 30 79 74 15 47 e-mail: werner.@lwernerlehmer.de

**„Klimaänderungen – Herausforderungen für den Bodenschutz „**  
 Workshop 28./29. September 2005 in Dessau

Teilnehmerliste

Lenschow Dr., Uwe	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg Vorpommern	Goldberger Straße 12 D-18273 Güstrow	Tel +49 38 43 77 72 30 Fax +49 38 43 77 76 36 e-mail: uwe.lenschow@lung.mv-regierung.de
Mahrenholz, Petra	Umweltbundesamt Fachgebiet I 4.1	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 20 84 Fax +49 3 40 21 04 20 84 e-mail: petra.mahrenholz@uba.de
Mahrle, Sabine	Umweltbundesamt Fachgebiet II 4.3	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 35 87 Fax +49 3 40 21 04 35 87 e-mail: sabine.mahrle@uba.de
Marahrens, Stephan	Umweltbundesamt Fachgebiet II 4.2	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 23 96 Fax +49 3 40 21 04 23 96 e-mail: stephan.marahrens@uba.de
Mathews, Jeannette	Umweltbundesamt Fachgebiet II 4.2	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 33 02 Fax +49 3 40 21 04 33 02 e-mail: jeannette.mathews@uba.de
Meißner Prof. Dr., Ralph	Umweltforschungszentrum Halle Sektion Bodenforschung Forschungsstelle Falkenberg	Dorfstraße 55 D-39615 Falkenberg	Tel +49 39 38 69 71 13 Fax +49 39 38 89 71 16 e-mail: ralph.meissner@ufz.de

**„Klimaänderungen – Herausforderungen für den Bodenschutz „**  
 Workshop 28./29. September 2005 in Dessau

Teilnehmerliste

Mellentin, Udo	Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie	Zur Wetterwarte 11 01109 Dresden	Tel +49 35 18 92 83 40 Fax +49 35 18 92 84 02 e-mail: udo.mellentin@lfug.smul.sachsen.de
Miehe, Anne	Umweltbundesamt Fachgebiet I 4.3	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 25 22 Fax +49 3 40 21 04 25 22 e-mail: anne.miehe@uba.de
Mohaupt – Jahr, Birgit	Umweltbundesamt Fachgebiet II 4.4	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 37 51 Fax +49 3 40 21 04 47 51 e-mail: birgit.mohaupt@uba.de
Müller, Andreas	IB für Baugrund	Tiefer Grund 3 06842 Dessau	Tel +49 34 02 16 06 71 01 72 / 9 27 14 43 Fax +49 34 02 16 06 71
Müller, Antje	Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft LfL Leipzig	Postfach 22 11 61 04131 Leipzig	Tel +49 34 19 17 41 85 e-mail: antje.mueller@leipzig.lfl.smul.sachsen.de
Munz, Nicole	Umweltbundesamt Fachgebiet I 4.1	Wörlitzer Platz 1 D-06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 25 11 Fax +49 3 40 21 04 25 11 e-mail: nicole.munz@uba.de
Neuhahn, Andrea	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung	Brüchenstraße 6 10179 Berlin	Tel +49 30 90 25 20 70 e-mail: andrea.neuhahn@senstadt.verwalt-berlin.de

**„Klimaänderungen – Herausforderungen für den Bodenschutz „**  
 Workshop 28./29. September 2005 in Dessau

Teilnehmerliste

Neumann, Britta	Amt für Landwirtschaft und Flurneuordnung Anhalt	Ferd.-v.-Schill-Str. 25 06844 Dessau	Tel +49 34 02 30 30
Nitschke, Maria		Hans-Löscher-Straße 6 39108 Magdeburg	Tel +49 39 17 32 73 78 e-mail: marnit@onlinehome.de
Obst Dr., Ulrich	Landesumweltamt Brandenburg Abteilung TUS	Am Nordrand 45 03044 Cottbus	Tel +49 35 58 76 21 10 e-mail: ulrich.obst@lua.brandenburg.de
Peter, Helmut		In der Flanke 57 06849 Dessau	Tel +49 34 02 20 92 04
Piechatzek, Günter		Leipziger Strasse 111 06766 Bobbau	Tel +49 3 49 43 09 03 01 72 / 3 53 22 82 e-mail: gapie@pibox.de
Profft, Ingolf	Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei	Jägerstraße 1 99867 Gera	Tel +49 36 21 22 51 52 e-mail: profft.ingolf@forst.thueringen.de
Puder, Franz	Umweltbundesamt Deutsche Emmissionshandelsstelle	Bismarckplatz 1 14193 Berlin	Tel +49 3089035124 Fax +49 3089035010 e-mail: franz.puder@uba.de
Rehn, Uta	Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachen-Anhalt	Sternstraße 52 06886 Wittenberg	Tel +49 3 49 14 67 12 00 e-mail: uta.rehn@lhw.mlu.lsa-net.de
Reinhardt, Frank	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie	Carl-August-Allee 8-1 99423 Weimar	Tel +49 36 41 68 45 30 f.reinhardt@tlugjena.thueringen.de
Reinhold Dr., Jürgen	Bioplan GmbH	Am Phöbener Bruch 2C 14542 Werder (Havel)	Tel +49 33 27 66 89 74 e-mail: juergen.reinhold@potsdam.de

**„Klimaänderungen – Herausforderungen für den Bodenschutz „**  
 Workshop 28./29. September 2005 in Dessau

Teilnehmerliste

Röhricht Dr., Christian	Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft	Gutstav-Kühn-Straße 8 D-04159 Leipzig	Tel +49 34 19 17 42 84 Fax +49 34 19 17 41 11 e-mail: christian.roehricht@leipzig.lf.l.smul.sachse n.de
Schäfer, Achim		Grimmer Strasse 88 17489 Greifswald	Tel +49 38 34 86 41 18 Fax +49 38 34 86 41 07 e-mail: schaefea@uni-greifswald.de
Schiller, Stephan	Umweltbundesamt Fachgebiet I 4.6	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 20 39 Fax +49 3 40 21 04 20 39 e-mail: stephan.schiller@uba.de
Schmidt, Simone	Umweltbundesamt Fachgebiet II 4.1	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 38 52 Fax +49 3 40 21 04 38 52 e-mail: simone.schmidt@uba.de
Schönemann, Nancy	Umweltbundesamt AS II 4	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 35 86 Fax +49 3 40 21 04 35 86 e-mail: nancy.schoenemann@uba.de
Schulze, Christine	Landesverwaltungsamt Sachsen-Anhalt	Dessauer Straße 70 06118 Halle	Tel +49 34 55 14 21 67 e-mail: Christine.schulze@lvwa.lsa-net.de
Schütze, Gudrun	ÖKO-DATA	Hegermühlenstr. 58 15344 Strausberg	Tel +49 3 34 13 90 19 23 e-mail: gudrun.schuetze@oekodata.com

Teilnehmerliste

Seiler, Michael	Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei	Jägerstraße 1 99867 Gera	Tel +49 36 21 22 51 51 e-mail: seiler.michael@forst.thueringen.de
Siebert Dr., Stefanie		Im Dohlenbruch 11 44795 Bochum	Tel +49 2 34 43 84 47 e-mail: siebert@wne.de
Six, Ellen	Umweltbundesamt Fachgebiet II 4.1	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 20 65 Fax +49 3 40 21 04 20 65 e-mail: ellen.six@uba.de
Spannaus, Volker		Ziebigker Straße 6 A 06844 Dessau	Tel +49 3 40 61 60 54
Spranger Dr., Till	Umweltbundesamt Fachgebiet II 4.4	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 31 55 Fax +49 3 40 21 04 31 55 e-mail: till.spranger@uba.de
Starke, Wolfgang		Kiefholzstraße 166B 12437 Berlin	Tel +49 30 51 06 52 46 01 73 / 8 32 36 68 e-mail: w.starke@web.de
Troge Dr., Andreas	Umweltbundesamt Präsident	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 22 01 Fax +49 3 40 21 04 22 01 e-mail: andreas.troge@uba.de
Vogel Dr., Ines	Umweltbundesamt Fachgebiet II 4.1	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 30 33 Fax +49 3 40 21 04 30 33 e-mail: ines.vogel@uba.de

„Klimaänderungen – Herausforderungen für den Bodenschutz „  
Workshop 28./29. September 2005 in Dessau

Teilnehmerliste

Voigt Dr., Thomas	Umweltbundesamt Fachgebiet II 5.2	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	Tel +49 3 40 21 03 20 93 Fax +49 3 40 21 04 20 93 e-mail: thomas.voigt@uba.de
Weigel Prof. Dr., Hans-Joachim	Institut für Agrarökologie Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)	Bundesallee 50 D-38116 Braunschweig	Tel +49 53 15 96 25 01 Fax +49 53 15 96 25 99 e-mail: hans.weigel@fal.de
Weninger, Michael	Forstamt Dessau	Heidebrückenweg 28  06849 Dessau	Tel: +49 34 02 16 67 12  Fax +49 34 08 58 12 91 e-mail: m.weninger@lfb.mlv.lsa-net.de



# **Klimaänderungen - Herausforderungen für den Bodenschutz**

**Überblick des UBA, Abteilung II 4  
über FuE-Aktivitäten, Arbeitsgruppen, Publikationen  
und Internetlinks**

**(Stand: 27.9.2005)**

**ENTWURF**

**Hinweise und Anregungen zur Fortführung und Ergänzung werden  
vom UBA, FG II 4.2 gern entgegen genommen**

Ein Rückmeldebogen ist als Anhang beigefügt.

(ab Ende November auch als digitale Vorlage unter [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de) Bodenschutz abrufbar)

## 1. Aktivitäten (laufende Projekte)

International	Ansprechpartner
<p><b>EU Projekt SENSOR</b>            SENSOR (Sustainability Impact Assessment: tools for environmental, social and economic effects of multifunctional land use in European regions)            EU finanziertes Integriertes Projekt mit 33 Partnern aus 15 Ländern, entwickelt Methoden für die Folgenabschätzung von Landnutzung für die nachhaltige Entwicklung in den Regionen Europas.            4 Jahre Laufzeit : 12/2004- 12/2008</p> <p><a href="http://www.sensor-ip.org">http://www.sensor-ip.org</a></p>	<p>Koordinierung:            Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V.</p> <p>E-Mail: <a href="mailto:sensor@zalf.de">sensor@zalf.de</a></p>
<p><b>CARBOEUROPE</b>            - Integriertes Projekt-CarboEurope-IP, Einschätzung der europäischen terrestrischen Carbonabgleichung;            Eu-finanziertes Forschungsprojekt,            61 Forschungszentren aus 17 europäischen Ländern sind beteiligt            Beginn: im Januar 2004, Laufzeit: 5 Jahre</p> <p><a href="http://www.carboeurope.org/">http://www.carboeurope.org/</a></p>	<p>Max-Planck-Institut für Geochemie            Postfach 10 01 64            07701 Jena</p>

Bund	
<p>BMBF-Rahmenprogramm: Forschung für die Nachhaltigkeit            Neues Programm in 2005: "<b>Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen</b>"            Teilaspekt B: Anpassung an Klimatrends und Extremwetter</p>	<p>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)</p>
<p><b>Wissenschaftliche Begleitung im Rahmen des vorbeugenden Hochwasserschutzes</b>            UFOPLAN-Vorhaben 2004            Ziel des Vorhabens: Zukünftige Problemfelder im Themenbereich des vorbeugenden Hochwasserschutzes erkennen und frühzeitig Handlungsempfehlungen für die Politik ableiten</p> <p><a href="http://www.umweltbundesamt.de/wasser/themen/hw6_1.htm">http://www.umweltbundesamt.de/wasser/themen/hw6_1.htm</a></p>	<p>Umweltbundesamt            FG II 2.1</p>

<b>Bund</b>	
<p><b>Deutschen Klimaforschungsprogramm DEKLIM</b></p> <p>Start: Mitte 2001, die mittlere Laufzeit der Projekte beträgt drei bis vier Jahre, das Programm umfasst mehr als 100 Einzelvorhaben, die in 37 Forschungsverbänden, davon acht Nachwuchsgruppen, organisiert sind</p> <p>Ziele: Die Verbesserung des Verständnisses des Klimasystems und seiner Beeinflussbarkeit durch den Menschen. Eine Verringerung der Unsicherheiten bei der Analyse und Vorhersage.</p> <p><a href="http://www.deklim.de/seiten/dek-frame.asp">http://www.deklim.de/seiten/dek-frame.asp</a></p> <p>Abschluss-symposium: Mai 2005, Tagungsbände können im Internet angefordert werden</p>	<p>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)</p>
<p>BMBF - Förderschwerpunkt : <b>Globaler Wandel des Wasserkreislaufes" (GLOWA)</b></p> <p>Ziel: Entwicklung von Strategien für eine nachhaltige und vorausschauende Bewirtschaftung von Wasser im regionalen Maßstab unter Berücksichtigung globaler Umweltveränderungen und sozio-ökonomischer Randbedingungen</p> <p>Phase I: Laufzeit 2000 - 2003</p> <p>Phase II: Laufzeit: 2004 – 2007: "Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserkreislauf im Elbegebiet - Risiken und Optionen" GLOWA-Elbe II</p> <p><a href="http://www.glowa-elbe.de">http://www.glowa-elbe.de</a></p>	<p>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)</p>
<b>Länder</b>	
<p><b>KLARA „Klimawandel-Auswirkungen, Risiken, Anpassungen“</b>, Verbundvorhaben</p> <p>Ziel: Zusammenstellung des nationalen und internationalen Wissenstandes im Zusammenhang mit Anpassungsmaßnahmen für die identifizierten bestehenden Wissenslücken und die Konkretisierung des entsprechenden Handlungsbedarfs</p>	<p>Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (UVM BW)</p>

Länder	
<p><b>"Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft" (KLIWA)</b></p> <p>Kooperationsvorhaben  Ziele: Ermittlung der Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Anforderungen an den Hochwasser- und Gewässerschutz, auf die Wasserversorgung und die Entwicklung der Gewässer sowie das Aufzeigen von Konsequenzen und Handlungsstrategien  5 Projektbereiche mit einer Reihe von Einzelprojekten</p> <p>Ergebnisberichte:  <a href="http://www.kliwa.de/de/ergebnisse/index.html">http://www.kliwa.de/de/ergebnisse/index.html</a></p>	<p>Ministerium für Umwelt und Verkehr (UVM BW)  Baden-Württemberg  - Abteilung Wasser und Boden  Kernerplatz 9  70182 Stuttgart</p> <p>Bayer. Staatsministerium für Umwelt,  Gesundheit und Verbraucherschutz  (BayStMUGV)  - Abteilung Wasserwirtschaft -  Rosenkavalierplatz 2  81925 München</p>

Forschungseinrichtungen	
<p>Geplante Forschungsprojekte im ZALF (Zeitraum 2005- 2008):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Regionale Konsequenzen veränderter Klima- und Nutzungsbedingungen auf die Stoffbildung und die Stoffumsetzung</b></li> <li>- <b>CO<sub>2</sub>-C-Sequestrierung durch pflanzliche Stoffbildung</b></li> </ul> <p><a href="http://www.zalf.de/home_zalf/download/dir/arbeitsprogramm/050202-1_6_4.pdf">http://www.zalf.de/home_zalf/download/dir/arbeitsprogramm/050202-1_6_4.pdf</a></p>	<p>Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V.</p>
<p><b>ENFORCHANCE „Environment and Forests under Changing Conditions“</b>,  Teilprojekt Klimaänderungen  (BMBF, ab 2005)</p>	<p>Technische Universität Dresden  Institut für Hydrologie und Meteorologie  Professur Meteorologie  AG: Modellierung und Regionalklima  01062 Dresden</p>
<p>Anbau der nachwachsenden Rohstoffe, Nutzung einer großen Artenvielfalt einschließlich genetischer Ressourcen, Vermeidung von Pestiziden und Minimierung von Bodenerosion und Nährstoffaustrag in das Grundwasser  <a href="http://www.wiz.uni-kassel.de/ink/apb/de/scheffer.shtml">http://www.wiz.uni-kassel.de/ink/apb/de/scheffer.shtml</a></p>	<p>Universität Kassel  Fachbereich 11  Ökologische Agrarwissenschaften,  Witzenhausen</p>

**Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wasserrückhalt  
in der Fläche unter besonderer Berücksichtigung  
naturschutzfachlicher Aspekte** - am Beispiel des  
Flusseinzugsgebietes de Mulde in Sachsen

Laufzeit: Januar 2004 bis August 2006

[http://www.laum.uni-  
hannover.de/iln/forschung/lauf\\_06\\_3.html](http://www.laum.uni-hannover.de/iln/forschung/lauf_06_3.html)

Uni Hannover, Sächsische  
Landesanstalt für  
Landwirtschaft, FB Bodenkultur  
und Pflanzenbau

## 2. Arbeitsgruppen, Netzwerke zum Thema

### **Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO)**

Die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) ist ein Arbeitsgremium der Umweltministerkonferenz (UMK), in dem die für den Bodenschutz zuständigen obersten Behörden der Länder und des Bundes zusammenarbeiten, um Fragen ihres Aufgabenkreises zu erörtern, Lösungen auszuarbeiten und Empfehlungen auszusprechen.

Die LABO begleitet die Entwicklung des Bodenschutzes und des Bodenschutzrechts und unterstützt den Erfahrungsaustausch zwischen dem Bund und den Ländern. Die LABO strebt insbesondere einen einheitlichen Vollzug des Bodenschutzrechts an und unterbreitet Vorschläge für eine einheitliche Weiterentwicklung. Die LABO berät die UMK und die Konferenz der Amtschefs der Umweltministerien des Bundes und der Länder (ACK) und bearbeitet deren Aufträge.

<http://www.labo-deutschland.de/>

### **Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt**

Die Kommission Bodenschutz (KBU) wurde am 6. Dezember 2004 – direkt nach dem Weltbodentag – der Öffentlichkeit vorgestellt. Die Kommission dient als eine Schnittstelle auf Bundesebene. Sie führt die wesentlichen Akteure des Bodenschutzes aus Wissenschaft, Praxis und Verwaltung übergreifend zusammen. In dem Gremium sind alle wichtigen Fachdisziplinen für einen nachhaltigen Bodenschutz repräsentiert. Neben den klassischen Disziplinen der Geo- und Agrarwissenschaften gehören der KBU auch Fachleute für Nachhaltige Entwicklung, Ökonomie, Ökotoxikologie und Altlastensanierung an. Die Mitglieder arbeiten ehrenamtlich. Sie sind von dem Präsidenten des Umweltbundesamtes für jeweils drei Jahre berufen.

<http://www.umweltbundesamt.de/fwbs/kbu/>

### **Senatsarbeitsgruppe „Klimaänderungen“ des Senates der Bundesforschungsanstalten**

Senat der Bundesforschungsanstalten im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL)

<http://www.klima-bmvel.de/>

### **Europäisches Boden-Bündnis, ELSA e.V.**

Wurde in enger Kooperation mit dem europäischen Klima-Bündnis gegründet. Das Boden-Bündnis ist ein Zusammenschluss von Städten und Gemeinden in Europa, die sich zum Ziel gesetzt haben, sich aktiv für einen nachhaltigen Umgang mit Böden einzusetzen. Auf Grundlage des gemeinsamen Manifestes verpflichten sich die beteiligten Kommunen im Bewusstsein ihrer globalen Mitverantwortung zu entschlossenem Handeln auf lokaler Ebene. Darüber hinaus wirken sie mit an gemeinsamen Aktivitäten im Bereich des Bodenschutzes und der Raumentwicklung. Zugleich profitieren sie von der partnerschaftlichen Zusammenarbeit und dem Austausch von Informationen und Erfahrungen mit den Bündnispartnern.

Satzung, Manifest und Mitglieder unter:

<http://www.bodenbuendnis.org>

### **Klima-Bündnis / Alianza del Clima e.V.**

Ein Zusammenschluss europäischer Städte und Gemeinden, die eine Partnerschaft mit indigenen Völkern der Regenwälder eingegangen sind. Die Partner in diesem weltumspannenden Bündnis verbindet die gemeinsame Sorge um das Weltklima. Das Klima-Bündnis will den Erhalt des globalen Klimas erreichen. Dazu gehören die Verringerung der klimaschädigenden Emissionen auf ein nachhaltiges Niveau in den Industrieländern im Norden und der Schutz der Regenwälder im Süden des Planeten. Mit ihrem Beitritt haben sich die Mitgliedskommunen auf Ziele, Handlungsfelder und Maßnahmen verpflichtet. Diese Selbstverpflichtungen sind im Klima-Bündnis-Manifest (1990) und der Klima-Bündnis-Erklärung (2000) niedergelegt.

<http://www.klimabuendnis.org/start.htm>

### **Deutsches Netzwerk für landschaftsbezogene Umweltforschung**

Am 13.5.2004 im Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung gegründet. Das Netzwerk will Wissenschaft und Forschung im Bereich der landschaftsbezogenen Umweltforschung bündeln und den Dialog zwischen Wissenschaft und Praxis fördern. Alle Forschungsinstitute sind beteiligt: Das Leibniz-Institut für Gewässerforschung und Binnenfischerei, der Forschungsverbund Berlin e.V., das Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V., das Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e.V., das Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung e.V., das UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig Halle GmbH

[http://www.zalf.de/home\\_zalf/ueberuns/ueberuns/forschung/pr170504.pdf](http://www.zalf.de/home_zalf/ueberuns/ueberuns/forschung/pr170504.pdf)

### **Forschungsplattform "Ländliche Räume" Berlin-Brandenburg (FP B-BB)**

Ziele der Forschungsplattform sind: Die Sicherung und Stärkung des Forschungsstandortes Berlin-Brandenburg in den Bereichen ländliche Entwicklung, Landnutzung, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Gewässerbewirtschaftung, Gartenbau und Stadtgrün, Ernährung und Gesundheit sowie Tourismus

<http://www.atb-potsdam.de/Hauptseite-deutsch/Forschung/Verbuende/Forschungsplattform/ziele.htm>

### **Bayerischer Klimaforschungsverbund BayFORKLIM**

kooperieren in intensiver inter-disziplinärer Zusammenarbeit bayerische Universitäten, Großforschungsinstitute und Fachbehörden mit dem Ziel "**Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen auf Mikroorganismen, Pflanzen, Tiere und den Menschen**" zu untersuchen.

<http://www.bayforklim.uni-muenchen.de/>

### 3. Publikationen

#### Bodenschutz

- **MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DEN RAT, DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS SOWIE AN DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN - Hin zu einer spezifischen Bodenschutzstrategie KOM (2002) 179**, vom 16.4.2002  
Die Mitteilung führt die Hauptgefahren für die Böden in der EU auf: Erosion, Rückgang des Gehalts an organischer Substanz, Bodenkontamination, Bodenversiegelung (aufgrund des Baus von Häusern, Straßen und anderen Infrastruktureinrichtungen), Bodenverdichtung (infolge des Einsatzes schwerer Maschinen, von Überweidung und sportlichen Aktivitäten), Rückgang der biologischen Vielfalt im Boden, Versalzung (übermäßige Anreicherung von löslichen Natrium-, Magnesium- und Kalziumsalzen im Boden) sowie Überschwemmungen und Erdbeben. In der Mitteilung werden sowohl die von der internationalen Gemeinschaft als auch die von den EU-Mitgliedstaaten und den Beitrittskandidaten zur Bekämpfung der Bodenverschlechterung eingesetzten Instrumente aufgeführt.  
<http://europa.eu.int/scadplus/leg/de/lvb/l28122.htm>
- **Bodenschutzbericht der Bundesregierung für die 14. Legislaturperiode**, verabschiedet vom Bundeskabinett am 19. Juni 2002  
<http://www.umweltschulen.de/download/bodenschutzbericht2002.pdf>
- **Konzept zur Bestandssicherung und zur Entwicklung der Moore in Mecklenburg-Vorpommern**  
<http://www.um.mv-regierung.de/moore/moorkonzept/pages/kapitel4.html>

#### Hochwasser

- **Mitteilung der EU-Kommission: Hochwasserrisikomanagement- Vermeidungs-Schutz- und Minderungsmaßnahmen KOM(2004) 472, Brüssel 2004, vom 12.7.2004**  
[http://europa.eu.int/comm/environment/water/pdf/com\\_2004\\_472\\_de.pdf](http://europa.eu.int/comm/environment/water/pdf/com_2004_472_de.pdf)

#### Landwirtschaft

- **Prima Klima durch die Agrarwende**  
NABU-Vorschläge für besseren Klimaschutz durch die Förderung des Ökologischen Landbaus  
[http://www.nabu.de/m01/m01\\_02/00288.html](http://www.nabu.de/m01/m01_02/00288.html)

#### Klima

- **Bericht „Impacts of Europe’s changing climate“, EEA Report No 2/2004**  
Von der Europäischen Umweltagentur veröffentlicht, maßgeblich durch das Umweltbundesamt (UBA) Berlin und die niederländische Umweltbehörde Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) erstellt  
[http://reports.eea.eu.int/climate\\_report\\_2\\_2004/en](http://reports.eea.eu.int/climate_report_2_2004/en)
- **Nationales Klimaschutzprogramm 2005**  
6. Bericht der Interministeriellen AG „CO2-Reduktion“  
<http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/35742.php>

- **Über Kioto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert**,  
Berlin 2003, WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung)  
[http://www.wbgu.de/wbgu\\_sn2003\\_voll.html#Heading0](http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003_voll.html#Heading0)
  
- **Wegweiser Nachhaltigkeit 2005 - Bilanzen und Perspektiven**  
Kabinettsbeschluss vom 10. August 2005  
<http://www.bundesregierung.de/Anlage871514/wegweiser.pdf>
  
- **Paläoklimaforschung in Deutschland – Stand, Ergebnisse und Perspektiven**,  
Kleine Anfrage der Bundesregierung, Abgeordnete der CDU/CSU, 14/6529,14/6215  
Hinweis: bietet einen sehr guten Überblick über alle mit der Klimaforschung in  
Deutschland beschäftigten Einrichtungen
  
- **UBA Forschungsbericht 201 41 254: „Klimawandel in Deutschland –  
Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme“**,  
Dessau, September 2005  
<http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz/kweiter.htm>
  
- **UBA Forschungsbericht 201 41 254 "Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für  
das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen - Schwerpunkt  
Deutschland"**  
Dessau, September 2005  
<http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz/kweiter.htm>
  
- **UBA Hintergrundpapier zu „Klimafolgen und Anpassung an den Klimawandel in  
Deutschland - Kenntnisstand und Handlungsnotwendigkeiten“**,  
Dessau September 2005  
[http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-  
presse/hintergrund/Klimafolgen\\_Anpassung.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Klimafolgen_Anpassung.pdf)
  
- **Erster Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland über  
systematische Klimabeobachtungen in Deutschland zum 3. Nationalbericht nach  
dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen**;  
vom 14. Juli 2005
- Zusammengestellt vom Deutschen Wetterdienst Nationales GCOS-Sekretariat
  
- **Klimawandel in Sachsen – Sachstand und Ausblick 2005, Broschüre, März 2005**  
Ergebnisse der Analysen des gegenwärtigen und Projektionen des künftigen  
regionalen Klimawandels in Sachsen sowie voraussichtlich resultierende Folgen in  
Land-, Forst- und Wasserwirtschaft  
[http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/luft-laerm-  
klima\\_246.html](http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/luft-laerm-<br/>klima_246.html)
  
- **Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren  
Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Land- und Forstwirtschaft sowie die  
Ableitung erster Perspektiven**  
<http://www.mluv.brandenburg.de/cms/media.php/2328/kstudi03.pdf>

- **"Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen -Ergebnisse der BayFORKLIM-Forschung 1991-1994"**  
<http://www.bayforklim.uni-muenchen.de/>
  
- **Bericht zum Klimaschutz im Bereich Land- und Forstwirtschaft , vom 18. Januar 2005**  
<http://www.verbraucherministerium.de/index-0007D18BEC671DDCBC3D01A5C0A8E066.html>
  
- **Der aktuelle ForschungsReport 1/2005 Schwerpunkt: Klimawandel und die Folgen**  
<http://www.bmvel-forschung.de/index.cfm?000CFDE53AF01FD4B8E66521C0A8D816>
  
- **Wetterkatastrophen und Klimawandel - Sind wir noch zu retten?**  
Mit diesem Sammelband legt die GeoRisikoForschung der Münchener Rück eine umfassende Bestandsaufnahme zum Klimawandel vor. In verständlich geschriebenen Beiträgen skizzieren 22 renommierte Experten aus Wissenschaft und Wirtschaft den aktuellen Stand der Forschung. In Einzelbeiträgen werden Ursachen, Auswirkungen und Zusammenhänge der globalen Entwicklung aus unterschiedlichen Perspektiven geschildert.  
<http://www.munichre.com/>
  
- **Politiksznarien für den Klimaschutz** : Langfristszenarien und Handlungsempfehlungen ab 2012, P. Markewitz; H.-J. Ziesing, Berlin 2004; UBA-Bibliothek: Signatur: UBA-FB 000752      Weitere Informationen:  
<http://www.munichre.com/>
  
- **Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimaauswirkungen**  
Ein Beitrag zum BMBF- Rahmenprogramm „Forschung für die Nachhaltigkeit“  
Abschlussbericht vom 3.11.2004:  
[http://www.bmbf.de/pub/forschung\\_fuer\\_den\\_klimaschutz\\_schutz\\_vor\\_klimawirkung.pdf](http://www.bmbf.de/pub/forschung_fuer_den_klimaschutz_schutz_vor_klimawirkung.pdf)
  
- **Herausforderung Klimawandel, Publikation**  
<http://www.bmbf.de/pub/klimawandel.pdf>

## 4. Wichtige Links

<b>Internationale Klimapolitik</b>	
Klimarahmenkonvention (UNFCCC)	<a href="http://www.unfccc.int/">http://www.unfccc.int/</a>
Zwischenstaatlicher Ausschuss für globalen Klimawandel (IPCC)	<a href="http://www.ipcc.ch">http://www.ipcc.ch</a>
Deutsche Koordinierungsstelle des IPCC	<a href="http://www.d-ipcc.de/D-IPCC">http://www.d-ipcc.de/D-IPCC</a>
Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP)	<a href="http://climatechange.unep.net/">http://climatechange.unep.net/</a>
Kyoto-Protokoll (dt. Fassung)	<a href="http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/protodt.pdf">http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/protodt.pdf</a>
Sekretariat des Übereinkommens der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Wüstenbildung (UNCCD)	<a href="http://www.unccd.int/">http://www.unccd.int/</a>
<b>Europäische Klimapolitik</b>	
Europäisches Klimaschutzprogramm	<a href="http://europa.eu.int/comm/environment/climat/eccp.htm">http://europa.eu.int/comm/environment/climat/eccp.htm</a>
Klimabündnis	<a href="http://www.klimabuendnis.org/">http://www.klimabuendnis.org/</a>
Klimaaktionsnetzwerk Europa (CAN)	<a href="http://www.climnet.org/">http://www.climnet.org/</a>
Umweltbundesamt	<a href="http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz/index.htm">http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz/index.htm</a>
Nationales Klimaschutzprogramm	<a href="http://www.bmu.de/de/800/js/download/b_klimaschutzprogramm2000">http://www.bmu.de/de/800/js/download/b_klimaschutzprogramm2000</a>

<p>Klima-Portal ProClim Klimaänderung, globale Umweltfolgen und Boden: Von Degradierung, Wüstenbildung und Restaurierung</p>	<p><a href="http://www.climate-change.ch/Boden/welcome.html">http://www.climate-change.ch/Boden/welcome.html</a></p>
<p>Deutsches Klimarechenzentrum/ Übersicht über Forschungsprojekte und Statusberichte</p>	<p><a href="http://www.dkrz.de/dkrz/science/intro_science">http://www.dkrz.de/dkrz/science/intro_science</a></p>
<p>Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) Forschungsfelder</p>	<p><a href="http://www.pik-potsdam.de/research/index_html_d">http://www.pik-potsdam.de/research/index_html_d</a></p>
<p>Das Klimainformationssystem des Deutschen Wetterdienstes (DWD) - KLIS</p>	<p><a href="http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/">http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/</a></p>
<p>Klimawandel in der Netzeitung</p>	<p><a href="http://www.netzeitung.de/servlets/page?section=1004">http://www.netzeitung.de/servlets/page?section=1004</a></p>
<p>Klimaschutz in Sachsen</p>	<p><a href="http://www.smul.sachsen.de/de/wu/klimaschutz/index.html">http://www.smul.sachsen.de/de/wu/klimaschutz/index.html</a></p>
<p>Leibniz-Zentrums für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V. Müncheberg</p>	<p><a href="http://www.zalf.de/home_zalf/">http://www.zalf.de/home_zalf/</a></p>
<p>Umweltinformationsnetz Deutschland (German Environmental Information Network, <i>gein</i>®) erschließt die über die Webseiten zahlreicher öffentlicher Einrichtungen - wie Umweltbehörden, Bundes- und Landesämter, Ministerien - verteilt gelegenen Informationen</p>	<p><a href="http://www.gein.de">www.gein.de</a></p>

## Klimaänderungen - Herausforderungen für den Bodenschutz

### Rückmeldebogen zum Überblick des UBA

Umweltbundesamt  
FG II 4.2  
E-Mail: postfachII4.2@uba.de  
Fax: 0340 2104 3302

FuE Aktivitäten:

---

Arbeitsgruppen, Netzwerke:

---

Publikationen:

---

Internetlinks:

---

Hinweise, Anmerkungen: \_\_\_\_\_

**Name:**

**Institution:**

**Anschrift:**

**E-Mail:**

**Telefonnummer:**