

Jahrgang 38 Heft 1/2 2012

**promet**

meteorologische fortbildung

# Agrar- und Forstmeteorologie



**Herausgeber**  
Deutscher Wetterdienst

**Hauptschriftleiter**  
Dr. J. Rapp (Offenbach/M.)

**Redaktionsausschuss**  
Prof. Dr. G. Adrian (Offenbach/M.)

Prof. Dr. B. Ahrens (Frankfurt/M.)  
PD Dr. F. Berger (Lindenberg)  
Prof. Dr. B. Brümmer (Hamburg)  
Prof. Dr. G. C. Craig (München)  
Prof. Dr. S. Jones (Offenbach/M.)  
Prof. Dr. G. Groß (Hannover)  
Prof. Dr. A. Macke (Leipzig)  
Dr. E. Rudel (Wien)  
Prof. Dr. C.-D. Schönwiese (Frankfurt/M.)

**Technische Herausgabe (Layout)**  
S. Stummvoll (DWD, Offenbach/M.)

**Internet**  
[www.dwd.de/promet](http://www.dwd.de/promet)

*promet* erscheint im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes – Frankfurter Str. 135, 63067 Offenbach am Main. Bezugspreis pro Jahrgang im Abonnement 24,08 €, Doppelheft 13,91 €, Dreifachheft 20,87 € plus Versandkosten.

Für den Inhalt der Arbeiten sind die Autoren verantwortlich. Alle Rechte bleiben vorbehalten.

Auflage: 3500

**Druck:**  
kraus print u. media GmbH & Co. KG  
Am Angertor 11  
97618 Wülfershausen

**Bezug:**  
Deutscher Wetterdienst  
Fachinformationsstelle und  
Deutsche Meteorologische Bibliothek  
Frankfurter Str. 135  
63073 Offenbach a. M.

ISSN 0340-4552 (Druck)  
ISSN 2194-5990 (Internet, pdf)

Redaktionsschluss: 1. Februar 2013

## Meteorologische Fortbildung

38. Jahrgang, Heft 1/2, 2012

Thema des Heftes: **Agrar- und Forstmeteorologie**

Fachliche Redaktion: K.-P. Wittich, Braunschweig  
Fachliche Durchsicht: G. Groß, Hannover; H. Mayer, Freiburg

<b>Kapitel</b>	<b>Seite</b>
Zu diesem Heft (K.-P. Wittich, H. Mayer)	1
F.-J. LÖPMEIER, K.-P. WITTICH, C. FRÜHAUF, S. SCHITTENHELM	
<b>1</b> Entwicklungen und Stand der Aktivitäten in der Agrarmeteorologie	2-10
H. BRADEN	
<b>2</b> Agrarmeteorologische Modelle des Wasser- und Energiehaushaltes beim Deutschen Wetterdienst	11-19
R. MANDERSCHIED, H.-J. WEIGEL	
<b>3</b> Das Braunschweiger FACE-Experiment	20-31
F.-M. CHMIELEWSKI, K. BLÜMEL	
<b>4</b> Klimawandel und Obstbau	32-41
B. KÖSTNER, K.-O. WENKEL, CH. BERNHOFER	
<b>5</b> Neue modellbasierte Informationssysteme für Klimafolgenzenarien in der Landwirtschaft	42-52
U. BUSCH, W. JANSSEN, C. PERSEKE-OCKELMANN	
<b>6</b> Das Beratungsangebot des Deutschen Wetterdienstes für die Land- und Forstwirtschaft	53-58
T. GRÜNWALD, A. KNOHL, CH. BERNHOFER	
<b>7</b> Energie- und Stoffflüsse über verschiedenen Landnutzungen	59-68
V. GOLDBERG, H. MAYER, D. SCHINDLER, D. SÖHL, CH. BERNHOFER	
<b>8</b> Entwicklungen in der Forstlichen Meteorologie	69-79
U. SPANK, CH. BERNHOFER	
<b>9</b> Beschreibung, Messung und Modellierung von Wasserhaushalt und Wasserhaushaltskomponenten von Wäldern	80-91
D. SCHINDLER, H. MAYER	
<b>10</b> Naturgefahren für die Wälder Europas: Winterstürme	92-100
A. NOTHDURFT, D. CULLMANN, H.-G. MICHELS, H. PUHLMANN, C. YUE, U. KOHNLE, G. KÄNDLER, K. v. WILPERT	
<b>11</b> Forstliche Forschung zur Entwicklung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel	101-111
Anschriften der Autoren dieses Heftes	112-113
Vorschau	

---

## Agrar- und Forstmeteorologie

---

### *Zu diesem Heft*

*Die Gesamtfläche Deutschlands verteilt sich gegenwärtig auf etwa 50 % Landwirtschaftsfläche, 30 % Waldfläche sowie auf andere Nutzungsareale. Steigender Verbrauch natürlicher Ressourcen und steigender Energiebedarf gehen in der Regel mit Eingriffen in den Naturhaushalt einher und stehen häufig in Konflikt mit dem Erhalt des Lebensraums sowie mit dem Schutz der Umwelt. Darüber hinaus sind Natur- und Kulturlandschaften einem ständigen Anpassungsdruck durch Witterungsextreme und Klimawandel unterworfen. In der Summe können derartige Störeinflüsse die Stabilität von Ökosystemen gefährden und zu einem Biodiversitätsverlust führen. Um die Belastung der Ökosysteme so gering wie möglich zu halten und um gleichzeitig die natürliche Lebensgrundlage zu sichern, ist umweltgerechtes Handeln erforderlich, welches durch die Agrar- und Forstmeteorologie unterstützt wird.*

*Die zur Biometeorologie gehörigen Teilgebiete Agrar- und Forstmeteorologie sind per se interdisziplinär aufgestellt. Schnittstellen bestehen sowohl zur Hydro- und Grenzschichtmeteorologie als auch zu biologischen bzw. land- und forstwirtschaftlichen sowie ökologischen und ökonomischen Fachrichtungen. Während die Agrar- und Forstmeteorologie bis in die 1980er Jahre überwiegend von nur wenigen Universitätsinstituten und dem Deutschen Wetterdienst als Spezialdisziplin betrieben wurden, entwickelten sich beide Teilgebiete im Laufe der Folgejahre, getragen vom wachsenden Umweltbewusstsein, zu breit aufgestellten Fachdisziplinen.*

*Die Fortbildungszeitschrift **promet** hat sich bereits in mehreren Ausgaben verschiedenen agrar- bzw. forstmeteorologischen Aspekten gewidmet. Unter anderem wurden traditionelle agrarmeteorologische Arbeitsgebiete vorgestellt (Heft 1 1975), die Bedeutung von Agrar- und Forstmeteorologie im Rahmen der Biometeorologie hervorgehoben (Heft 3/4 1982) sowie Schnittstellen zu Nachbardisziplinen wie der Hydrometeorologie aufgezeigt (Heft 2/3 1986). Ferner wurde die Phänologie als Teil der Agrar- und Forstmeteorologie aufgegriffen (Heft 1/2 2007) und die Thematik allergener Pollen (aus medizin-meteorologischer Sicht) behandelt (Heft 3/4 2007).*

*Für die erneute Darlegung des aktuellen Wissensstandes der Agrar- und Forstmeteorologie gibt es verschiedene Gründe, die natürlich in der Erweiterung bzw. Verschiebung des Themenspektrums zu suchen sind. So wird zum Beispiel dem Klimawandel seit drei Jahrzehnten von wissenschaftlicher Seite verstärktes Interesse entgegengebracht. Inzwischen sind Anpassungsmaßnahmen an das sich ändernde Klimasystem Teil des land- und forstwirtschaftlichen Handelns. Die Thematik hat damit eine Bedeutung erlangt, die angemessen in diesem Heft berücksichtigt werden sollte. Allein vier Artikel gehen auf unterschiedliche Facetten des Klimawandels ein (Chmielewski und Blümel, Manderscheid und Weigel, Köstner et al., Nothdurft et al.). Teilaspekte werden auch von Löpmeier et al. angesprochen, die zugleich die aktuellen Arbeitsgebiete der Agrarmeteorologie innerhalb des DWD vorstellen. Da dem DWD neben der Wissenserzeugung auch der Wissenstransfer zu den Nutzern obliegt, ist ein weiterer Artikel (Busch et al.) der aktuellen Beratungspraxis gewidmet, während grundlegende agrarmeteorologische Modelle des Wasser- und Energiehaushalts von Braden beschrieben werden. Andere Themen befassen sich mit Messungen von Energie- und Stoffflüssen über verschiedenen Landflächen (Grünwald et al.), mit einem Überblick über forstmeteorologische Fragestellungen (Goldberg et al.) sowie mit speziellen forstmeteorologischen Aspekten des Wasserhaushalts (Spank und Bernhofer). Der Sturmgefährdung der Wälder (als wichtigster Vertreter unter den Naturgefahren im Forstbereich) ist ebenfalls ein Beitrag gewidmet (Schindler und Mayer).*

*Klaus-Peter Wittich und Helmut Mayer*

F.-J. LÖPMEIER, K.-P. WITTICH, C. FRÜHAUF, S. SCHITTENHELM

# 1 Entwicklungen und Stand der Aktivitäten in der Agrarmeteorologie

Development and current level of activities in agrometeorology

## Zusammenfassung

Die Agrarmeteorologie dient dem Ziel, die in hohem Maße vom Wettergeschehen abhängige Landwirtschaft bei der Abwehr wetterbedingter Risiken zu unterstützen und die landwirtschaftliche Produktion sowohl unter ökonomischen als auch ökologischen Gesichtspunkten zu begleiten. Aus diesem Grunde befasst sie sich hauptsächlich mit den zwischen Boden, Pflanze und Atmosphäre auftretenden mikroklimatischen Wechselwirkungen. Das gewonnene Prozessverständnis ermöglicht die Bearbeitung landwirtschaftlich relevanter Themen wie Beregnung, Frostschutz, Ertragsprognosen, Stoff- und Partikeltransporte sowie Pflanzenkrankheiten. In dem Artikel werden einige agrarmeteorologische Arbeitsfelder aus den Bereichen Mikrometeorologie, Pflanzenschutz und Klimawandel vorgestellt. Hingewiesen wird auf den Deutschen Klimaatlas des DWD, der unter anderem die zu erwartenden klimatischen Auswirkungen auf die Landwirtschaft veranschaulicht.

## Summary

Agrometeorology follows the purpose of protecting the highly weather-dependent agriculture from weather-related risks and supporting agricultural production processes from both economic and environmental viewpoints. Therefore, it mainly deals with the microclimatic interaction between soil, plant and atmosphere. Understanding of the processes allows dealing with agriculturally important topics, such as irrigation, frost protection, yield forecasts, transport of matter, and plant diseases. This article presents selected agrometeorological topics relating to micrometeorology, plant protection and climate change. It mentions the DWD's „German Climate Atlas“, which, inter alia, depicts the expected impact of climate change on agriculture.

## 1 Einleitung

Die Landwirtschaft zählt zu jenen Wirtschaftszweigen, die in hohem Maße vom Wetter abhängig und deshalb auf meteorologische Unterstützung angewiesen sind. Nach der Errichtung eines ersten agrarmeteorologischen Beobachtungsdienstes in Böhmen im Jahr 1827 und nach der Erprobung eines ersten telegraphischen Wetterwarndienstes für die Landwirtschaft in den Jahren 1862 bis 1864 in Mecklenburg wurde im Jahr 1878 seitens des Deutschen Landwirtschaftsrates der Wunsch nach einer für den Agrarbereich nützlichen Wettervorhersage geäußert. Herangetragen wurde er an die Deutsche Seewarte, dem Wetterdienst des damaligen Deutschen Reiches. Bis zur Erstellung zuverlässiger Prognosen sollten allerdings noch mehr als sieben Jahrzehnte vergehen.

Bis in die 1960er Jahre standen zunächst die Ertragssicherung und Ertragssteigerung im Vordergrund der landwirtschaftlichen Aufgaben. In den Folgejahren wandelten sich

die Aktivitäten hin zur Steigerung der Produktqualität und -vielfalt, was unter zunehmend strengeren Umweltauflagen zu geschehen hatte. Schließlich werden seit einigen Jahren Fragen behandelt, wie auf die Folgen des Klimawandels zu reagieren ist und welcher eigene Beitrag zur Abmilderung der Klimafolgen geleistet werden kann. Aufgrund der Vielzahl von Berührungspunkten zur Meteorologie ist die Agrarmeteorologie eine gefragte Fachdisziplin (siehe auch Beitrag BUSCH et al. in diesem Heft).

Kernthema der Agrarmeteorologie ist die Überwachung des Mikroklimas von Böden und Beständen und damit die Kontrolle der jeweiligen Energiebilanzen und Wasserhaushalte. Zusätzlich widmet sich die Agrarmeteorologie den Stofftransporten zwischen der Landoberfläche und der angrenzenden Atmosphäre (siehe Beitrag GRÜNWALD et al. in diesem Heft). Neben den Stoffflüssen gasförmiger Beimengungen (zum Beispiel Ozon, Kohlenstoffdioxid, Ammoniak, Pflanzenschutzmittel) spielen auch Transporte fester, sedimentierbarer Bestandteile

eine Rolle, wie etwa Sporen-, Pollen- oder Sandtransporte (Erosion). Ein weiteres Teilgebiet der Agrarmeteorologie befasst sich mit der Steuerung des Mikroklimas, um den Einfluss von Witterungswidrigkeiten auf angebaute Kulturen zu mildern, das Pflanzenwachstum zu fördern und um frühere und ertragreichere Ernten zu erzielen. Beispielhaft seien genannt die Bestimmung optimaler Beregnungszeiten und -mengen zur Vermeidung von Trockenstresssituationen, die Terminierung von Frostschutzberegnungen zur Abwehr vegetativer Zerstörungen durch Spätfröste und die Optimierung des Mikroklimas durch moderne Anbauverfahren (Anbau unter Folie, Vlies und Glas).

In den letzten Jahren wurden innerhalb der landwirtschaftlichen Forschung verschiedene agrarmeteorologisch begleitete Untersuchungen durchgeführt, die sich mit der Auswirkung des Klimawandels auf pflanzenphysiologische Reaktionen und auf das Ertragsverhalten befassen. Zu den Einflussgrößen zählen zum Beispiel erhöhte Kohlenstoffdioxidkonzentrationen (siehe Beitrag MANDERSCHIED und WEIGEL in diesem Heft) und Wassermangel.

Alle Fragestellungen werden sowohl experimentell als auch theoretisch behandelt: Die experimentelle Agrarmeteorologie bedient sich einerseits traditioneller Messmethoden, andererseits moderner Flussmessverfahren und der Fernerkundungstechnologie. Die theoretische Agrarmeteorologie befasst sich dagegen mit der deterministischen, physikalisch-mathematischen Modellierung von komplexen boden- und bestandsklimatischen Prozessen sowie mit der Simulation von Stofftransporten. Ferner werden Pflanzenkrankheits- und Schaderregermodelle zum Zweck der Ertragssicherung entwickelt. Sie schätzen Infektions- und Populationsniveaus ab und signalisieren bekämpfungswürdige Schadschwellen.

Sowohl die theoretische Agrarmeteorologie als auch die landwirtschaftliche Praxis greift auf phänologische Beobachtungen zurück, um bestandsklimatische Prozesse genauer zu simulieren und um landwirtschaftliche Maßnahmen besser zu terminieren. Zudem dienen phänologische Daten dem Nachweis des Witterungseinflusses auf die Pflanzenwelt (siehe Beitrag CHMIELEWSKI und BLÜMEL in diesem Heft).

Das anschließende Kapitel befasst sich mit einigen repräsentativen Tätigkeitsfeldern aus den Bereichen Mikrometeorologie, Pflanzenschutz und Klimafolgenabschätzung.

## 2 Mikroklima

Da der Hauptenergieumsatz der planetaren Grenzschicht an der Bodenoberfläche beziehungsweise nahe des Oberlandes der Pflanzenbestände erfolgt, widmet sich die Agrarmeteorologie überwiegend mikrometeorologischen Fragestellungen. Vorgestellt werden nachfolgend einige spezielle Parameter, die in den letzten Jahren im Mittelpunkt des Interesses standen.

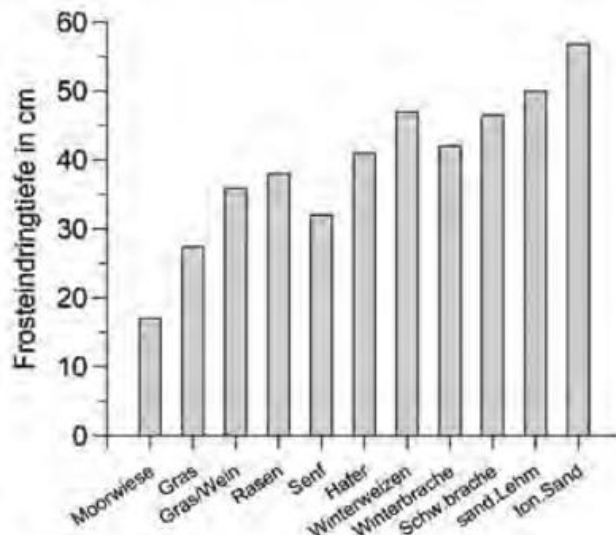


Abb. 1-1: Morgentliche Frosteindringtiefe unter verschiedenen Versuchsflächen des DWD Braunschweig, gemessen am 10. Februar 2012.

### 2.1 Frosteindringtiefe

Die Bodenfrosteindringtiefe ist vor allem im Zusammenhang mit der Ausbringung von Flüssigdünger (Gülle) auf landwirtschaftlichen Flächen am Ausgang des Winters von Bedeutung, da durch Bodenfrost die Ausbringungszeiten eingeschränkt werden.

Üblicherweise erfolgt die Bestimmung der Bodenfrosteindringtiefe durch Auswertungen des Bodentemperaturprofils auf Klimamessfeldern, wobei Bodenschichten mit einer Temperatur  $\leq 0$  °C als gefroren gelten. Diese Bestimmungsmethode hat Nachteile; denn zum einen muss zwischen den Messfühlertiefen, die zum Teil einen Abstand von bis zu 50 cm aufweisen, interpoliert werden, was mit Ungenauigkeiten verbunden ist. Zum anderen sind die Messstellen, die sich in einem unbewachsenen Bodenareal befinden, nicht repräsentativ für die nähere bewachsene Umgebung.

Eine alternative Methode ist deshalb die Bestimmung der Bodenfrosteindringtiefe mit dem Bohrstock, indem das Gefrieren über den Härtezustand des Bodenprofils und – bei leichteren Böden – über beobachtete Eiseinlagerungen bestimmt wird. Diese Methode ist allerdings mit großem manuellem Messaufwand und, bei auftauenden Böden, auch mit Schwierigkeiten bei der Bestimmung des Härtezustandes verbunden. Um diese Probleme zu umgehen, wurde seitens des DWD eine eigene Messeinrichtung entwickelt. Deren Prinzip beruht darauf, dass eine Doppelröhre aus Kunststoff (Gesamtlänge = 120 cm, Messtiefe = 80 cm, Durchmesser = 12 mm) im Spätherbst senkrecht in den Boden gebracht wird und dort bis zum nächsten Frühjahr verbleibt. Eine der Röhren ist mit destilliertem Wasser gefüllt, während die zweite einen Metallstab enthält. Am unteren Ende der Wasserröhre befindet sich ein Magnet, der durch den in der freien Röhre zu bewegenden Stab angehoben werden kann. Sobald der Magnet an das untere Ende der Eissäule stößt, wird die neue Stabposition mittels eines Messbandes als maximale Boden-

frosteindringtiefe angezeigt. Vergleiche mit Bohrstockmessungen belegen die Brauchbarkeit des Messsystems.

Zeitgleiche Messungen mit dieser neuen Methode in verschiedene Böden zeigen, dass die Bodenfrosteindringtiefe je nach Bodenart, Bodenfeuchte, Bewuchs und den meteorologischen Randbedingungen variiert. Unbewachsene Böden weisen tendenziell höhere Frosteindringtiefen auf als bewachsene, während in wasserspeichernden Moorwiesen die geringste Eindringtiefe beobachtet wird. An 13 Vortagen der in Abb. 1-1 dargestellten Messungen hat die stündliche 2 m-Lufttemperatur durchgehend unter 0 °C gelegen, was zu einer maximalen Frosttiefe von 57 cm im vegetationsfreien, tonigem Sand führte.

Um mehrtägige Prognosen der Frosteindringtiefe unter verschiedenen Kulturen zu erstellen, müssen Bestandsklimamodelle eingesetzt werden, wie zum Beispiel das SVAT-Modell BEKLIMA (siehe Beitrag BRADEN in diesem Heft).

## 2.2 Einfluss von Stroh auf das Mikroklima

In Erdbeerplantagen ist es üblich, Stroh auf dem Boden auszubringen, um die Früchte vor der Verschmutzung mit Sandpartikeln zu schützen. Erfolgt das Ausbringen des Strohs zu früh und tritt nachfolgend Bodenfrost auf, kann dies ertragsmindernde Folgen haben. Der Grund hierfür ist, dass die Strohaufgabe aufgrund der Lufteinschlüsse wärmeisolierend wirkt. Nächtliche Wärmetransporte vom Bodeninnern an die Strotoberfläche werden nahezu unterbunden, weshalb sich die Luft unmittelbar über dem Stroh deutlich stärker abkühlen kann als über dem strohfreien Boden. Die Abb. 1-2 zeigt den Einfluss von Strohschichten unterschiedlicher Auflagengewichte (1 kg m<sup>-2</sup> und 2 kg m<sup>-2</sup>) auf das Temperaturverhalten. Ferner ist der Einfluss eines unbedeckten Bodens dargestellt. Auf allen drei Flächen wurde die Lufttemperatur in 5 cm Höhe gemessen, was dem typischen Messniveau der Erdboden-Minimumtemperatur entspricht. In der dargestellten Frostnacht des 22.3.2011 lag die Minimumtemperatur bei -1,2 °C über unbewachsenem Boden und bei -2,7 und -3,9 °C über der leichten bzw. schweren Strohaufgabe. Diese horizontalen Unterschiede wurden durch Thermografieaufnahmen einer Infrarotkamera bestätigt, welche die von den Oberflächen ausgehende thermische Strahlung in eine Oberflächentemperatur transformiert und diese als Temperaturbild sichtbar macht. Hiernach betrug die

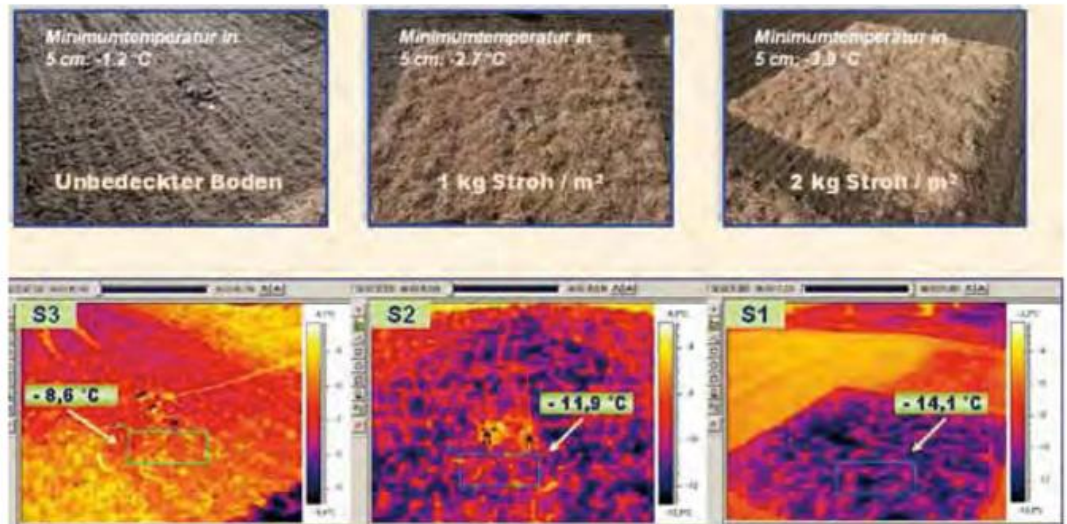


Abb. 1-2: Nächtliches Minimum der Lufttemperatur in 5 cm Höhe über unbedecktem Boden und über zwei unterschiedlich starken Strohschichten sowie thermografisch erfasste Oberflächentemperaturen (Braunschweig, 22.3.2011, 06:03 MEZ).

nächtliche Oberflächentemperatur des unbewachsenen Bodens -8,6 °C, die der leichten Strohaufgabe -11,9 °C und jene der schweren Auflage -14,1 °C. Als praxisrelevantes Ergebnis dieses Versuchs wird Erdbeererzeugern geraten, Strohaufgaben möglichst spät, das heißt nach den letzten erwarteten Spätfrostperioden auszubringen. Insbesondere gilt dies für den Anbau in frostgefährdeten Muldenlagen.

## 2.3 Stofftransporte und Emissionen

Partikeltransporte, wie zum Beispiel Sandtransporte durch Winderosion, Sporen- und Pollentransporte, gehören zu den klassischen Arbeitsgebieten der Agrarmeteorologie. Fragestellungen betreffen zum Beispiel die optimale Struktur winderosionshemmender Windschutzhecken, die Transporthöhen der vom Boden mit Spritzwasser verfrachteten pathogenen Pilzsporen (siehe Abschnitt 3), und die windinduzierten Nah- und Ferntransporte von Sporen und Pollen.

In jüngster Zeit wurde hohes Interesse jenen Umweltrisiken entgegengebracht, die durch Anbau gentechnisch veränderter (gv-) Pflanzen wie zum Beispiel gv-Mais auftreten können. Während der Blüte lagern sich mit dem Wind verfrachtete Maispollen auf leeseitigen Flächen ab, wobei eine anschließende Schädigung der Mikroflora und -fauna nicht ausgeschlossen wird.

Da im Rahmen des Anbaus von gv-Pflanzen Abstandsaufgaben erarbeitet werden, um den Eintrag genveränderter Materials in benachbarte Ökosysteme weitestgehend zu verhindern und so genannte Nicht-Ziel-Organismen zu schützen, sind Beiträge der Agrarmeteorologie hinsichtlich der Erfassung der meteorologischen Nahfeldinformation erforderlich. Nachfolgend sind Messungen aufgeführt, die das Ziel verfolgten, innerhalb eines Maisfeldes die Pollenkonzentration sowie die beeinflussenden meteorologischen Größen für Pollenschüttungen zu ermitteln. Die Kenntnis des Emissionsverhaltens der Maisblüten sowie des einwir-

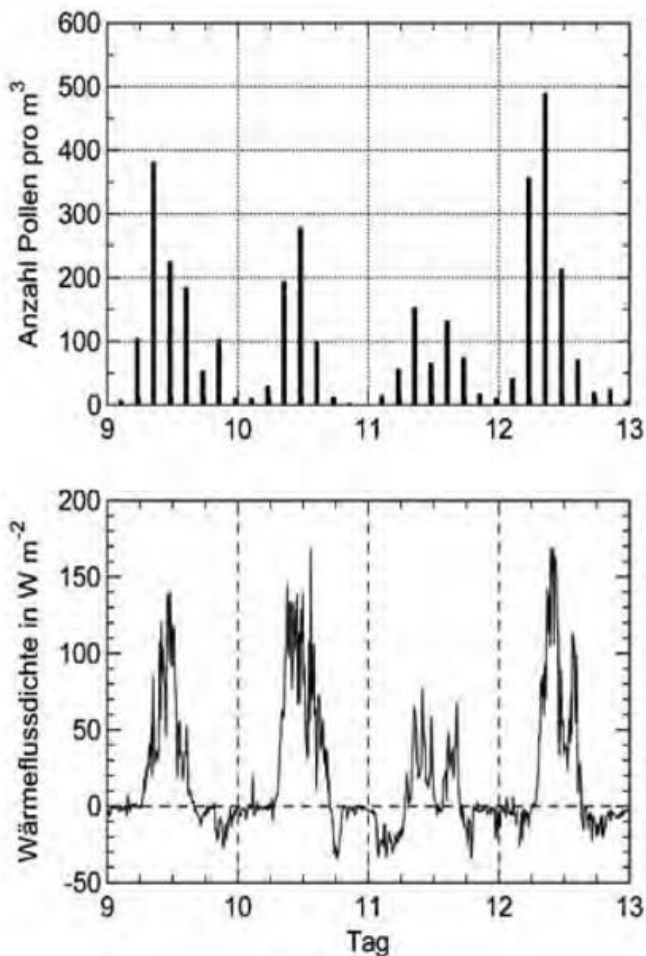


Abb. 1-3: Tagesgänge der Pollenkonzentration über einem Maisfeld (oben) und der Flussdichte des turbulenten Wärmestroms (unten; positives Vorzeichen: Flussrichtung von der Landoberfläche in die Atmosphäre, negatives Vorzeichen: Gegenrichtung). Die Messung erfolgte an Tagen mit hohen Pollenschüttungen (9.-12.8.2010).

kenden mikroklimatischen Umfeldes ist Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Modellierung des Pollennah- und -ferntransportes.

Die Abb. 1-3 zeigt einen viertägigen Ausschnitt aus dem zeitlichen Verlauf der Pollenschüttung während der Maisblüte mit maximalen Ausstößen während der frühen Mittagsstunden und vernachlässigbarer Emission in der Nacht. Der Tagesgang der Pollenkonzentration folgt näherungsweise dem Tagesgang der Labilität der Atmosphäre, dargestellt durch die aufwärtsgerichtete Komponente der Wärmeflussdichte. Alternativ wird von VAN HOUT et al. (2008)  $\sigma_w$  (= Standardabweichung der vertikalen Geschwindigkeitskomponente) als stimulierende Größe favorisiert, die hier nicht abgebildet ist, sich aber ähnlich wie die Wärmestromdichte verhält. Die Messung der Turbulenzgrößen erfolgte mit einem dreidimensionalen Ultraschallanemometer (Abb. 1-4). Für den Nachweis der in der Luft befindlichen Pollen wurde ein vom DWD entwickelter Sporensammler eingesetzt, der in der Lage ist, auch großvolumige Pollen – wie jene von Mais (Durchmesser:  $\sim 100 \mu\text{m}$ ) – zu erfassen. Für Emissionsmuster, die vom Tagesgang des Wärmeflusses deutlich abweichen, können biologische Grenzen der Pollenfreisetzung in Frage kommen. So müssen nach erfolgten Schüt-

tungen neue Pollen in ausreichender Anzahl erst heranreifen, damit unter gleichen thermischen Bedingungen ähnlich hohe Freisetzungsraten registriert werden können.

### 2.4 Blattbenetzung

Der Blattbenetzung kommt in der Agrarmeteorologie eine besondere Bedeutung zu, denn zum einen ist sie Bestandteil des Energie- und Wasserhaushalts mit entsprechenden Auswirkungen auf das Bestandsmikroklima, zum anderen übt sie einen Einfluss auf die Entwicklung pilzlicher Pflanzenkrankheiten aus. Aus landwirtschaftlicher Sicht haben Benetzungsereignisse zudem Auswirkungen auf die Heu- und Kornfeuchte und damit auf den Zeitpunkt des Erntetermins.

Blattbenetzungsereignisse sind zunächst eine Folge der auf die Vegetation einwirkenden Niederschlagsprozesse, wozu nicht nur Regenereignisse sondern auch Tauereignisse zählen. Darüber hinaus spielt die Interzeptionsfähigkeit der Pflanzen eine Rolle. Diese äußert sich darin, dass in Abhängigkeit von der Blattoberflächenstruktur ein Teil des auftreffenden oder durch Phasenumwandlung sich bildenden Wassers auf der Vegetation verbleibt und nicht abtropft. Die Gesamtmenge des zurückgehaltenen Wassers richtet sich überwiegend nach der Gesamtfläche der Blätter pro Bodeneinheitsfläche. Dieses Verhältnis wird durch den Blattflächenindex *LAI* ausgedrückt (*LAI* = Leaf-Area-Index, Maß für die Anzahl der Blätter in  $\text{m}^2$  Blattfläche pro  $\text{m}^2$  Bodenfläche). Typische *LAI*-Werte für geschlossene, das heißt völlig den Boden bedeckende Pflanzenbestände liegen in der Größenordnung von 4 bis 6. Geht man überschlagsmäßig davon aus, dass pro *LAI* 0.1 bis 0.3 mm Niederschlagswasser auf den Blättern interzipiert werden kann, wird etwa 1 mm Wasser eines singulären Tagesniederschlagsereignisses vom Auftreffen auf den Bestandsboden abgehalten. Bei intermittierenden Regenereignissen kann dieser Tageswert sich noch erhöhen, sofern der Verdunstungsanspruch der Atmosphäre so hoch ist, dass zwischenzeitlich die Blattoberfläche abtrocknet.

Agrarmeteorologische Messungen der Blattbenetzung verfolgen allerdings nicht das Ziel, die interzipierte Wassermenge,



Abb. 1-4: Mikrometeorologische Messeinrichtung über einem Maisbestand.

sondern vielmehr die *Andauer* des Benetzungsereignisses zu ermitteln. Der Grund hierfür ist, dass pathogene Pilzsporen nach ihrer Freisetzung eine mehrstündige Benetzungszeit benötigen, um in ihre Wirtspflanze einzudringen ohne vorher abzusterben (siehe Abschnitt 3). Insofern ist die Messung der Benetzungszeit von ertragsichernder Bedeutung.

Die Messung der Blattbenetzungsdauer erfolgt mit unterschiedlichsten Verfahren. Vor mehr als drei Jahrzehnten wurden Methoden benutzt, die auf der Längenänderung von Hanfschnüren (ähnlich dem Prinzip des Haarhygrometers) beruhten. Aus dieser Zeit stammt auch die „90 %-Regel“, die Zeiträume mit relativen Luftfeuchten größer als 90 % als Benetzungszeiträume interpretiert. In den letzten drei Jahrzehnten setzten sich elektronische Verfahren durch, bei denen zum Beispiel kleine Kunststoffplatten oder filzartige Blattimitate mit Elektroden versehen wurden, so dass die Benetzung durch eine Widerstandsmessung erfasst wird. Auf ähnliche Weise funktionieren Drahtharfen, die direkt an Blättern montiert werden können.

Ein Problem der Blattbenetzungsmessung ist die fehlende Standardisierung, weshalb ein Vergleich der an verschiedenen Standorten gewonnenen Messergebnisse schwierig ist. Unterschiedliche Aufstellungshöhen, Sensorneigungen gegen die Horizontale, bestandsinterne und -externe Sensorinstallationen (siehe SENTELHAS et al. 2004) sowie unterschiedliche Sensorempfindlichkeiten müssen bei der Interpretation der Messergebnisse berücksichtigt werden.

Da die Blattbenetzung ein Ergebnis des Wärme- und Wasserhaushalts ist, eröffnet sich die Möglichkeit einer theoretischen Abschätzung. Abb. 1-5 zeigt eine mikrometeorologische Modellierung zweier Benetzungsereignisse, welche von einem kapazitiven plattenförmigen Messelement registriert wurden (Plattendimension: 1,5 cm × 5 cm; Montagehöhe: 2 m über Gras, horizontale Ausrichtung). Eines der Ereignisse wurde durch Regen, das andere durch Tau erzeugt.

Zur Berechnung der Blattbenetzungszeiten benutzt das Modell unabhängige Messungen des Niederschlags, der relativen Luftfeuchte und Lufttemperatur, der Windgeschwindigkeit und der kurz- und langwelligen Strahlung. Das Modell setzt die Dauer der Benetzungsperiode aus der Andauer fallenden Regens und einer am Ende der Regenperiode einsetzenden Tropfenverdunstungsperiode zusammen. Die Benetzungszeit der am Abend einsetzenden Taubildung beginnt mit dem Einsatzzeitpunkt des abwärts gerichteten Wasserdampfstroms und endet mit der vollständigen Verdunstung des nächtlichen Tauwassers (siehe WITTICH 2005). Modelle dieser Art sind die Voraussetzung für mehrtägige Blattbenetzungsprognosen, die zum Beispiel in Pflanzenschutzmodelle (siehe Abschnitt 3) einfließen.

### 3 Agrarmeteorologische Aspekte des Pflanzenschutzes

In der ersten *promet*-Ausgabe zur Agrarmeteorologie (Heft 1/1975) nahm die Vorhersage von Pflanzenkrankheiten noch einen breiten Raum ein. Erwähnt wurde die so genannte Phytophthora-Negativprognose, eine rein witterungs-, das heißt temperatur- und benetzungsbasierte Methode zur Vorhersage der durch Pilzbefall ausgelösten Kartoffelfäule. Diese Pilzerkrankung wird durch den Erreger *Phytophthora infestans* hervorgerufen, der um das Jahr 1840 von Amerika nach Europa gelangte. Bei warmfeuchter Witterung breitet er sich schlagartig innerhalb der Bestände aus, was hohe Ertragsverluste zur Folge haben kann. In Irland führte die Epidemie in den Jahren 1845/46 zu Hungersnöten und einer Auswanderungswelle (BOURKE und LAMB 1993).

Inzwischen hat der landwirtschaftliche Pflanzenschutzdienst eine rechnergestützte, interaktiv zu bedienende Prognosemethode der Kartoffelfäule entwickelt, die auf der Negativprognose aufbaut, aber über die alleinige Berücksichtigung des Witterungseinflusses hinausgeht (siehe Prognosemodell SIMPHYT unter [www.isip.de](http://www.isip.de)). Sie bietet dem Landwirt den

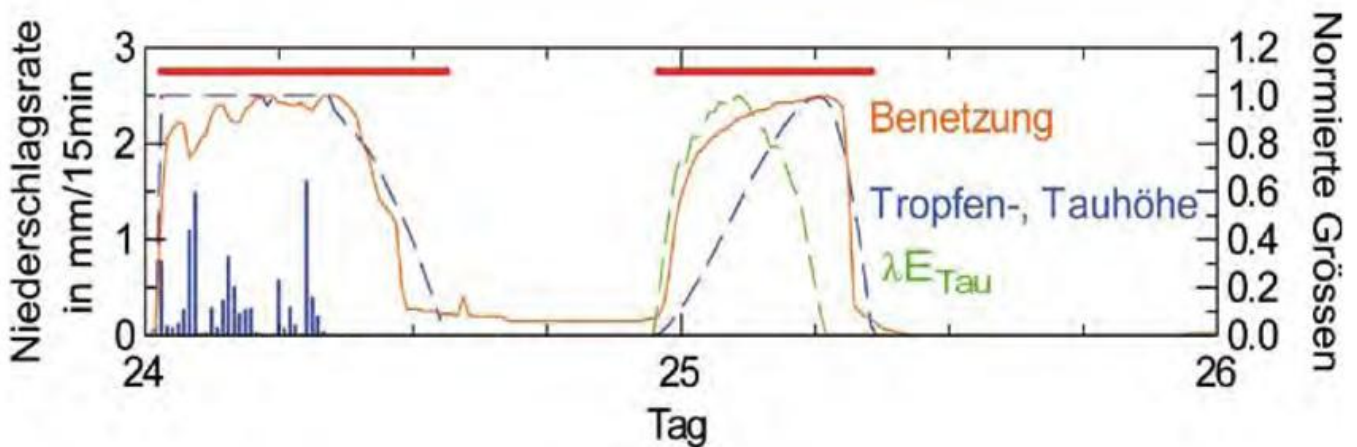


Abb. 1-5: Messung der Niederschlagsrate (vertikale blaue Balken, linke Ordinate) und der Benetzung (dünne rote Kurve, normiert auf den Bereich 0 bis 1, rechte Ordinate) sowie berechnete Benetzungsdauer (horizontale dicke rote Linien). Die Berechnung der durch Regen induzierten Benetzungsdauer basiert auf einer simulierten Höhenabnahme eines auf dem Sensor stehenden Wassertropfens (gestrichelte blaue Kurve links, normiert), während die Taubenetzungsdauer durch den Beginn der Tauakkumulation und das Ende der Tauverdunstung ermittelt wird. Diesbezüglich ist die zum Sensor gerichtete latente Wärmestromdichte (grüne gestrichelte Kurve, normiert) und die Höhe des Taufilms (blaue gestrichelte Kurve rechts, normiert) eingezeichnet. Die Darstellung zeigt, dass die Sensorcharakteristik durch das Modell adäquat wiedergegeben wird (Datengrundlage: 24.-25.4.2000, Braunschweig).

zusätzlichen Vorteil, den aktuellen Infektionsverlauf vor dem Hintergrund bisher selbst vorgenommener Bekämpfungsmaßnahmen zu beurteilen. Zudem wird zur Eindämmung des weiteren Infektionsverlaufs eine konkrete Mittelempfehlung (einschließlich der erforderlichen Aufwandmenge) gegeben sowie ein optimaler Bekämpfungstermin vorgeschlagen. Die Berücksichtigung chemischer Applikationen in den Modellen des Pflanzenschutzdienstes hat in den letzten Jahren die Bedeutung der agrarmeteorologischen, rein witterungsbezogenen Pflanzenkrankheitsmodelle ein wenig eingeschränkt. Dennoch bleibt überall dort, wo spezielle Parameter des Bestandsklimas für die Bekämpfung eine Rolle spielen, agrarmeteorologisches Wissen gefragt.

Ein Beispiel hierfür ist die Prognose des Falschen Mehltaus der Weinrebe, eine der wichtigsten Reberkrankheiten (LAFON und CLERJEAU 1988), ausgelöst durch den Erreger *Plasmopara viticola*. Dieser ursprünglich nicht in Europa heimische Pilz wurde im Jahr 1878 von Nordamerika nach Frankreich eingeschleppt. Da die europäische Kulturrebe *Vitis vinifera* gegen ihn nur über eine sehr geringe Widerstandskraft verfügt, war eine rasche Ausbreitung über alle europäischen Anbauggebiete die Folge.

Bodenbürtiges Inokulum (infektiöses Material) dieses Erregers gilt als Initial- beziehungsweise Primärauslöser der Rebenperonospora. Die im Falllaub des vorangegangenen Herbstes überwinterten Oosporen („Dauersporen“) reifen im Oberboden und werden während des Frühjahrs unter dem Einfluss ausreichend hoher Temperaturen ( $\geq 8\text{ }^\circ\text{C}$ ) und Wassergehalte ( $\geq 70\text{ \% nFK}$ , nFK = nutzbare Feldkapazität) im Oberboden keimbereit.



Abb. 1-7: Sogenannter Ölfleck auf der Blattoberseite (oben) und sich daraus entwickelnder Sporangienrasen auf der Unterseite eines Reblattes (unten).

Spritzwasser verfrachtet Oosporen und ausgekeimte Zoosporen („Schwärmosporen“) auf die jungen Reblätter. Durch die Stomata auf der Blattoberseite gelangen die Zoosporen in das Blattin-

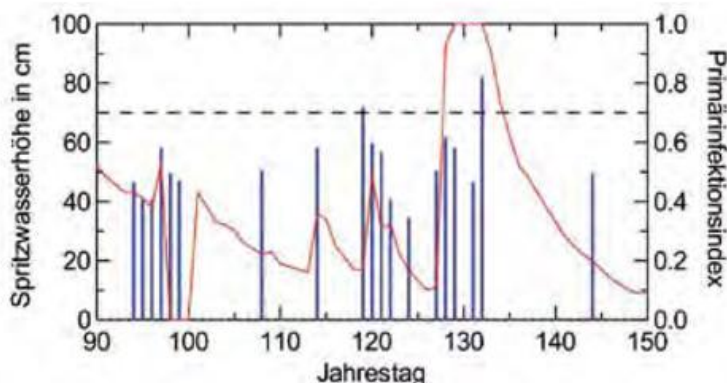


Abb. 1-6: Berechnete Spritzwasserhöhe (blaue Balken) und Primärinfektionsindex (rote Linie) für Geisenheim (2004). Eine hohe Infektionswahrscheinlichkeit liegt dann vor, wenn die Spritzwasserhöhe einen Scheitelwert von 70 cm übertrifft und der Primärinfektionsindex einen Wert von 0,7 überschreitet. Der Termin der Primärinfektion (11.5.2004; Jahrestag 132) wurde durch biologische Labortests bestätigt.

tere und beginnen die Pflanze zu schädigen (BERKELMANN et al. 2006).

Bodenbürtige Infektionen sind nur an jenen Tagen mit Niederschlag zu erwarten, an denen bereits vorangegangene Niederschlagsereignisse für eine hohe Bodenfeuchte gesorgt haben und an denen die auf den Boden treffenden Regentropfen soviel kinetische Energie besitzen, dass sie einen Spritzwassertransport bis in die Blattetagen ( $\geq 70\text{ cm}$ ) ermöglichen (siehe Abb. 1-6). Die Transporthöhen werden aus stündlichen Meldungen der Niederschlagsart und -rate ermittelt, wobei vor allem Schauer und Gewitterniederschläge als spritzwasserwirksam gelten.

Werden auf den Blättern sog. Ölflecke als Symptom der ersten bodenbürtigen Infektion sichtbar (siehe Abb. 1-7), ist ein witterungsabhängiger Pflanzenschutz notwendig. Auf der Blattunterseite bildet sich als Folge nächtlicher, mindestens vier Stunden andauernder Blattbenetzungszeiten ein Pilzrasen, von dem weitere Sekundärinfektionen ausgehen können. Zur Verhinderung von Qualitäts- und Ertragsverlusten werden mittels des vom DWD eingesetzten Peronospora-Modells die Termine möglicher Primär- und Sekundärinfektionen abgeschätzt, um Bekämpfungsmaßnahmen zu planen.

#### 4 Klimawandel

Die Landwirtschaft gilt einerseits als Mitverursacher des Klimawandels (zum Beispiel durch Emissionen von Methan und Lachgas), andererseits ist sie zugleich Betroffener und versucht, negative Auswirkungen des Klimawandels auf Erträge zu verhindern. Zudem setzt sie klimapolitische Empfehlungen um, wie zum Beispiel den Anbau von Energiepflanzen und die Errichtung von Biogasanlagen.

Die Agrarmeteorologie befasst sich einerseits mit den Chancen, die der Klimawandel zum Beispiel für den Weinanbau bietet, andererseits aber auch mit den Risiken, die zum Beispiel dürrebedingt im Getreideanbau auftreten können (sie-

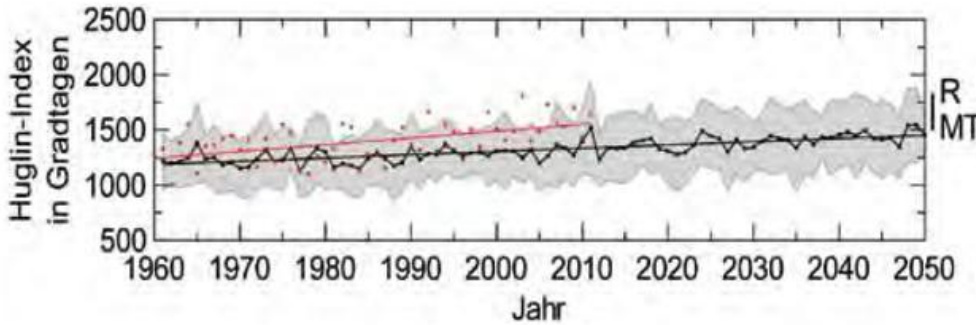


Abb. 1-8: Huglin-Index für Braunschweig, dargestellt als Mittelwert (schwarze Kurve) und dessen  $\pm 1\text{-}\sigma$ -Umgebung (grau unterlegte Fläche) aus 23 Klimaprojektionen für den Zeitabschnitt 1961 – 2050. Die roten Punkte beruhen auf gemessenen Lufttemperaturen der DWD-Station Braunschweig (1961 – 2011). Trendlinien basieren auf linearer Regression. Der Indexbereich für die Klimaverträglichkeit der Rebsorten Müller-Thurgau (MT) und Riesling (R) ist durch eine vertikale Markierung an der rechten Ordinate kenntlich gemacht.

he auch Beitrag KÖSTNER et al. in diesem Heft). Hierauf wird nachfolgend eingegangen, ebenso wie auf allgemeine Aspekte des Klimawandels und dessen Auswirkungen auf die Landwirtschaft, die unter anderem im Deutschen Klimaatlas des DWD publiziert werden.

#### 4.1 Chancen für den Weinanbau

Im nördlicheren Mitteleuropa wie zum Beispiel Schottland und Norddeutschland wurde während milder Klimaperioden bis ins Spätmittelalter (15. bis 16. Jahrhundert) Weinanbau betrieben. Ab 1550 mussten die meisten Flächen aufgegeben werden, bedingt unter anderem durch die mit der Kleinen Eiszeit einhergehende Abkühlung.

Aufgrund des jüngeren Temperaturanstiegs dehnt sich die heutige Hauptzone des europäischen Weinbaus, die sich zwischen dem 35. und 51. Breitengrad befindet, erneut nach Norden aus. Ob als Folge davon Norddeutschland als zukünftige Weinbauregion in Betracht kommen könnte, lässt sich mittels des Huglin-Indexes abschätzen, der die Anbaueignung bestimmter Rebsorten angibt gemäß

$$HI = f * \sum_{t_1}^{t_2} \left\{ (T_{mit} + T_{max}) / 2 - T_b \right\} \Delta t \quad \text{für} \\ (T_{mit} + T_{max}) / 2 \geq T_b$$

mit  $f$  als Funktion der geographischen Breite,  $T_{mit}$ ,  $T_{max}$  als Tagesmittel- und Tagesmaximumtemperatur (in  $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_b$  als Basistemperatur ( $= 10^{\circ}\text{C}$ ) sowie  $\Delta t$  als Zeitschritt ( $= 1$  Tag). Die Aufsummierung der Temperaturfunktion erfolgt zwischen dem 1. April ( $t_1$ ) und 30. September ( $t_2$ ).

Abb. 1-8 zeigt den mittleren zeitlichen Verlauf des Indexes für die Region Braunschweig auf der Grundlage von 23 Klimaprojektionen des Zeitraums 1961-2050. Der positive Trend gibt Anlass zu der Annahme, dass Norddeutschland mit einer zunehmenden Anbaueignung früh ausreifender Sorten wie Müller-Thurgau und Riesling rechnen kann. Bereits in den letzten 10 Jahren wurden die makroklimatischen Richtwerte für Müller-Thurgau ( $HI = 1500 - 1600$  Gradtage, siehe HOPPMANN, 2010) und Riesling ( $HI = 1700 - 1800$  Gradtage) nach Messungen der DWD-Station Braunschweig sporadisch

erreicht, während das Indexmittel der Klimaprojektionen erst ab 2050 von einer Anbauwürdigkeit ausgeht (Abb. 1-8). Die wärmeren Lagen der südlicher gelegenen angestammten deutschen Weinregionen werden zukünftig vom Anbau jener Rebsorten profitieren, die heute im südlichen Europa zu finden sind.

Zu beachten ist, dass der Huglin-Index für den Anbau von Kulturreben auf ebenen Flächen in Frankreich ent-

wickelt wurde. In Deutschland befinden sich die Rebanlagen meist auf den klimatisch begünstigten Süd-, Südwest- und Südosthängen, die nach HOPPMANN (2010) etwa 1,5 bis 2 K wärmer sind als horizontale Flächen. Hieraus resultiert ein zusätzlicher Wärmegewinn von 150 bis 300 Gradtagen, bezogen auf den Zeitraum April bis September.

#### 4.2 Risiken für den Getreideanbau

In der Diskussion um den Klimawandel ist die mögliche Verknappung des Niederschlagsangebotes ein wichtiges Thema. Unter anderem stellt sich die Frage, wie sich Wasserreduktionen während der Vegetationsperiode auf das Ertragsverhalten von Getreide auswirken. Mit dem Ziel, trockenolerante Getreidesorten zu identifizieren, erfolgten seitens des Instituts für Pflanzenbau und Bodenkunde des Julius Kühn-Instituts (JKI, Braunschweig) Trockenstress-Experimente. Hierzu wurden in Freilandversuchen je vier Sorten der Winterformen von Gerste, Roggen, Triticale und Weizen im Zeitraum April bis Juli vor Niederschlagseinträgen geschützt, während in einer parallelen Variante die gleichen Sorten durch künstliche Beregnung auf einem optimalen Wasserversorgungsgrad gehalten wurden. Das Abhalten des Regeneintrags geschah mittels einem *Rain-out Shelter* (Abb. 1-9), der bei einsetzenden Niederschlägen automatisch über die Versuchspartellen rollte und dort bis zum Niederschlagsende verblieb.

Im Jahr 2010 wurde von Anfang April bis Mitte Juli eine Regenmenge von insgesamt 145 mm abgehalten, während in der Parallelvariante zusätzliche Regengaben von 135 mm erfolgten. Im Vergleich zur optimal bewässerten Variante hatte der Trockenstress signifikante Reduktionen im Korn-, Stroh- und Biomasseertrag zur Folge (Abb. 1-10; siehe auch SCHITTENHELM et al. 2013). Um derartige Einbußen unter Praxisbedingungen zu verhindern, wären zukünftig zusätzliche Beregnungsgaben notwendig, so dass eine an der aktuellen Bodenwassersituation sich ausrichtende Beregnungsberatung mehr denn je gefragt sein wird.

#### 4.3 Der Deutsche Klimaatlas des DWD

Vor einigen Jahren intensivierte sich die Diskussion über den Klimawandel und dessen mögliche Auswirkungen auf



Abb. 1-9: Automatischer Rain-out Shelter des Instituts für Pflanzenbau und Bodenkunde (Julius Kühn-Institut, Braunschweig).

verschiedene Bereiche der deutschen Volkswirtschaft. Der DWD ergänzte daraufhin seine strategische Ausrichtung um Komponenten der Klimamodellierung und Klimaberatung für Politik und Entscheidungsträger. Als neues Online-Produkt wurde der Deutsche Klimaatlas erstellt ([www.deutscherklimaatlas.de](http://www.deutscherklimaatlas.de)), der die zurückliegende Klimareferenzperiode 1961 – 1990 (als statische Monatskarte), die aktuelle Situation (in Form monatlich aktualisierter Karten), und die möglichen Szenarien des zukünftigen Klimas (als Zeitreihe und Abweichungskarte für 30-jährige Zeitabschnitte) enthält. Aus dem Vergleich der Änderungssignale zwischen Vergangenheit, Gegenwart und möglicher Zukunft können sachbezogene Anpassungsstrategien entwickelt werden. Zu den dargestellten Parametern im agrarmeteorologischen Teil des Deutschen Klimaatlasses gehören unter anderem der Vegetationsbeginn und das Ertragsverhalten von Mais und Grünland. Eine zentrale Stellung nimmt zudem die Bodenwasserthematik ein. Aus dem Bodenfeuchteverlauf kann auf die zukünftige Wasserverfügbarkeit sowie auf die Anbaueignung von Feldkulturen geschlossen werden.

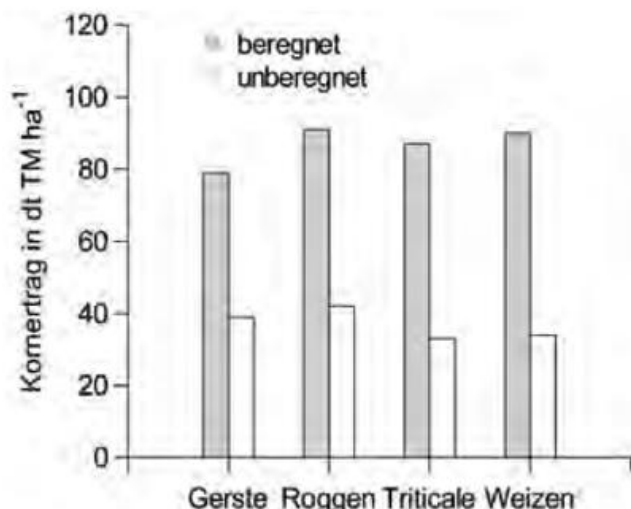


Abb. 1-10: Korntrag von Wintergetreide im Jahr 2010 bei zwei Bewässerungsvarianten (dt TM = Dezitonne Trockenmasse; Daten: Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde/Julius Kühn-Institut, Braunschweig).

Die Bodenfeuchte wird monatsweise mittels des SVAT-Modells AMBAV simuliert (KERSEBAUM et al. 2005, FRIESLAND und LÖPMEIER 2007, siehe auch Beitrag BRADEN in diesem Heft). Die Berechnung geschieht sowohl für einen leichten Boden unter Wintergetreide als auch für einen schweren Boden unter Zuckerrüben. Der Modellantrieb erfolgt mit Standardausgabedaten (10 m-Wind, 2 m-Temperatur, etc.) von 16 prognostischen Regionalmodellen. Diese Daten liegen für unterschiedliche Emissionsszenarien des Zeitraums 1961 – 2100 vor.

Da es kaum bis in das Jahr 1961 zurückreichende Bodenfeuchtemessreihen gibt, werden derartige Zeitreihen ebenfalls indirekt erzeugt, indem für den Zeitraum 1961 – „aktuelles Jahr“ analoge AMBAV-Modellläufe mit Standarddaten des synoptischen DWD-Messnetzes durchgeführt werden.

Vergleicht man in Abb. 1-11 die April-Zeitreihe der aus Synop-Messungen berechneten Bodenfeuchte des Zeitraums 1961 – 2012 mit dem Modellklima des gewählten Emissionsszenarios A1B, so zeigt sich, dass die Klimaprojektionen die beobachtete Frühjahrstrockenheit der letzten Jahre nicht in akzeptabler Weise wiedergeben. Zudem weisen die Klimaprojektionen bis zum Jahr 2100 allenfalls auf eine leichte, keinesfalls aber auf eine dramatische Verschärfung der sommerlichen Bodenwassersituation hin (hier nicht dargestellt).

### 5 Ausblick

Die einem kontinuierlichen Wandel unterliegende Landwirtschaft, die sich an immer strengeren Umweltauflagen zu orientieren hat, wird in Zukunft mehr denn je auf agrarmeteorologische Unterstützung angewiesen sein. Steigende Produktivität, das heißt höhere Erträge auf kleineren Flächen bei gleichzeitiger Vermeidung ökologischer Belastungen, erfordert umweltgerechtes Handeln, das heißt umweltschonende Düngemittelausbringung und umweltschonenden Pflanzenschutz. Beide setzen agrarmeteorologisches Wissen beziehungsweise agrarmeteorologische Begleitung voraus.

Zu einem Zukunftsproblem könnten sich die knapper werdenden Wasserressourcen entwickeln. Da Wasser besonders auf leichten Standorten schon immer ein produktionsbegrenzender Faktor in der Landwirtschaft war, und da die gegenwärtigen Klimaprojektionen mehrheitlich eine leichte Abnahme sommerlicher Niederschläge prognostizieren, wird auch in Zukunft das Thema Wasserhaushalt/Wassermangel Gegenstand agrarmeteorologischer Aktivitäten bleiben.

Durch die gegenwärtige Energiewende (Abkehr von fossilen Energieträgern, hin zur regenerativen Energie) haben nachwachsende Rohstoffe einen hohen Stellenwert erreicht. Als Folge der steigenden Zahl von Biogasanlagen hat der Anbau von Mais als Silageprodukt derart massiv zugenommen, dass der gegenwärtige Flächenanteil als ökologisch bedenklich gilt. Zusätzlicher Flächenbedarf für weitere Agrarrohstoffe ist absehbar. Aufgrund des steigenden Temperaturniveaus und des immer früheren Beginns der Vegetationsperiode ist

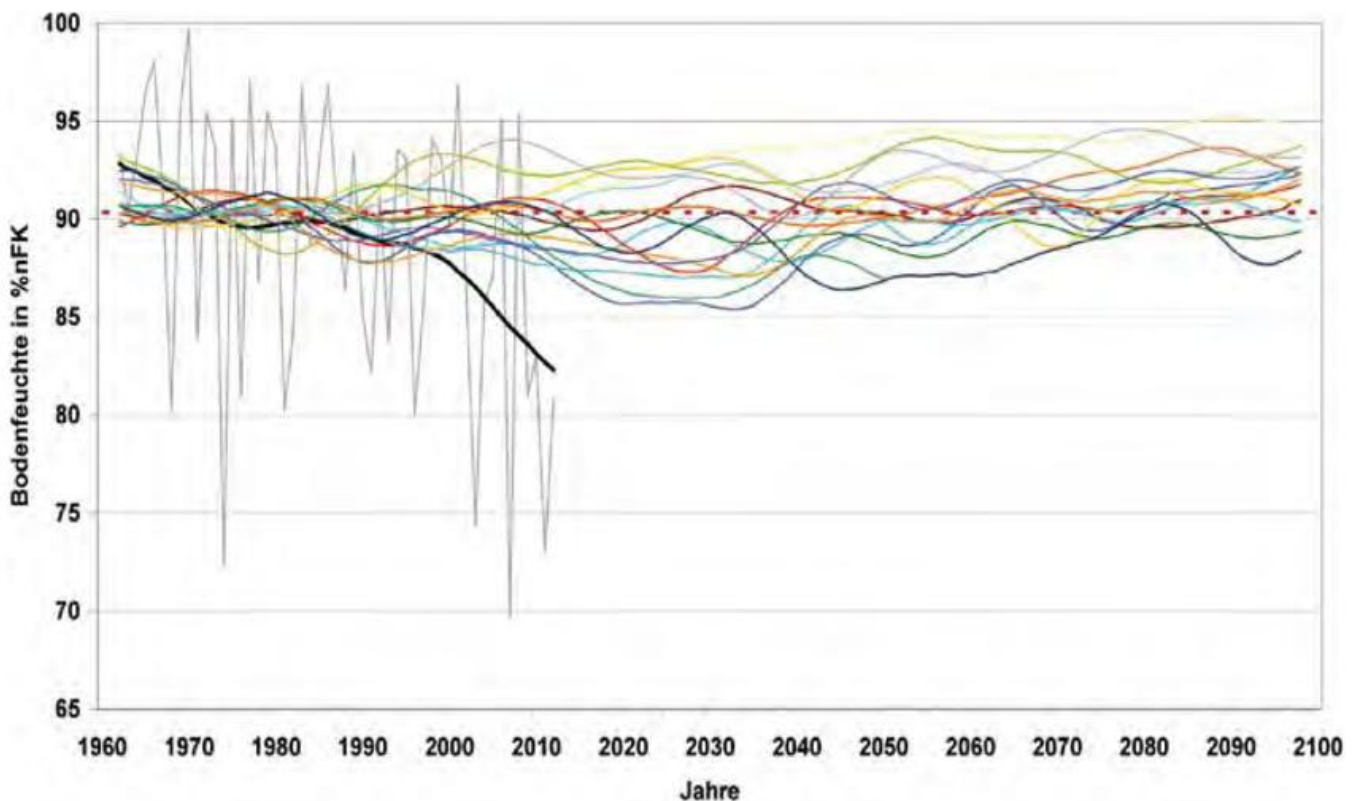


Abb. 1-11: Trend der Bodenfeuchte im Monat April als Deutschlandmittel (grau: Einzelwerte, berechnet aus synoptischen Messwerten; dicke schwarze Kurve: tiefpassgefilterte Einzelwerte; farbige Kurven: tiefpassgefilterte Ergebnisse von 16 Regionalmodellen; rot gestrichelte horizontale Linie: Mittelwert 1961-1990).

davon auszugehen, dass auch in Norddeutschland später abreifende und damit mehr Biomasse produzierende Sorten von Energiepflanzen angebaut werden können. Einen agrarmeteorologischen Schwerpunkt werden deshalb Kalibrierungen von Verdunstungsmodellen für neue Bioenergiekulturen wie zum Beispiel Energiehirse bilden.

## Literatur

- BERKELMANN, B., LOSKILL, B.J., FRÜHAUF, C., GOLLMER, K.-U., FORSTER, M., KUCZERA, A., BRADEN, H., WITTICH, K.-P., 2006: Downy mildew forecast regarding primary and further soil borne infections based on a splash algorithm and a microclimate model. *Proceedings of the 5th International Workshop on Grapevine Downy and Powdery Mildew*, 130.
- BOURKE, A., LAMB, H., 1993: The spread of potato blight in Europe in 1845-6 and the accompanying wind and weather patterns. *Meteorological Service*, Dublin, 66 Seiten.
- FRIESLAND, H., LÖPMEIER, F.-J., 2007: The performance of the model AMBAV for evapotranspiration and soil moisture on Müncheberg data. In: K.C. KERSEBAUM, J.-M. HECKER, W. MIRSCHEL, M. WEGEHENKEL (Eds.) *Modelling Water and Nutrient Dynamics in Soil-Crop Systems*. Springer, Dordrecht, 19-26.
- HOPPMANN, D., 2010: Terroir – Wetter, Klima und Boden im Weinbau. *Eugen Ulmer KG*, Stuttgart, 328 Seiten.
- KERSEBAUM, K.C., FRIESLAND, H., LÖPMEIER, F.-J., 2005: Comparison of three irrigation models under German conditions. In: MARRACCHI, G., BOGATAJ, L.K., ORLANDINI, S., ROSSI, F., BARAZUTTI, M. (Eds) *Irrigation and pest and disease models: Evaluation in different environments and web-based applications*. COST Action 718, *Meteorological Applications for Agriculture*, European Commission, Brussels, 16-25.
- LAFON, R., CLERJEAU, M., 1988: Downy mildew. In: *Compendium of Grape Diseases*, edited by R. Pearson and A. C. Goheen. St. Paul, Minnesota, *APS Press*.
- SENTELHAS, P.C., GILLESPIE, T.J., GLEASON, M.L., MONTEIRO, J.E.B.A., HELLAND, S.T., 2004: Operational exposure of leaf wetness sensors. *Agric. Forest Meteorol.* **126**, 59-72.
- VAN HOUT, R., CHAMECKI, M., BRUSH, G., KATZ, J., PARLANGE, M.B., 2008: The influence of local meteorological conditions on the circadian rhythm of corn (*Zea mays* L.) pollen emission. *Agric. Forest Meteorol.* **148**, 1078-1092.
- SCHITTENHELM, S., KRAFT, M., WITTICH, K.-P., 2012: Performance of winter cereals grown on field-stored soil moisture only. Eingereicht bei: *European Journal of Agronomy*.
- WITTICH, K.-P., 2005: LEAFWET – A simple calculation scheme for the leaf-wetness duration on top of an orchard. In: MARRACCHI, G., BOGATAJ, L.K., ORLANDINI, S., DALLA MARTA, A., ROSSI, F. (Eds) *Leaf wetness duration: Analysis of the agrometeorological requirements and evaluation of new estimation methods*. COST Action 718, *Meteorological Applications for Agriculture*, European Commission, Brussels, 76-83.

H. BRADEN

## 2 Agrarmeteorologische Modelle des Wasser- und Energiehaushalts im Deutschen Wetterdienst

Agrometeorological Models of water and energy budgets in the German Weather Service

### Zusammenfassung

Die am Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung Braunschweig (ZAMF) entwickelten agrarmeteorologischen Modelle AMBAV und BEKLIMA beruhen auf der eindimensionalen Berechnung der Ströme fühlbarer und latenter Wärme aus den Energiebilanzen an der Erdoberfläche. AMBAV berechnet die Wasserhaushalte für mehrere Bodenschichten. BEKLIMA berechnet darüber hinaus die Energiehaushalte von Bestand und Bodenschichten unter Berücksichtigung der Gefriervorgänge, sowie das Schmelzen von Schneedecken. Auf der Basis von BEKLIMA konnten daher Modellvarianten zur Berechnung der Gülleverflüchtigung, des Mikroklimas unter Folien sowie des Bestandsklimas in Rebeständen entwickelt werden. Die Palette der Modellanwendungen reicht von der Beratung der Landwirtschaft über Klimawirkrechnungen bis zur Politikberatung.

### Summary

The agrometeorological models AMBAV and BEKLIMA both have been developed in Braunschweig at the Agrometeorological Research Centre (ZAMF) of the German Meteorological Service and are based on one-dimensional calculations of latent and sensible heat from energy balances near the soil surface. AMBAV models the water budgets of several soil layers. In addition BEKLIMA even calculates the energy budgets of canopy and soil layers considering soil chill as well as melting of snow covers. This is why models of volatilisation from slurry, of microclimate below plastic mulch and inside viticulture could be developed on the basis of BEKLIMA. The utilizations of the models range from agricultural advice over climate impact to political consulting.

### 1 Einleitung

Bis in die Achtziger Jahre wurden Zusammenhänge in der Agrarmeteorologie teilweise durch konzeptionelle Modelle beschrieben, in denen die Wirkung von Einflussgrößen auf Zielgrößen durch empirische Einflussfaktoren dargestellt werden. Inzwischen haben sich deterministische Modelle durchgesetzt, in denen die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse soweit wie möglich modelliert werden. Dazu gab es wesentliche Impulse durch Modelle, die auch pflanzenphysiologische Vorgänge simulieren (GOUDRIAAN 1977).

In dynamischen mathematisch-physikalischen Modellen sind die Vorstellungen von den ablaufenden Vorgängen dokumentiert. Gleichzeitig ermöglichen sie quantitative Aussagen über Systemzustände in Gegenwart, Vergangenheit und Zukunft. Darüber hinaus erlauben die Modelle vielfältige Experimente, die in der Realität nicht oder nur mit großem Aufwand durchführbar sind. In der Regel werden

die Modelle entwickelt, um Messungen zu vereinfachen oder teilweise überflüssig zu machen.

Damit auch Rechnungen für benachbarte Flächen, über denen nicht gemessen wird, durchgeführt werden können, verzichtet das Modell AMBETI/BEKLIMA auf die Strahlungsbilanz als Eingangsgröße und begnügt sich stattdessen mit der Globalstrahlung und der langwelligen Gegenstrahlung auf Strahlungskomponenten, die vom jeweiligen Untergrund nahezu unbeeinflusst sind. Um seinen ganzjährigen Einsatz zu ermöglichen, wurde das Modell so erweitert, dass es auch das Entstehen und Verschwinden von Frost im Boden sowie einer Schneedecke berechnen kann. Das Modell AMBETI/BEKLIMA berechnet Bodentemperaturen bis in eine Tiefe von etwa 12 m, wo eine konstante untere Randbedingung benutzt werden kann. Gleichzeitig ergibt sich dadurch eine hohe Langzeitstabilität auch für Rechnungen, die sich über mehrere Jahre erstrecken. Diese Eigenschaft war auch bei dem internationalen Modellvergleich PILPS 2(d) von Vorteil, bei dem AMBETI die

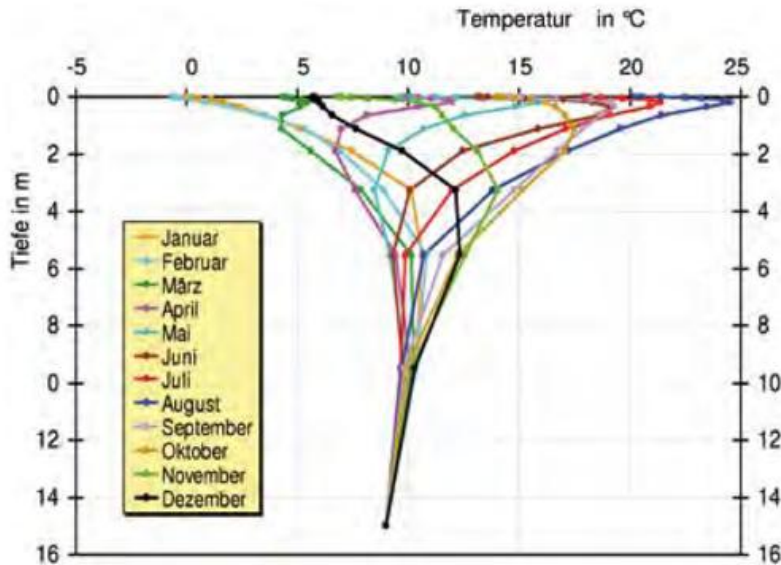


Abb. 2-1: Bodentemperaturprofile berechnet für unbewachsenen Boden (dargestellt sind Profile von 0 Uhr des jeweils ersten Monatstags).

Bodentemperaturen über einen Zeitraum von 18 Jahren im Vergleich mit zuvor unbekanntem Messwerten aus Russland besser berechnet hat als die 20 konkurrierenden Modelle (SCHLOSSER et al. 2000, LUO et al. 2003).

Diese Eigenschaften qualifizieren das Modell für den bundesweiten Einsatz in der Agrarmeteorologie des DWD und insbesondere auch für Rechnungen zur Auswirkung von Klimaänderungen. Während mit AMBETI/BEKLIMA versucht wird, die Energie- und Wasserhaushalte von Pflanzen und Boden in möglichst deterministischer Weise zu modellieren, werden sämtliche pflanzenphysiologische Prozesse empirisch parametrisiert. Insbesondere zur Bestimmung empirischer Koeffizienten waren daher Kalibrierungen des Modells erforderlich, die mit Hilfe von Verdunstungsmessungen mehrerer Jahre für unterschiedliche Kulturpflanzenbestände durchgeführt wurden.

Das ursprüngliche unter dem Namen Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung von Evaporation, Transpiration und Interzeption (AMBETI) entwickelte Modell (BRADEN 1995) wird bei seinem Einsatz im DWD unter dem Namen BEKLIMA eingesetzt, weil es hier vorwiegend der Berechnung bestandsklimatischer Größen dient. Die Ein- und Ausgaberroutinen wurden an die Arbeitsumgebung des AMBER-Systems angepasst (LÖPMEIER 1995).

Aufgrund der detailgetreuen Modellierung der Wärme- und Wasserhaushalte im System Boden-Pflanzen-Atmosphäre mit dem Modell AMBETI/BEKLIMA wurden auf seiner Basis weitere Modelle entwi-

ckelt, mit denen Vorgänge in Pflanzenbeständen und im bodennahen Bereich simuliert werden: Durch zusätzliche Modellierung chemischer Vorgänge lässt sich die Verflüchtigung von Gülle nach deren Ausbringung auf Böden berechnen. Weitere Varianten erlauben Berechnungen zum Mikroklima unter Folien und zum Bestandsklima in Weinkulturen.

Das Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung AMBAV (siehe Abschnitt 4) wurde von LÖPMEIER (1994) entwickelt. Es berechnet die pflanzliche Transpiration ebenso wie die Evaporation mit Hilfe der Penman-Monteith-Beziehung und parametrisiert die dazu erforderlichen Größen in Anlehnung an das britische Modell MORECS (THOMPSON et al. 1981). Das Modell AMBAV wurde für eine ganze Reihe von Feldfrüchten mit Hilfe gravimetrisch bestimmter Bodenfeuchten sowie Lysimetermessungen kalibriert und wird für alle Fragestellungen zur Bodenfeuchteproblematik (wie zum Beispiel Beregnung) eingesetzt.

## 2 AMBETI / BEKLIMA

AMBETI/BEKLIMA ist ein eindimensionales dynamisches Modell des Wärme- und Wasserhaushalts im System Boden-Pflanze-Atmosphäre, das mit einer zeitlichen Auflösung von Stunden oder kürzer arbeitet. Während im Boden üblicherweise 13 Schichten unterschieden werden, wird der Bestand nur als eine Schicht berücksichtigt. Durch die Schichteinteilung mit dünnen Schichten im Oberboden und nach unten zunehmend dickeren Schichten wird einerseits den raschen Änderungen und großen Temperaturgradienten an der Oberfläche Rechnung getragen und andererseits wird



Abb. 2-2: Die wichtigsten Ein- und Ausgabegrößen von AMBETI/BEKLIMA.

bis in eine Tiefe von gewöhnlich 12 m gerechnet und eine zeitlich konstante Randbedingung in 15 m Tiefe benutzt (Abb. 2-1). Unter anderem dadurch erlangt das Modell AMBETI/BEKLIMA seine gute Langzeitstabilität und erlaubt eine zuverlässige Berechnung der Bodentemperaturen und Bodenwärmeströme.

### 2.1 Ein- und Ausgabegrößen

Die erforderlichen meteorologischen Eingabegrößen (Abb. 2-2) sind

- Globalstrahlung,
- langwellige Gegenstrahlung,
- Bewölkungsgrad (optional),
- Lufttemperatur,
- Luftfeuchte,
- Windgeschwindigkeit und
- Niederschlag.

Der Zeittakt dieser Eingangsgrößen ist gleichzeitig der Zeittakt des Modells und sollte höchstens eine Stunde betragen. Je nach Anwendung und Verfügbarkeit sind die meteorologischen Randbedingungen Messwerte oder werden parametrisiert, sind Ergebnisse von Vorhersagemodellen oder von regionalen Klimamodellen. Zusätzlich können Wettermeldungen über den Phasenzustand von Niederschlägen genutzt werden sowie beim Einsatz im Rahmen der Beratung auch Messwerte von Schneehöhen für die jeweils zurückliegenden Zeiten.

Weitere Eingabegrößen sind zur Charakterisierung der lokalen Eigenschaften von Bestand und Boden erforderlich: geographische Länge und Breite, (Meeres-) Höhe und gegebenenfalls Hangneigung und -richtung. Zur Charakterisierung der Bodeneigenschaften können – außer den Reflexionsvermögen trockener Oberflächen – beispielsweise Lagerungsdichten, Ton- und Schluffgehalte sowie Gehalte organischen Materials der einzelnen Bodenschichten vorgegeben werden. Für Bewuchs sind unter anderem Angaben zu Pflanzenart und -höhe, Blattflächenindex, phänologischer Phase sowie der Verteilung der Wurzel-dichte erforderlich.

Das Modell berechnet eine Vielzahl von Zustandsgrößen und Flüßen im System „Boden – Pflanze“:

- die Ströme der von Bestand und Boden absorbierten und reflektierten sichtbaren, nah-infraroten und thermischen Strahlung,
- die Temperaturen der Pflanzen ebenso wie das Wasserpotential in den Pflanzen,
- Oberflächentemperaturen des Erdbodens sowie die bodennahen Lufttemperaturminima,
- Erdbodentemperaturen und Bodenwärmeströme einschließlich der Frosteindringtiefen,
- Wassergehalte und Wasserflüsse zwischen den Bodenschichten,
- gegebenenfalls Stauwasser auf der Bodenoberfläche und/oder Wasser auf den Pflanzenteilen (Blattbenetzung) und
- gegebenenfalls Höhe und Wassergehalt einer

Schneedecke sowie die Temperaturen an ihrer Ober- und Unterseite.

Die bodennahen Lufttemperaturminima liefern wichtige Informationen insbesondere für die Gefährdung exponierter Pflanzenteile durch Frost.

### 2.2 Modellaufbau / Modellelemente

Im Folgenden sollen die wichtigsten Elemente des Modells kurz erläutert werden; eine detaillierte Beschreibung des Modells AMBETI/BEKLIMA findet sich in BRADEN (1995).

#### 2.2.1 Strahlung

In Abhängigkeit von Sonnenhöhe und Bewölkung wird die Eingangsgröße Globalstrahlung zunächst in die Ströme sichtbarer und nahinfraroter Strahlung zerlegt und deren Einfallverteilung bestimmt. Die Unterscheidung zwischen sichtbarer und nah-infraroter Strahlung ist wichtig, weil sich die optischen Eigenschaften der Pflanzenteile und des Bodens in beiden Wellenlängenbereichen stark voneinander unterscheiden.

Zur Berechnung der von Pflanzen und Bodenoberfläche absorbierten Strahlungsströme werden halbempirische Beziehungen für die Reflexion am oberen und unteren Bestandsrand sowie für die Streuung an den Pflanzenteilen benutzt. Diese Beziehungen wurden – ausgehend von für idealisierte Bedingungen gültigen theoretischen Verläufen – verallgemeinert und mit Hilfe eines „Sukzessive Orders of Scattering“-Modells für unterschiedliche Einfallsinclinationen der Strahlung kalibriert (BRADEN 1982). Dabei werden die optischen Eigenschaften der Pflanzenblätter und Stiele, die Blatthaltung sowie die Dichten von Blättern und Stielen berücksichtigt.

Vor allem aufgrund der Strahlungsabsorption durch die Pflanzen ergeben sich bei den Bodentemperaturen große Unterschiede gegenüber unbewachsenen Flächen, wie aus Abb. 2-3 am Beispiel von stündlichen Bodentemperaturprofilen eines Sommertages ersichtlich ist. Da die

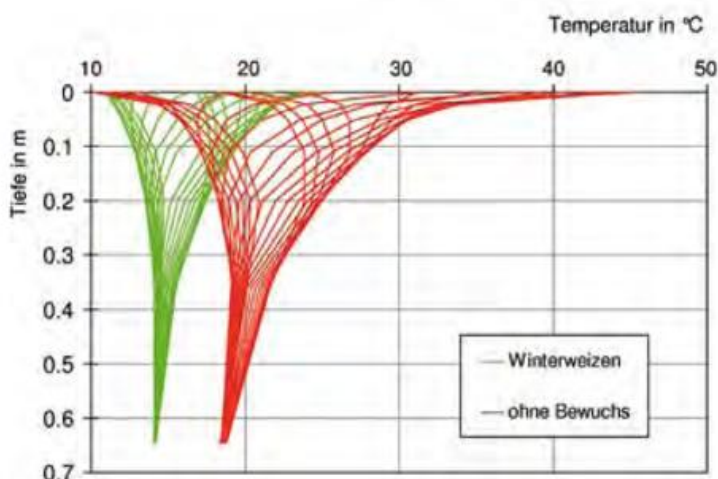


Abb. 2-3: Stündliche Bodentemperaturprofile mit und ohne Vegetation an einem Sommertag.

Rechnungen bereits für die gesamte Bestandsentwicklung erfolgten, haben sich die Temperaturen auch in tieferen Bodenschichten auseinander entwickelt.

Zur Berechnung des langwelligen Strahlungsaustauschs werden in entsprechender Weise Koeffizienten für den Energiehaushalt bestimmt. Die Reflexion am Boden wird in Abhängigkeit von der Einfallverteilung, der oberflächlichen Bodenfeuchte und ggf. auch von Schnee berechnet.

### 2.2.2 Aerodynamik

Der aerodynamische Austausch zwischen Bodenoberfläche, Pflanzenteilen und oberer Referenzhöhe (in der Regel Höhe der meteorologischen Randbedingungen) wird durch Transportwiderstände beschrieben, die in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit, aerodynamischer Rauigkeit, Bestandsdichte und Schichtung berechnet werden. Für die Transporte durch die Pflanzenbestände wurden Widerstände mit Hilfe von Ergebnissen eines numerischen Modells für die Dissipation von Schubspannung an Pflanzenteilen parametrisiert (BRADEN 1982). Dabei werden auch Lufttemperatur und -feuchte innerhalb der Pflanzenbestände berechnet und ansatzweise Temperaturen im unteren Bestandsraum interpoliert.

### 2.2.3 Pflanzen, Kalibrierung

Die Pflanzen werden einerseits durch ihren Energieumsatz berücksichtigt und andererseits durch das Leitungssystem, das Wasser aus den Bodenschichten zur Transpiration heranführt. Treibende Kräfte sind dabei ausschließlich als Saugspannungen wirkende Wasserpotentiale in den Blättern, die gegen die Bodenwasserpotentiale wirken, wobei das Leitungssystem durch ein Widerstandsnetzwerk repräsentiert wird.

Wie bei der Penman-Monteith-Beziehung (THOM 1975), wird auch hier zur Lösung der Energiehaushaltsgleichung und der Transportbeziehung für den Transpirationsfluss der Umstand genutzt, dass der Wasserdampf im Blattinnern (Interzellularen) als gesättigt angenommen werden kann. Damit ist es allerdings erforderlich, den Stomatawiderstand zu berücksichtigen, den der Wasserdampf bei dem Weg aus den Blättern überwinden muss. Da das Modell die Pflanzen nur in ihrer Gesamtheit berücksichtigt, wird – individuell für die jeweilige Kulturpflanze – ein repräsentativer pauscha-

ler „Bulk-Stomatawiderstand“ benutzt, der in Abhängigkeit von der Bestandsentwicklung (Bestandshöhe, Blattflächenindex, Phänologie), der absorbierten photosynthetisch aktiven (sichtbaren) Strahlung und dem Blattwasserpotential parametrisiert wird. Die Kalibrierung erfolgt für die wichtigsten Kulturpflanzen mit Hilfe von Verdunstungsverläufen, die mit Hilfe wägbarer Unterdrucklysimeter während mehrerer Vegetationsperioden gemessen worden waren.

Bei Niederschlag wird zunächst die Niederschlagsinterzeption an Pflanzenteilen mit Hilfe einer Sättigungsbeziehung berechnet. Dieses Wasser wird, ebenso wie Tau auf den Pflanzen, bevorzugt verdunstet.

Zur Berechnung des Energiehaushalts der Pflanzen dient ein mehrstufiger iterativer Prozess, bei dem gewährleistet werden muss, dass

- der vom Bulk-Stomatawiderstand gesteuerte Transpirationsfluss mit der vom Blattwasserpotential bewirkten Wurzelwasseraufnahme übereinstimmen muss,
- der Wasserfluss nur aus den Bodenschichten in die Pflanze, nicht jedoch in der Gegenrichtung erfolgen darf,
- der Bulk-Stomatawiderstand seinerseits vom Blattwasserpotential abhängt,
- die Verdunstung je nach vorhandenem Tau oder Interzeptionswasser bevorzugt von der Blattoberfläche erfolgt,
- der Bulk-Stomatawiderstand bei Taubildung entfällt,
- die Phasenwandlung (flüssig/gefroren) des Interzeptionswassers berücksichtigt werden muss und
- die aerodynamischen Transportwiderstände von der Temperaturschichtung abhängen.

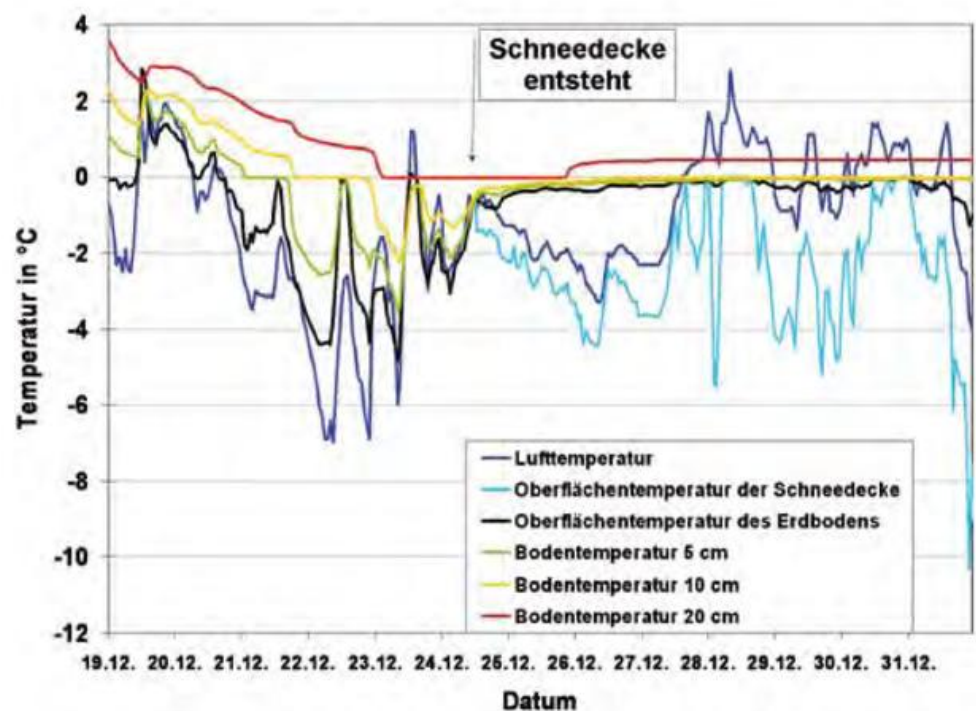


Abb. 2-4: Temperaturverläufe berechnet für den Dezember des Jahres 2000.

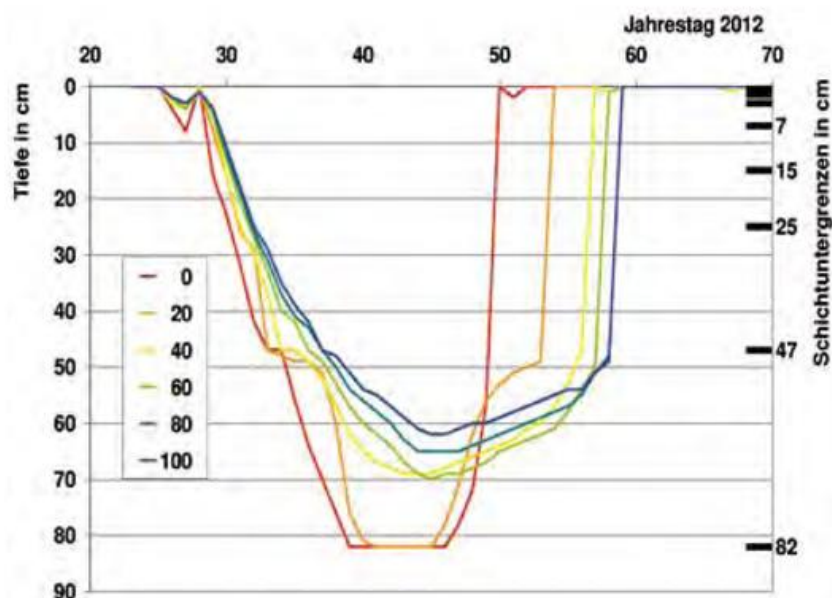


Abb. 2-5: Frosteindringtiefen für unterschiedliche Anfangswerte der Bodenwassergehalte (Angaben in % nutzbarer Feldkapazität).

### 2.2.4 Bodenwärme, Bodenevaporation, Bodenfrost und Schneedecke

Ähnlich gestaltet sich die Berechnung der Energiebilanz der Bodenoberfläche; auch hier wird die Schichtungsabhängigkeit der Transporte in der bodennahen Bestandluft berücksichtigt. Der Wasserdampf kann jedoch direkt aus den oberen Bodenschichten diffundieren, ggf. aber direkt von oberflächlichem Stauwasser oder einer Schneedecke verdunsten. Umgekehrt ist auch die Kondensation von Wasserdampf auf der Oberfläche möglich. Der Wasserdampftransport zwischen den Bodenschichten wird unter Berücksichtigung auch der thermisch induzierten Flüsse bestimmt (BRADEN 1995, S. 81f).

An die Bestimmung des Bodenwärmestroms an der Bodenoberfläche schließt sich die Berechnung der Energiehaushalte sämtlicher Bodenschichten mittels einer modifizierten Wärmehaushaltsgleichung an. Eine besondere numerische Herausforderung stellt dabei die Berücksichtigung der Phasenwandelenthalpie des Bodenwassers dar, denn Teile des Bodenwassers gefrieren in Abhängigkeit vom hydraulischen Bodenzustand (Wasserpotential) erst bei Temperaturen weit unterhalb des Gefrierpunkts. Wegen der feinen Schichteinteilung im Oberboden wird der Zeitschritt bedarfsgerecht unterteilt, damit das Gleichungssystem numerisch stabil bleibt.

Wenn keine Informationen über den Phasenzustand des Niederschlags vorliegen, nimmt das Modell Schneefall bei Niederschlag und Lufttemperaturen unterhalb von 1,5°C an, einem Schwellenwert, bei dem sich die geringsten Widersprüche zu Niederschlagsbeobachtungen ergeben hatten. Beim Vorliegen von Messwerten der Schneehöhe können diese Werte die berechneten Schneehöhen ersetzen. Die weitere Entwicklung der Schneedecke von der Verdichtung bis zum Schmelzen oder Sublimieren wird

aus dem Energiehaushalt berechnet. Die isolierende Wirkung einer Schneedecke, ebenso wie der Einfluss der Gefrierwärme wird an Abb. 2-4 deutlich: Die Erdbodentemperaturen weisen zunächst deutliche Tagesgänge auf, die jedoch nach Entstehen der Schneedecke am 23. Dezember ab 14 Uhr fast vollständig verschwinden. Da die weitere Abkühlung von oben ausbleibt, erfolgt eine allmähliche Erwärmung durch die noch wärmeren, tieferen Bodenschichten. Während der Abkühlungsphase ist zudem das Verharren der Bodentemperaturen am Gefrierpunkt zu erkennen. Die Temperatur an der Schneeoberfläche ist meist deutlich niedriger als die Lufttemperatur.

Der Einfluss der Bodenwassergehalte auf die Frosteindringtiefe wird an Abb. 2-5 deutlich, in der Modellergebnisse für eine schneefreie Frostperiode des Frühjahrs

2012 gerechnet wurde. Am Starttag der Modellierung, dem 25. Januar, wurden bei ansonsten identischen Anfangswerten unterschiedliche, für alle Bodenschichten identische Wassergehalte vorgegeben. Wie zu erwarten, dringt der Frost umso rascher und tiefer ein, je trockener der Boden ist und verschwindet auch umso schneller wieder.

### 2.2.5 Bodenhydraulik

Ähnlich wie die Wärmeleitungsgleichung ist die Differentialgleichung für die Bodenwassergehalte aufgebaut, wobei jedoch wegen der Gravitationswirkung auf das flüssige Wasser zusätzliche Terme auftreten. Darüber hinaus erschwert die starke Abhängigkeit der hydraulischen Leitfähigkeit vom aktuellen Wassergehalt, beziehungsweise dem Matrixpotential, die Lösung des Gleichungssystems. Der Zusammenhang zwischen den Bodenwassergehalten und dem Matrixpotential – der Saugspannung mit dem das Wasser an die Bodenpartikel gebunden ist – wird durch Retentionsfunktionen beschrieben – oft bezeichnet als pF-Kurven – und durch Funktionen nach VERECKEN et al. (1990) dargestellt. Durch Parameteranpassung in Abhängigkeit von den Ton- und Schluffgehalten der Böden wurden gute Übereinstimmungen der Retentionsfunktionen mit den Angaben der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 2005) erreicht. Ähnlich wurde auch mit den hydraulischen Sättigungsleitfähigkeiten verfahren. Bei Bodenfrost werden die hydraulischen Leitfähigkeiten der betroffenen Schichten derart verringert, dass keine Bewegung flüssigen Wassers statt findet.

### 2.3 Modellanwendungen

Aufgrund seiner umfassenden Modellierung des Wärme- und Wasserhaushalts im System Boden-Pflanze ergeben

sich vielfältige Anwendungen für das Modell AMBETI/BEKLIMA. Seine besondere Stärke hat das Modell im Bereich der Bodentemperaturen und Bodenwassergehalte, was sich auch in der Auswahl der hier dargestellten Ergebnisse widerspiegelt.

### 2.3.1 Ergebnisse im Internet

Für eine Vielzahl von Stationen in Deutschland sind für unbewachsene Böden berechnete Frosteindringtiefen und Auftauschichten auf den Internetseiten des DWD ([www.dwd.de](http://www.dwd.de) unter „Spezielle Nutzer/Landwirtschaft/Agrarwetter“) dargestellt. Diese Informationen sind auch im Rahmen der Gülleverordnung von Bedeutung. Darüber hinaus sind für einige Regionen Deutschlands auch berechnete aktuelle Werte der Bodentemperaturen in 5 cm Tiefe und der bodennahen Lufttemperaturen für unbewachsenen Boden im Vergleich zu langjährigen Mittel- und Extremwerten dargestellt ([www.dwd.de](http://www.dwd.de) unter „Spezielle Nutzer/Landwirtschaft/Agrarklima“).

### 2.3.2 Beratung

Im Rahmen der routinemäßigen Beratung wird das Modell BEKLIMA im Deutschen Wetterdienst täglich mit meteorologischen Randbedingungen mehrerer hundert Stationen gerechnet (siehe Beitrag BUSCH et al. in diesem Heft). Dabei erfolgen die Rechnungen jeweils für den Vortag mit gemessenen Randbedingungen und mit Vorhersagedaten für weitere Tage. Die Anfangswerte stammen dabei von den Modellläufen des vorangegangenen Tages. Die Ergebnisse von BEKLIMA sind teilweise direkt Inhalt der Beratungsinformationen, überwiegend jedoch dienen sie als Eingangsgrößen für phytopathologische und pflanzenbauliche Folgemodelle sowie für agrarklimatologische Auswertungen.

### 2.3.3 Klimaprojektionen

Im Rahmen des Projekts „ZWEK“ und für den Klimaatlas des DWD werden mit BEKLIMA als Klimawirkmodell Rechnungen für die Jahre 1961 bis 2100 durchgeführt. Die meteorologischen Randbedingungen für BEKLIMA liefern dabei mehrere regionale Klimamodelle, die mit Ergebnissen globaler Klimamodelle für unterschiedliche Emissionsszenarien angetrieben werden. Für diese Modellrechnungen wird eine Variante von AMBETI/BEKLIMA benutzt, die nur spezielle Ausgaben erzeugt.

### 2.3.4 Validierung/ Modellverbesserung

Zu Validierungszwecken werden an der ZAMF in Braunschweig täglich Modellläufe mit Messwerten des vorangegangenen Tages durchgeführt, deren Ergebnisse mit entsprechenden Messgrößen verglichen werden. Weil einige Abweichungen der Modellergebnisse durch die Eigenart der synoptischen Daten verursacht werden, werden dabei zusätzlich an der ZAMF gemessene Stundenmittelwerte

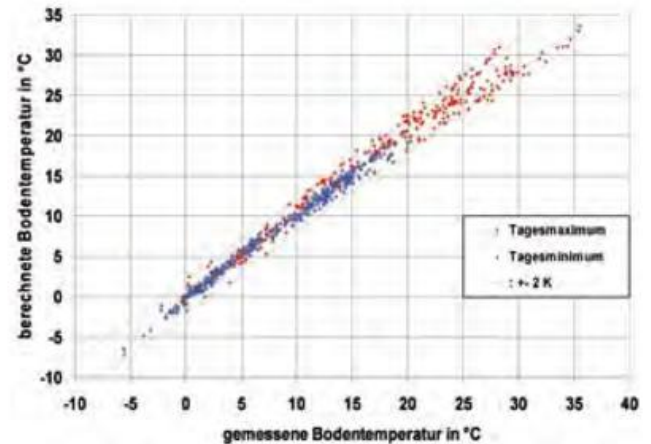


Abb. 2-6: Vergleich gemessener und mit BEKLIMA berechneter Bodentemperaturen in 5 cm Tiefe, unbewachsener Boden, 1. Januar bis 31. Dezember 2011.

als meteorologische Modellrandbedingungen benutzt. Die Zielgrößen der Validierung sind:

- bodennahe Minimumtemperaturen über unbewachsenen und bewachsenen Flächen,
- Bodentemperaturen in 5 cm Tiefe, über unbewachsenem Boden (Abb. 2-6) und unter Bewuchs,
- Bodentemperatur in 50 cm Tiefe, unter unbewachsenen Flächen,
- Bodenfeuchte in 0 bis 7 cm Tiefe, unter unbewachsenen Flächen,
- Frosteindringtiefe,
- Bestandstemperaturen und -feuchten in Winterweizen (Abb. 2-7) und Zuckerrüben sowie
- Blattbenetzungsdauer von Winterweizen und Zuckerrüben.

Während der Frostperiode werden zusätzlich Frosteindringtiefe und Auftauschicht validiert. Die Ergebnisse der Validierungen werden dokumentiert und bei systematischen Abweichungen Modellverbesserungen vorgenommen.

### 2.3.5 Exemplarische Anwendungen

Immer wieder ergeben sich Fragestellungen an den DWD, die sich mit Hilfe von Modellrechnungen mit AMBETI/BEKLIMA beantworten lassen.

- So wurde nach heißen und trockenen Wochen im Sommer des Jahres 2003 von Seiten der Landwirtschaft angefragt, ob es hilfreich sein könne, abgereifte Kartoffelbestände zur Kühlung der noch im Boden befindlichen Knollen zu beregnen. Mit Hilfe von Modellrechnungen mit BEKLIMA konnte gezeigt werden, dass der Kühlungseffekt nur von kurzer Dauer sein würde und die Knollen bereits zwei Tage nach der Beregnung höheren Temperaturen ausgesetzt sein würden.
- Für ein Versorgungsunternehmen in Baden-Württemberg wurden für einige Stationen Jahrgänge der Bodentemperaturen in 3 m Tiefe berechnet, die auf andere Weise nur mit großem Aufwand zu bestimmen gewesen wären.

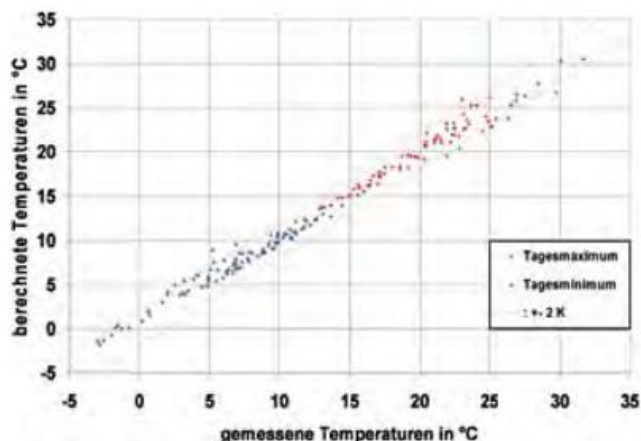


Abb. 2-7: Vergleich gemessener und mit BEKLIMA berechneter Lufttemperaturen im Winterweizenbestand, 26. März bis 25. Juni 2011.

- Zur Spezifizierung der Gülleverordnung in Zusammenarbeit mit dem von Thünen-Institut (TI) in Braunschweig wurden für einen Zeitraum von 20 Jahren Oberflächentemperaturen unbewachsener Böden für mehrere Standorte berechnet und deren Extremwerte und Quantile monatsweise ausgegeben (Abb. 2-8).
- In Zusammenarbeit mit der Universität Gießen und dem TI Braunschweig wurden Modellrechnungen zur Ozonaufnahme von Weizenpflanzen durchgeführt (GRÜNHAGE et al. 2011). Zu diesem Zweck wurde das Modell BEKLIMA zur Berechnung der Ozonflüsse in die Blätter und an die Bodenoberfläche erweitert.

### 3 Derivate und deren Anwendungen

Aufgrund der detaillierten Modellierung des Wärme- und Wasserhaushalts im System Boden-Pflanzen-Atmosphäre eignet sich das Modell AMBETI/BEKLIMA gut für weitergehende Modellierungen, die durch einige Modifikationen und Erweiterungen erreicht wurden.

#### 3.1 BEKLI\_Folie

So entstand das Modell BEKLI\_Folie zur Berechnung des Mikroklimas unter Folien, wie sie in der Landwirtschaft eingesetzt werden, damit die Vegetationsperiode verlängert werden kann beziehungsweise das Frostrisiko gemindert wird. Die weitgehend unveränderten Modellteile von AMBETI/BEKLIMA werden dabei ergänzt durch die Berechnung von Wärme- und Wasserdampfströmen an Folien. Außerdem erfolgte eine Modellmodifikation zur Berechnung der Strahlungsflüsse sowie des Niederschlags durch die Folie (BRADEN 2005). Kalibriert wurde das Modell für Lochfolien und Vlies mit Hilfe entsprechender Vergleichsmesswerte.

#### 3.2 GuelleN

Zur Berechnung der Verflüchtigung von Gülle, die als Ammoniakdünger auf landwirtschaftlichen Nutzflächen

ausgebracht wird, wurde das Kernmodell durch Teilmodelle zur Berechnung der Umsetzung zwischen Ammoniumlösung und gasförmigem Ammoniak nach GÉNERMONT und CELLIER (1997) sowie dessen Verflüchtigung ergänzt.

Das Modell befasst sich ausschließlich mit dem in flüssiger Form ausgebrachten anorganischen Stickstoff und berechnet Gleichgewichte zwischen Ammoniak und Ammonium. Die Verflüchtigung von Ammoniak wird mit Hilfe chemischer Gleichgewichtsbeziehungen und physikalischer Transportbeziehungen beschrieben. Organischer Stickstoff sowie die Prozesse der Mineralisierung und Demineralisierung werden nicht betrachtet. Damit ist dieses Modell nur für die Berechnung der kurzfristigen Verflüchtigung und Infiltration nach der Gülleausbringung geeignet.

Beim Einsatz dieses Modells wird zunächst mit Anfangswerten von (ungestörten) Vorläufen mit BEKLIMA jeweils bis zu den Ausbringungsterminen der Gülle (zum Beispiel um 6, 11, 15 Uhr) gerechnet. Von da an erfolgt die Berechnung der Gülleverteilung und -Verflüchtigung und die aus der Gülle verflüchtigte Stickstoffmenge wird bis zum Ende des Folgetages kumuliert. Üblicherweise erfolgt drei Stunden nach der Ausbringung die Einarbeitung durch Mittelung der Zustandsgrößen der oberen Bodenschichten, wodurch die weitere Verflüchtigung drastisch vermindert wird. Die Verflüchtigung wird vorwiegend durch die bis zur Einarbeitung herrschenden Temperaturen im Oberboden und eventuell verdünnend wirkende Niederschläge bestimmt (Abb. 2-9).

Die Modellergebnisse liefern dadurch Aussagen zur Wahl günstiger Ausbringungstermine, mit denen Verflüchtigungsverluste und Geruchsbelästigungen verringert werden können.

#### 3.3 BEKLIMA\_Wein

An dem nur für homogene Bestände geeigneten Modell AMBETI/BEKLIMA wurden Modifikationen vorgenommen, um Berechnungen für Weinkulturen trotz ihrer ausge-

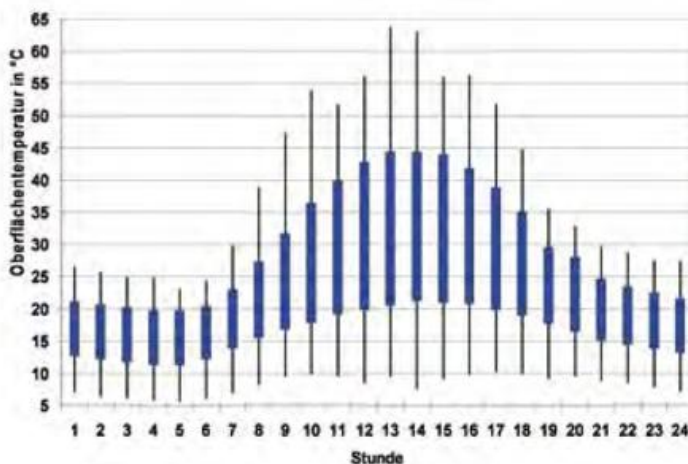


Abb. 2-8: Stündliche Extremwerte der Oberflächentemperaturen im Juni während der Jahre 1991 bis 2010; berechnet für unbewachsenen Boden in Mannheim blau: 10%-Quantile.

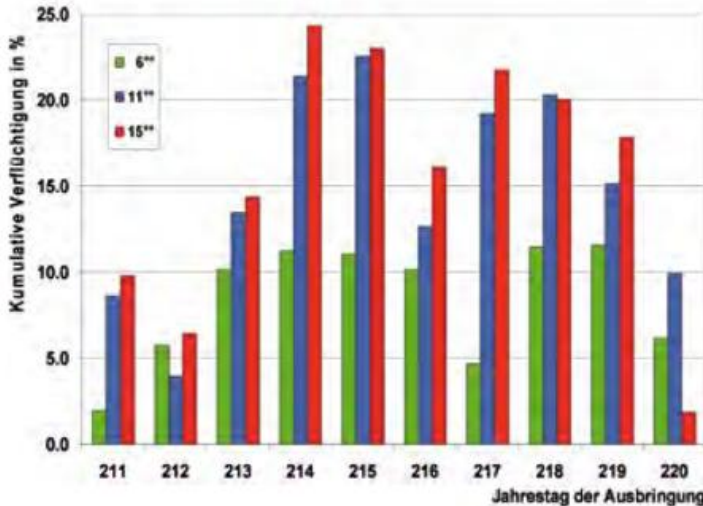


Abb. 2-9: Kumulative Gülleverflüchtigung bis zum Folgetag nach der Ausbringung für unterschiedliche Ausbringungszeiten. Die Einarbeitung erfolgte jeweils drei Stunden nach der Ausbringung (berechnet für Braunschweig 2011; Schweinegülle).

prägen Reihenstruktur zu erlauben. Mit dem berechneten Rebbestandsklima wird ein Modell zur Vorhersage des Falschen Mehltaus am Wein (*Peronospora*) angetrieben.

#### 4 AMBAV

Das Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung AMBAV (LÖPMEIER 1994) berechnet die pflanzliche Transpiration ebenso wie die Evaporation ebenfalls aus stündlichen meteorologischen Randbedingungen mit Hilfe der Penman-Monteith-Beziehung. Um eine zuverlässige Ankoppelung an das Bodenwasser zu erreichen, wurde das Modell AMBAV nachträglich ergänzt durch die für AMBETI/BEKLIMA entwickelte Bodenhydraulik (siehe 2.2.5) sowie neue Programmteile zur Reduktion der Bodenevaporation und der Transpiration auf Grund von Wassermangel nahe der Bodenoberfläche beziehungsweise im Wurzelraum.

AMBAV berechnet aus phänologischen Terminen individuell für eine Vielzahl von Feldfrüchten die Entwicklung der Bestände (Blattflächenindex und Bestandshöhe) einschließlich der Wurzelverteilung und stellt diese Daten für BEKLIMA bereit. Das Modell AMBAV wurde für eine ganze Reihe von Feldfrüchten mit Hilfe von Verläufen gravimetrisch bestimmter Bodenfeuchten kalibriert. Im Gegensatz zu AMBETI/BEKLIMA arbeitet AMBAV mit Schichten gleicher Dicke (10 cm), berechnet allerdings keine Bodentemperaturen und parametrisiert den Bodenwärmestrom lediglich in Abhängigkeit von der Strahlungsbilanz und dem Blattflächenindex.

#### 5 Modellanwendungen

Für eine Reihe von Stationen in Deutschland sind für unbewachsene Böden mit AMBAV berechnete Bodenfeuchteprofile auf den Internetseiten des DWD (www.dwd.de unter „Spezielle Nutzer/Landwirtschaft/Agrarwetter“) dargestellt. Für einige Regionen Deutschlands findet man darüber hinaus berechnete Werte der Bodenfeuchten in 0 bis 60 cm Tiefe unter Winterweizen im Vergleich zu langjährigen Mittel- und Extremwerten (www.dwd.de unter „Spezielle Nutzer/Landwirtschaft/Agrarklima“).

In Zusammenarbeit mit dem Fachverband Feldbegegnung e.V. (FVF) und der Landwirtschaftskammer Niedersachsen erfolgt durch die ZAMF Braunschweig für Niedersachsen eine Berechnungsberatung für einen Vorhersagezeitraum von 5 Tagen. Dazu werden mit AMBAV während der Vegetationszeit für jeweils zwei aktuelle Feldfrüchte Wassergehalte für einen leichten und einen schweren Boden berechnet. Berechnungsempfehlungen werden beim Unterschreiten bestimmter nutzbarer Feldkapazitäten unter Berücksichtigung der vorhergesagten Niederschlagsmengen gegeben.

In Abb. 2-10 sind mit AMBAV berechnete Bodenfeuchten zusammen mit gravimetrisch gemessenen Vergleichswerten exemplarisch für das Jahr 2011 dargestellt. Die drastische Austrocknung infolge des Wurzelwasserentzugs fällt sofort ins Auge, erkennbar sind auch die Auswirkungen stärkerer Niederschläge. Eine Übereinstimmung mit den punktuellen Messwerten ist nicht immer zu erkennen, was aber teilweise auf Bodeninhomogenitäten zurück zu führen ist. Auch AMBAV dient als Klimawirkmodell und liefert langjährige Bodenfeuchten für unterschiedliche Szenarien, die unter anderem im Klimaatlas des DWD dargestellt sind.

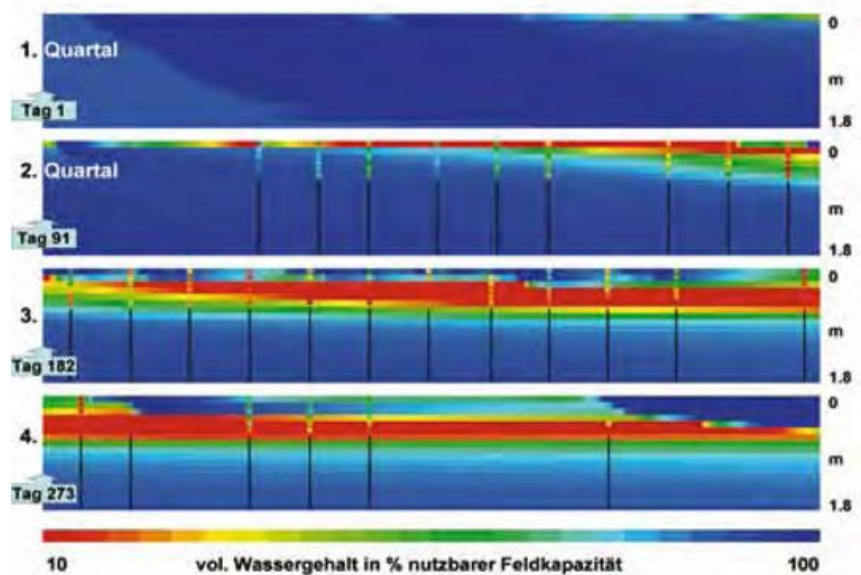


Abb. 2-10: Bodenwassergehalte im Verlauf des Jahres 2011 berechnet mit AMBAV sowie gravimetrische Messwerte (0 bis 60 cm) mit Markierungen (Zuckerrüben von 106. bis 289. Tag).

## 6 Schluss

AMBETI/BEKLIMA stellt eine umfassende Modellierung des Wärme- und Wasserhaushalts im Bereich von Boden und Pflanzen dar; AMBAV bietet für den Wasserhaushalt ähnliches. Beide Modelle sind seit Jahren im routinemäßigen Praxiseinsatz, sie werden einer systematischen Qualitätskontrolle unterzogen und werden bei Bedarf verbessert. Dadurch haben sich beide Modelle immer mehr zu einem zuverlässigen und unverzichtbaren Werkzeug der Agrarmeteorologie entwickelt. Es ist zu erwarten, dass sich auch zukünftige neue Fragestellungen mit Hilfe von AMBAV und AMBETI/BEKLIMA sowie gegebenenfalls darauf aufbauenden Modellvarianten bearbeiten und beantworten lassen.

## Literatur

- AG BODEN, 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung (Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), Hannover.
- BRADEN, H., 1982: Simulationsmodell für den Wasser-, Energie- und Stoffhaushalt in Pflanzenbeständen. *Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover* **23**.
- BRADEN, H., 1985: Ein Energiehaushalts- und Verdunstungsmodell für Wasser- und Stoffhaushaltsuntersuchungen landwirtschaftlich genutzter Einzugsgebiete. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* **42**, 294-299.
- BRADEN, H., 1995: The model AMBETI. - A detailed description of a soil-plant-atmosphere model. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **195**, 117 p.
- BRADEN, H., 2005: Calculation of microclimate under plastic mulches using an extended version of the SVAT model AMBETI. *Meteorologische Zeitschrift*, **14**, 165-172.
- GÉNÈRMONT, S., CELLIER, P., 1997: A mechanistic model for estimating ammonia volatilization from slurry applied to bare soil. *Agric. For. Meteorol.* **88**, 145-167.
- GOUDRIAAN, J., 1977: Crop micrometeorology: A simulation study. *Pudoc*, Wageningen.
- GRÜNHAGE, L., BRADEN, H., BENDER, J., BURKART, S., LEHMANN, Y., SCHRÖDER, M., 2011: Evaluation of the ozone-related risk for winter wheat at local scale with the CRO3PS model. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **71** (3), 90-97.
- LÖPMEIER, F.-J., 1994: Berechnung der Bodenfeuchte und Verdunstung mittels agrarmeteorologischer Modelle. *Z. Bewässerungswirtsch.* **29**, 2, 157-167.
- LÖPMEIER, F.-J., 1995: The agrometeorological Software-System AMBER; In: World Meteorological organization, Agricultural Meteorology. CAgM Report No. 61, WMO/TD-No. 676, 9 S.
- LUO L., A. ROBOCK, K. Y. VINNIKOV, C. A. SCHLOSSER, A. G. SLATER, N. A. SPERANSKAYA, A. BOONE, H. BRADEN, F. CHEN, P. COX, P. DE ROSNAY, C. E. DESBOROUGH, R. E. DICKINSON, Y.-J. DAI, Q. DUAN, J. ENTIN, P. ETCHEVERS, A. HENDERSON-SELLERS, N. GEDNEY, Y. M. GUSEV, F. HABETS, J. KIM, V. KOREN, E. KOWALCZYK, K. MITCHELL, O. N. NASONOVA, J. NOILHAN, A. J. PITMAN, J. SCHAAKE, A. B. SHMAKIN, T. G. SMIRNOVA, D. VERSEGHY, P. WETZEL, Y. XUE, Z.-L. YANG, Q.-C. ZENG, 2003: Effects of frozen soil on soil temperature, spring infiltration, and runoff: Results from the PILPS 2(d) experiment at Valdai, Russia. *J. Hydrometeorology* **4**, 2, 334-351.
- SCHLOSSER, C. A., A. SLATER, A. ROBOCK, A. J. PITMAN, K. Y. VINNIKOV, A. HENDERSON-SELLERS, N. A. SPERANSKAYA, K. MITCHELL, A. BOONE, H. BRADEN, P. COX, P. DEROSNEY, C. E. DESBOROUGH, Y.-J. DAI, Q. DUAN, J. ENTIN, P. ETCHEVERS, N. GEDNEY, Y. M. GUSEV, F. HABETS, J. KIM, E. A. KOWALCZYK, O. NASONOVA, J. NOILHAN, J. POLCHER, A. B. SHMAKIN, T. SMIRNOVA, D. L. VERSEGHY, P. WETZEL, Y. XUE, and Z.-L. YANG, 2000: Simulations of a boreal grassland hydrology at Valdai, Russia: PILPS 2(d). *Mon. Weather Rev.* **128**, 301-321.
- THOM, A.S., 1975: Momentum, mass and heat exchange of plant communities, in: *Vegetation and the Atmosphere*, (Ed.: J.L. Monteith), Vol. 1. *Academic Press*, London, 57-109.
- THOMPSON, N., I.A. BARRIE and M. AYLES, 1981: The Meteorological Office Rainfall and Evaporation Calculation System: MORECS (July 1981), *Hydrological Memorandum No. 45*.
- VERECKEN, H., J. MAES, J. FEYEN, 1990: Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Sci.* **149**, 1-12.

R. MANDERSCHIED, H.-J. WEIGEL

# 3 Das Braunschweiger FACE-Experiment

## The Braunschweig FACE experiment

### Zusammenfassung

Bei der Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft spielt der direkte Einfluss steigender atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf den Stoffwechsel der Pflanze eine wesentliche Rolle. Mehr CO<sub>2</sub> verringert die Transpiration und kann die Photosynthese erhöhen. Die Konsequenzen für Wachstum sind jedoch sehr komplex, sodass sie experimentell unter realen Feldbedingungen überprüft werden müssen. Freiland-CO<sub>2</sub>-Anreicherungsversuche mit Kulturpflanzen werden erst seit einigen Jahren weltweit betrieben. Anhand der Braunschweiger Feld-CO<sub>2</sub>-Anreicherungsversuche werden das CO<sub>2</sub>-Begasungssystem und die Effekte auf Ertrag und Wasserhaushalt einiger Kulturpflanzen gezeigt.

### Summary

To get a realistic estimate of the effect of climate change on crop production the direct influence of increasing atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations on plant metabolism has to be considered. Elevated CO<sub>2</sub> concentrations decrease leaf transpiration and can increase photosynthesis. For an assessment of the implications for crop growth and yield CO<sub>2</sub> enrichment experiments under field conditions are necessary. For some years now such free air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) experiments are practiced globally including at the Braunschweig site in Germany. The FACE-system used in Braunschweig and the CO<sub>2</sub> effects on growth and water relations of the tested crop species are shown.

### 1 Einführung

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre betrug über mehr als 400 000 Jahre hinweg bis etwa zum Ende des 19. Jahrhunderts etwa 280-290 ppm. Seit Beginn der Industrialisierung ist sie deutlich angestiegen und beträgt gegenwärtig global bereits etwa 390 ppm. Nach den Prognosen des Weltklimarates soll die CO<sub>2</sub>-Konzentration in 50 Jahren bereits bei etwa 470 bis 550 ppm liegen, wobei die gegenwärtig beobachteten jährlichen Steigerungsraten (PETERS et al. 2012) einen Anstieg auf mehr als 550 ppm erwarten lassen und damit die pessimistischen Annahmen des Weltklimarates noch übertreffen. CO<sub>2</sub> trägt – neben Wasserdampf – als wichtigstes Treibhausgas nicht nur zum Klimawandel insgesamt bei, sondern ist als Substrat der Photosynthese für alle Pflanzen von fundamentaler Bedeutung und wirkt direkt auf die Primärproduktion, das heißt auf die pflanzliche Biomassebildung ein.

In wissenschaftlichen Untersuchungen und bei der Bewertung der möglichen Folgen des zukünftigen Klimawandels auf die Vegetation insgesamt und auf die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion im Besonderen, spielt die Frage nach den möglichen direkten Auswirkungen des raschen Anstieges der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre auf

das Pflanzenwachstum eine entscheidende Rolle. Die Berücksichtigung beziehungsweise Nichtberücksichtigung des so genannten „CO<sub>2</sub>-Düungeeffektes“ in entsprechenden Klimaimpaktmodellen beeinflusst in starkem Maße Vorhersagen möglicher Temperatur- und Niederschlagseffekte für die Landwirtschaft (EASTERLING et al. 2007). In welchem Ausmaß sich der „CO<sub>2</sub>-Düungeeffekt“ unter Feldbedingungen tatsächlich realisieren und wie er mit anderen Faktoren des Klimawandels (zum Beispiel Trockenheit, Temperaturanstieg beziehungsweise Hitze) und des landwirtschaftlichen Managements (zum Beispiel Düngung) interagieren könnte, ist seit einigen Jahren Gegenstand experimenteller Felduntersuchungen am Institut für Biodiversität des TI (ehemals FAL, später TI) in Braunschweig.

### 2 Der CO<sub>2</sub>-Düungeeffekt: vom Einzelblatt bis zur Ertragswirkung

#### 2.1 Primäre CO<sub>2</sub>-Effekte auf den photosynthetischen CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Gaswechsel

Bei der Photosynthese nimmt die Pflanze über ihre Spaltöffnungen CO<sub>2</sub> auf. Gleichzeitig kommt es zur Transpiration, das heißt H<sub>2</sub>O diffundiert aus den Spaltöffnungen in

die Atmosphäre. In Anpassung an die erdgeschichtlichen Schwankungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration haben die Pflanzen unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Fixierungsmechanismen entwickelt (C<sub>3</sub>- und C<sub>4</sub>-Photosynthese). Die meisten unserer Kulturpflanzen (Gerste, Kartoffel, Reis, Soja, Weizen, Zuckerrübe) gehören zu den C<sub>3</sub>-Pflanzen. Bei ihnen führt der CO<sub>2</sub>-Anstieg zu einer Zunahme der Photosynthese. Die C<sub>4</sub>-Pflanzen, wozu Mais, Hirse und Zuckerrohr gehören, sind an niedrige CO<sub>2</sub>-Konzentrationen angepasst und bei ihnen erwartet man keine oder nur eine geringe Photosynthesestimulation durch mehr CO<sub>2</sub> (LEAKEY 2009). Alle Pflanzen (C<sub>3</sub> und C<sub>4</sub>) reagieren auf eine CO<sub>2</sub>-Erhöhung mit einer Verminderung der Spaltöffnungsweite (= stomatären Leitfähigkeit) beziehungsweise der Blatttranspiration (AINSWORTH und ROGERS 2007, LEAKEY 2009). Dies verbessert die unmittelbare Wasserausnutzungseffizienz des Blattes, das heißt das Verhältnis der Menge des assimilierten CO<sub>2</sub> zur Menge des an die Atmosphäre abgegebenen H<sub>2</sub>O.

### 2.2 Wachstums- und Ertragseffekte durch den Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration

Von landwirtschaftlicher Bedeutung ist, welche Wachstums- und Ertragsbeeinflussung bei Kulturpflanzen (Ackerbau, Grünland) durch erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zukünftig zu erwarten sind. Die möglichen Konsequenzen aus den genannten Primärwirkungen erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf den Blattgaswechsel für die agronomische Leistungsfähigkeit von Kulturpflanzen (zum Beispiel Ertragsmenge und -qualität) beziehungsweise für agrarökologische Zusammenhänge (zum Beispiel Wasser- und Stoffhaushalt, Konkurrenzverhalten von Nutz-/Wildpflanzen; Pflanzenkrankheiten) sind komplex und daher noch immer nicht vollständig verstanden.

Die Zunahme der Photosynthese unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration kann durch verschiedene Faktoren modifiziert werden mit entsprechenden Konsequenzen für das Pflanzenwachstum und den Ertrag. Zu diesen modifizierenden Faktoren gehören Wetter und Witterung (Temperatur, Strahlung), die Wasser- und Nährstoffversorgung sowie pflanzeninterne Faktoren.

Auch die Reduktion der Spaltöffnungsweite des Blattes unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration (AINSWORTH und ROGERS 2007) kann eine Vielzahl von Konsequenzen haben, die sich positiv oder negativ auf das Pflanzenwachstum auswirken können wie in Abbildung 3-1 dargestellt. Die Reduktion der Spaltöffnungsweite durch mehr CO<sub>2</sub> und die damit verbundene Reduktion der transpiratorischen Kühlung führen zu einer Erhöhung der Blattoberflächentemperatur sowie einer wärmeren und trockeneren Luft innerhalb des Bestandes. Dies könnte wiederum die antitranspiratorische CO<sub>2</sub>-Wirkung abschwächen. Die erhöhte Temperatur kann auch eine Entwicklungsbeschleunigung bis hin zu einem schnelleren Absterben der Blätter verursachen, mit negativen Konsequenzen für das Pflanzenwachstum. Denkbar ist zudem, dass die CO<sub>2</sub>-bedingte Erhöhung der Photosyntheserate eine Zunahme der Blattfläche bewirkt, sodass der Wasserverbrauch nur auf der Einzelblattebene aber nicht auf der Bestandesebene verringert wird. Eine Reduktion der Bestandestranspirationsrate unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration hätte bei gleicher Niederschlagsmenge eine Erhöhung der Bodenfeuchte zur Folge, die wiederum zu einer Zunahme der Evaporation oder der Bodenwasserreserven führt, sodass die Pflanze niederschlagsarme Perioden länger überstehen kann.

### 3 Untersuchungsmethoden zur Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Düngeeffekts

#### 3.1 Experimente in Klimakammern

Zur Ermittlung der Auswirkungen erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf das Wachstum und den Ertrag sind Experimente mit unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen erforderlich. Derartige „CO<sub>2</sub>-Begasungsversuche“ wurden und werden meist in Klimakammern mit vollständiger Kontrolle aller Umweltvariablen, in modifizierten Gewächshäusern, in Folientunneln oder in so genannten „Open-top“-Kammern durchgeführt, wobei die Pflanzen meist als Topfkulturen und selten in kleinen Modellbeständen angezogen werden. Folientunnel beziehungsweise Open-top-Kammern können jedoch auch direkt in agronomisch regulär etablierten Feldbeständen eingesetzt werden, indem man sie nach Aussaat oder Auflaufen der Kulturen im Feld über den Pflanzen errichtet (Abb. 3-2).

Gemeinsam ist allen Kammerversuchen, dass sich durch den Folien- oder Glaseinschluss die mikroklimatischen Bedingungen für die Pflanzen beziehungsweise Pflanzenbestände verändern. Dieser „Kammereffekt“ führt zu

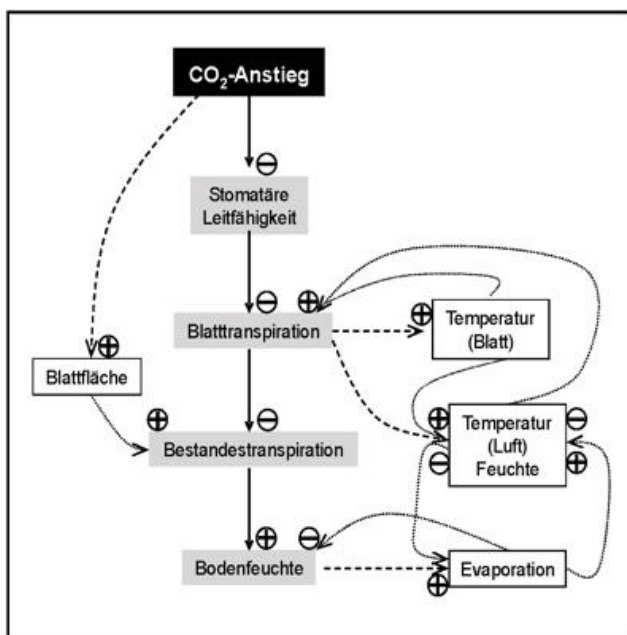
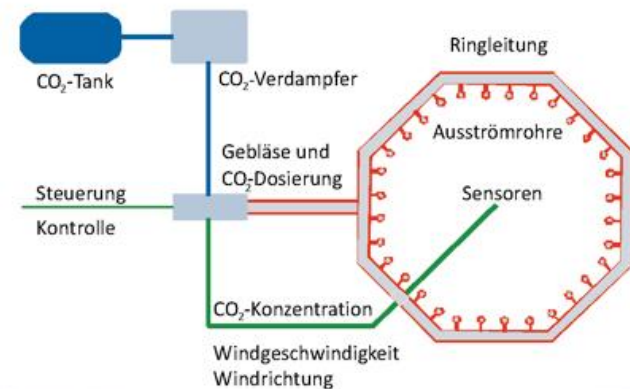


Abb. 3-1: Schematische Darstellung des primären CO<sub>2</sub>-Effektes auf die stomatäre Leitfähigkeit sowie der Folgewirkungen und möglichen Rückkopplungen innerhalb des Pflanzenbestandes.



Abb. 3-2: Versuchsfeld der ehemaligen FAL Braunschweig mit Open-Top-Kammern zur Untersuchung des  $\text{CO}_2$ -Düngeeffekts auf Sommerweizen.

einem Klima, das sich im Hinblick auf Strahlungsqualität und -quantität, Temperatur, Windgeschwindigkeit und rel. Luftfeuchte meist deutlich vom Freilandklima unterscheidet. In der Regel sind die Klimaverhältnisse in den Kammern wärmer und dunkler sowie durch eine konstante beziehungsweise kontinuierliche Windstärke gekennzeichnet, die aus der Verwendung von Gebläsen zur  $\text{CO}_2$ -Dosierung resultiert. Kammerversuche stellen daher verfälschte Wachstumsbedingungen dar, in denen die Pflanzenbestände von der Atmosphäre und – bei Verwendung von Topfkulturen – auch vom freien Bodenvolumen „entkoppelt“ sind. Damit sind zum Beispiel Un-



tersuchungen zur  $\text{CO}_2$ -Wirkung auf den Wasserhaushalt von Pflanzenbeständen nur eingeschränkt möglich. Topfversuche erlauben keine ungehinderte Entwicklung der Pflanzenwurzel, sodass beispielsweise keine zuverlässigen Untersuchungen zum  $\text{CO}_2$ -Effekt auf die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen möglich sind. Es bestand daher schon länger der Bedarf eine Technik zu entwickeln, mit der man die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in einem Agrarökosystem manipulieren kann ohne Beeinträchtigung der klimatischen Bedingungen und der Bodenverhältnisse (HENDREY und MIGLIETTA, 2006).

### 3.2 Freiland- $\text{CO}_2$ -Anreicherungssysteme (FACE)

Man hat bereits vor mehr als 20 Jahren damit begonnen, nach experimentellen Methoden zu suchen, mit denen sich zukünftige atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Szenarien direkt im Feld simulieren lassen. Eine solche „Freiland- $\text{CO}_2$ -Anreicherungstechnik“ ist das so genannte FACE-System (FACE = Free Air Carbon Dioxide Enrichment). Freilandbegasungssysteme wurden in den 1980er Jahren erstmals in England im Rahmen der Wirkungsforschung von Luftschadstoffen wie Schwefeldioxid auf die Vegetation entwickelt. Basierend auf dieser Technologie wurde in den USA das Begasungsprinzip auf die  $\text{CO}_2$ -Dosierung angewandt und weiterentwickelt (HENDREY und MIGLIETTA 2006). Dieses „ursprüngliche“ FACE-System besteht aus einem Tank mit Flüssig- $\text{CO}_2$ , einem Verdampfer, einem Gebläse und einer Ringleitung versehen mit vertikalen Ausströmröhren, die an der Basis mit pneumatischen Ventilen versehen sind,

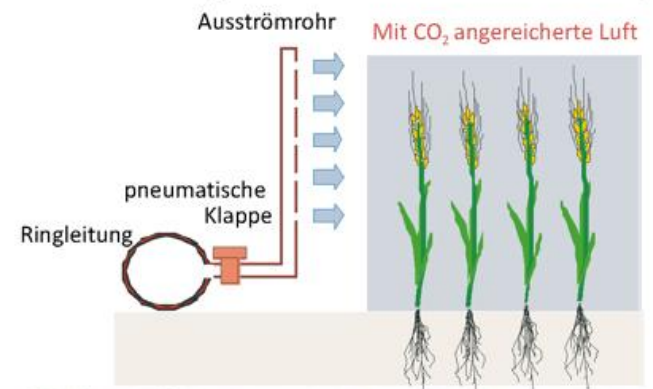


Abb. 3-3: Braunschweiger FACE-Anlage. Oben: schematische Darstellung der Aufsicht und Querschnitt eines Begasungsringes. Unten links: Foto zweier Versuchsrings kurz nach dem Aufbau (Oktober 1999) während des Fruchtfolgeversuchs mit Wintergerste (nach DÄMMGEN 2000). In den weißen Schränken befindet sich unter anderem das Steuerungsventil zur Dosierung des  $\text{CO}_2$ . Das Gebläse, mit dem das  $\text{CO}_2$  mit Luft verdünnt und in die Ringleitung eingeblasen wird, ist durch die Schränke verdeckt. Unten rechts: Foto mit Detailansicht der Ringleitung und eines Ausströmröhres mit pneumatischer Klappe.“



Abb. 3-4: Aufsicht auf einen Begasungsring während der drei FACE-Versuchsreihen (siehe Tabelle 3-1). Oben: Ring mit Winterweizen (Juni 2005) aus dem Fruchtfolge-Experiment mit Bestandesgaswechselkammern und schattierten Teilflächen; die linke Kreishälfte ist mit reduzierte N-Düngung versorgt. Mitte: Ansicht des Maisversuchsfeldes (Juli 2008) mit einem FACE-Ring im Vordergrund und einem Kontrollring im Hintergrund links; jede Ringfläche ist in eine feuchte und trockene Hälfte unterteilt. Unten: Parzellen mit vier Sorghum-Sorten und einer Maissorte (unten links und oben rechts) in der feuchten und trockenen Ringhälfte (mit Regenausschlusszelt, aber ohne Plane im Juli 2011).

über die die CO<sub>2</sub>-Zufuhr gesteuert wird (vergleiche Abb. 3-3, Kapitel 4.1). Innerhalb der Ringfläche werden Windrichtung, Windgeschwindigkeit sowie CO<sub>2</sub>-Konzentration erfasst. Mit diesen Daten wird die CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus den Ausstromröhren so gesteuert, dass die Zielkonzentration in der Ringmitte eingehalten wird, wobei jeweils nur die

Ausströmrohre auf der dem Wind zugewandten Seite des Ringes geöffnet werden. Dadurch wird die Luft mit erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration sowohl vom Gebläse als auch vom Wind über die Versuchsfläche verteilt.

FACE-Versuche wurden in den 1990iger Jahren des vorigen Jahrhunderts erstmals in den USA für Untersuchungen an Baumwolle und Weizen eingesetzt. Neben dem oben beschriebenen FACE-Typ, der unter Verwendung von Gebläsen mit einem Luft-CO<sub>2</sub>-Gemisch arbeitet, das in die Pflanzenbestände eingeblasen wird, sind mittlerweile FACE-Typen entwickelt worden, die unter Überdruck direkt unverdünntes CO<sub>2</sub> über Mikroporen in Schlauchleitungssystemen in die Pflanzenbestände einleiten (HENDREY und MIGLIETTA, 2006). FACE-Experimente sind technisch aufwändig und aufgrund des hohen CO<sub>2</sub>-Verbrauches relativ teuer im Betrieb und werden daher nur selten eingesetzt (LEAKEY et al. 2009). Größere FACE-Versuche in ackerbaulich genutzten Agrarökosystemen mit Begasungsringen mit Durchmessern von > 10 m werden gegenwärtig in Australien, China, Japan, Italien und in Braunschweig betrieben.

#### 4 Braunschweiger FACE-Experimente

##### 4.1 FACE-Design

Für die CO<sub>2</sub>-Anreicherungsversuche ist auf dem Gelände des TI in Braunschweig ein 20 ha umfassender Ackerschlag eingerichtet worden, der die notwendigen Anforderungen an Größe, Homogenität und freie Anströmbarkeit (fetch) erfüllt. Der Versuchsschlag wird vom landwirtschaftlichen Versuchsbetrieb des Forschungsgeländes nach gängiger landwirtschaftlicher Praxis im Hinblick auf Bodenbearbeitung, Düngung und Pflanzenschutz bewirtschaftet. Der Bodentyp ist ein sandiger Lehm (Luvisol; pH 6,5; C<sub>org</sub> 0,85% - 1,8%; Bodenzahl 48) und die nutzbare Feldkapazität in 0-60 cm Bodentiefe liegt bei etwa 100 mm.

Es wird eine ursprünglich vom Brookhaven National Laboratory (New York/USA) entwickelte ringförmig aufgebaute FACE-Anlage eingesetzt (HENDREY und MIGLIETTA 2006; vergleiche Kapitel 3.2). Jedes Ringsystem (Fläche etwa 310 m<sup>2</sup>) besteht aus einer auf dem Boden aufliegenden ringförmigen CO<sub>2</sub>-Hauptleitung, von der jeweils 32 senkrechte, gelochte „Begasungsröhren“ abgehen, aus denen das durch ein Gebläse vorgemischte CO<sub>2</sub>-Luft-Gemisch auströmt (Abb. 3-4). Auf dieser Ringfläche wird die Konzentration des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre während der Tageslichtstunden auf einen Zielwert (zum Beispiel 550 – 600 ppm) erhöht. Während der Versuche in Braunschweig wurden anfänglich (C<sub>3</sub>-Fruchtfolgeversuch) jeweils zwei „Begasungsringe“ (das heißt etwa 620 m<sup>2</sup> Fläche) mit CO<sub>2</sub> angereichert, während zwei Ringe als Kontrolle dienten und über das Gebläse nur mit Umgebungsluft versorgt wurden. Bei den späteren FACE-Versuchen wurden drei Begasungsringe (das heißt etwa 930 m<sup>2</sup> Fläche) betrieben und als Kontrollen dienten drei Flächen ohne Gebläse und CO<sub>2</sub>-Anreicherung. Bei Umgebungstemperaturen < 5°C und bei Windgeschwin-

Fruchtfolge/Pflanzenart	CO <sub>2</sub> -Konzentration [ppm]	Dauer	Ko-Variable beziehungsweise Untersuchung von Interaktionen
Wintergerste/Weidelgras Zuckerrübe Winterweizen	550	2000-2005	N-Versorgung ortsüblich vs. 50% von ortsüblich
Mais	550	2007-2008	Wasserversorgung feucht: nFK > 50% vs. trocken: nFK << 50%
Energiemais und Sorten von Sorghum-Hirse	600	2010/2011	Wasserversorgung feucht: nFK > 50% vs. trocken: nFK << 50%
Winterweizen	550	2014-2015	Hitzestress erzeugt durch Infrarotstrahler

Tab. 3-1: FACE-Versuchsreihen in Braunschweig in der Vergangenheit (2000-2011) und geplant für die Zukunft (2014-2015).

3-4). Der Aluminiumrahmen des Zeltes wurde an Tagen mit intensivem Regen (> 10 mm d<sup>-1</sup>) mit transparenten Planen überzogen und so der Niederschlag von der Versuchsfläche abgehalten.

digkeiten > 6,5 ms<sup>-1</sup> in ein Meter Höhe über dem Bestand wurde die CO<sub>2</sub>-Anreicherung grundsätzlich unterbrochen.

## 4.2 FACE-Experimente in Braunschweig

In Braunschweig wurden bisher FACE-Untersuchungen an einheimische Kulturpflanzen in drei verschiedenen mehrjährigen Experimenten durchgeführt und für 2014-2015 ist ein weiteres Experiment vorgesehen. Bei den einzelnen Versuchsreihen werden jeweils spezifische Fragestellungen verfolgt (siehe Tab. 3-1).

### 4.2.1 FACE-Versuchsreihe mit einer Fruchtfolge aus Wintergerste, Zuckerrübe und Winterweizen

In der ersten FACE-Versuchsreihe wurden die Auswirkungen erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration auf Wachstum, Ertrag und die Stoffflüsse unter einer für Norddeutschland typischen Fruchtfolge (Wintergerste, Weidelgras als Zwischenfrucht, Zuckerrübe, Winterweizen) ermittelt. Zur Untersuchung der Wechselwirkungen des CO<sub>2</sub>-Düngeeffektes mit der Stickstoff (N)-Versorgung der Versuchspflanzen wurde die Stickstoffdüngung der jeweiligen Fruchtfolgeglieder in jeder Ringhälfte um 50 % gegenüber der fruchtartspezifischen Volldüngung reduziert (siehe Abb. 3-4). Um weitere Einflussfaktoren möglichst auszuschließen, wurden alle anderen Nährstoffe in ausreichendem Masse angeboten. Die Wasserversorgung wurde kontrolliert und bei Bedarf wurde bewässert. Im Rahmen dieser FACE-Versuchsreihe wurden erstmals überhaupt Wintergerste und Zuckerrüben unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration angebaut. Für Weizen gab es bereits Resultate aus zwei FACE-Versuchen in den USA und in China.

### 4.2.2 Kombination von FACE mit einer Regenausschlussvorrichtung zur Klimawirkungsforschung bei Mais

In der zweiten FACE-Versuchsreihe wurde der CO<sub>2</sub>-Effekt auf Mais untersucht, wobei gleichzeitig die Wasserversorgung manipuliert wurde, indem die ringförmige Versuchsfläche in eine feuchte und trockene Hälfte aufgeteilt wurde. Dazu wurde die FACE-Technik mit einem Regenausschluss-System kombiniert (ERBS et al. 2012). Dieses bestand aus einem kommerziellen Großzelt (12 m x 20 m Grundfläche), das auf dem trockenen Halbkreis installiert wurde (Abb.

### 4.2.3 Kombination von FACE mit einer Regenausschlussvorrichtung zum Vergleich des Wachstums von Sorghum-Hirse-Genotypen und Mais

Sorghum-Hirse ist im Rahmen des Anbaus von Energiepflanzen in das Interesse der Landwirtschaft gerückt. Die Pflanze hat etwas höhere Temperaturansprüche und soll bei trockener Witterung mehr Biomasse produzieren als Mais. Es wurde ein zweijähriges FACE-Experiment mit verschiedenen Sorghum-Sorten und einer Maissorte durchgeführt. Die Ziele dieser FACE-Versuchsreihe waren zu prüfen, ob es intraspezifische (zwischen Sorghum-Sorten) und interspezifische Differenzen (zwischen Sorghum und Mais) gibt hinsichtlich der Reaktion auf geänderte Klimabedingungen (CO<sub>2</sub>-Konzentration, Sommertrockenheit).

## 5 Ergebnisbeispiele aus der Braunschweiger FACE-Versuchsreihe

In den FACE-Untersuchungen waren neben den klassischen agronomischen Erhebungen zu Wachstum, Ertragsmengen und -qualität der Fruchtfolgeglieder auch agrarökologische Erhebungen zum Wasser- und Kohlenstoffhaushalt und zur Biodiversität im Boden von Interesse. Die Ausführungen hier beschränken sich auf Ergebnisse zum Wasserhaushalt und zu Wachstums- und Ertragsdaten der Kulturpflanzen. Es werden nur zusammenfassende Aussagen gemacht.

### 5.1 Auswirkungen erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration auf Wachstum und Ertrag verschiedener Kulturpflanzen

#### 5.1.1 Fruchtfolge mit verschiedenen C<sub>3</sub>-Pflanzen

In Tabelle 3-2 sind die Erträge für die einzelnen Fruchtfolgeglieder (ohne Weidelgras) über den insgesamt sechsjährigen Feldversuch aufgelistet. Weniger Stickstoffdüngung war wie erwartet mit einer Ertragsminderung von 10 % bis maximal 20 % verbunden.

Der relative CO<sub>2</sub>-Effekt auf den Ertrag war unabhängig von der Düngung. Die Zunahme des Kornertrags unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration war bei der Wintergerste im

CO <sub>2</sub>	N	2000	2001	2002	2003	2004	2005
		Wintergerste	Zuckerrübe	Winterweizen	Wintergerste	Zuckerrübe	Winterweizen
normal	100	9,5	68	5,7	5,9	72	8,3
	50	7,8	61	4,7	4,7	64	7,3
erhöht	100	10,2	73	6,6	6,9	78	9,7
	50	8,5	66	5,9	5,6	75	7,5
% CO <sub>2</sub> -Effekt	100	8	8	16	17	7	16
	50	9	8	12	18	16	4

Tab. 3-2: Erträge (t ha<sup>-1</sup>) der verschiedenen Pflanzen aus dem zweimaligen Fruchtfolgeversuch unter normaler (370-380 ppm) und erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration (550 ppm) sowie mit ausreichender (N100) und reduzierter Stickstoffdüngung (N50= 50% von N100). Angegeben sind die Kornerträge und die Rübenfrischmassen.

Durchschnitt geringer als bei Winterweizen. Bei Letzterem betrug der Ertragszuwachs 16 % unter N100.

Am auffälligsten waren die Resultate zur Wirkung erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration auf das Wachstum und den Ertrag von Zuckerrüben. Mit Hilfe von Großküvetten wurde zwar im Sommer eine positive Interaktion zwischen CO<sub>2</sub> und Temperatur auf die Photosyntheserate nachgewiesen, aber am Ende der Vegetationsperiode lag die Steigerung des Rübenertes mit 7 % unter normaler Düngung deutlich niedriger als der CO<sub>2</sub>-Effekt aus Kammerversuchen. Auch die zeitliche Dynamik des Bestandeswachstums war unerwartet, denn nach einem positiven CO<sub>2</sub>-Effekt auf die grüne Blattfläche im Frühsommer wurde im weiteren Verlauf eine Effektkkehr beobachtet (MANDERSCHIED et al. 2010). Im August zeigten die Pflanzen unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration eine Beschleunigung der Blattseneszenz (Abb. 3-5) und im September hatten sie einen kleineren grünen Blattflächenindex als die Pflanzen unter normaler CO<sub>2</sub>-Konzentration. Eine mögliche Erklärung für dieses unerwartete Verhalten ist, dass der Rübenkörper nicht wie bisher angenommen eine unbegrenzte, sondern nur eine begrenzte Aufnahmekapazität für Assimilate hat und die Pflanze daher die Kapazität für die Assimilatsynthese über eine Reduktion der grünen Blattfläche diesem limitierten Bedarf anpasst.

Hinweise für eine interne Begrenzung des Pflanzenwachstums unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration gab es auch beim Getreide. Der Kornertrag setzt sich zusammen aus der Kornzahl sowie der Kornwachstumsrate und -dauer. Erwartungsgemäß wurden unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration ein Anstieg der Kornzahl sowie eine Zunahme der Kornwachstumsrate festgestellt. Angesichts der hohen Temperatur während der Kornfüllung im Juni und der damit verbundenen Erhöhung der Photosyntheserate unter mehr CO<sub>2</sub>, war eine Zunahme der Kornwachstumsrate zu erwarten. Überraschend war jedoch, dass gleichzeitig die Kornwachstumsdauer verringert wurde, sodass in der Summe kein positiver CO<sub>2</sub>-Effekt auf das Einzelkornwachstum beobachtet wurde (MANDERSCHIED et al. 2009).

Generell war darüber hinaus der relative CO<sub>2</sub>-Effekt auf den Ertrag und die gesamte oberirdische Biomasse etwa gleich groß, das heißt es gab keinen Effekt auf die Stoffverteilung zwischen einzelnen Pflanzenorganen (Ernte-Index). Neben der Ertragshöhe spielt auch die Ertragsqualität eine entscheidende Rolle in der Landwirtschaft. In den Braunschweiger FACE-Versuchen wurde wie in anderen Versuchen (TAUB et al. 2008) erstmals auch im Feld eine Reduktion des Kornproteingehalts beim Wintergetreide gefunden. Dies ist insbesondere beim Winterweizen problematisch, da hier vor allem die Klebereiweiße betroffen



Abb. 3-5: Ansicht des Zuckerrübenbestandes im August 2001 auf einer Versuchsfläche mit normaler (links) und erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration (rechts).

Variable	CO <sub>2</sub>	Wasser	2007	2008
Biomasse	normal	feucht	21,4	22,5
		trocken		17,2
	erhöht	feucht	21,7	22,5
		trocken		21,3
	% CO <sub>2</sub> -Effekt	feucht	1	0
		trocken		24
Kornertrag	normal	feucht	10,2	11,3
		trocken		7,3
	erhöht	feucht	10,3	11,2
		trocken		10,2
	% CO <sub>2</sub> -Effekt	feucht	1	-1
		trocken		41

Tab. 3-3: Auswirkungen einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration (FACE) auf Biomasse und Kornertrag (t ha<sup>-1</sup>) von Mais unter ausreichender und reduzierter Wasserversorgung. Ergebnisse aus der FACE-Versuchsreihe mit Mais von 2007 bis 2008.

sind, die für die Backqualität eine entscheidende Rolle spielen (WIESER et al. 2008).

### 5.1.2 Maisversuche bei gleichzeitiger Variation der Wasserversorgung

In der Braunschweiger FACE-Versuchsreihe wurde weltweit erstmals die Wechselwirkung von CO<sub>2</sub> und kontrollierter Wasserversorgung auf das Maiswachstum unter Feldbedingungen experimentell untersucht. Durch den Betrieb der Rain-Shelter in den Trockenstress-Parzellen und die bedarfsgerechte Bewässerung in der feuchten Variante war die Wasserzufuhr (Regen und Bewässerung) in beiden Varianten mit 160 mm (trocken) und 330 mm (feucht) im zweiten Versuchsjahr mit Mais sehr unterschiedlich. Hinzu kam eine nutzbare Feldkapazität von etwa 100 mm (siehe Kapitel 4.1), die im Verlauf der Vegetationsperiode von den Pflanzen in unterschiedlichem Maße für ihre Wasserversorgung verwendet wurde (siehe Kapitel 5.2.4). Das unterschiedliche Wasserangebot führte zu deutlichen Minderungen im Biomasse- (-24%) und Kornertrag (-35%) der Versuchspflanzen in der trockenen Variante und unter normaler CO<sub>2</sub>-Atmosphäre (Tab. 3-3). In beiden Versuchsjahren gab es unter feuchten Bodenbedingungen keinen CO<sub>2</sub>-Effekt auf das Wachstum. Die gefundenen Differenzen zwischen den beiden CO<sub>2</sub>-Varianten sind so gering (< 1 %), dass angenommen werden kann, dass das Maiswachstum nicht auf den CO<sub>2</sub>-Anstieg reagiert, sofern eine ausreichende Wasserversorgung gegeben ist. Bei begrenzter Wasserverfügbarkeit gab es dagegen einen deutlichen CO<sub>2</sub>-Effekt auf die gesamte oberirdische Trockenmasse (+24 %) und den Kornertrag (+41 %).

Bei wenig Niederschlag wird das Wachstum durch die verfügbaren Wasserressourcen bestimmt. Die produzierte Biomasse ergibt sich aus der Wassernutzungseffizienz (WNE) und der verfügbaren Wassermenge. Die erhöhte CO<sub>2</sub>-Kon-

zentration führte in der trockenen Variante zu einer deutlichen Zunahme von WNE (Tab. 3-4). Bei ausreichender Bewässerung gab es keinen oder nur einen geringen CO<sub>2</sub>-Einfluss, was vermutlich auf einem vermehrten Wasserverlust durch Evaporation und Versickerung beruhte. Unter Trockenstress wurde eine Erhöhung der WNE um 25 % gefunden, das heißt die Pflanzen benötigen unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration etwa 20 % weniger Wasser für die Biomasseproduktion.

Dies stimmt überein mit der Transpirationsminderung, die in dem Maisversuch gefunden wurde (siehe Kapitel 5.2.2).

### 5.2 Auswirkungen erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration auf den Wasserhaushalt verschiedener Kulturpflanzen

Wie unter 2.1 dargestellt, profitieren C<sub>3</sub>- und C<sub>4</sub>-Pflanzen von einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration unter anderem durch einen sparsameren Wasserverbrauch. Bei der Versuchsreihe mit C<sub>3</sub>-Pflanzen wurde ein Einfluss der Wasserversorgung auf das Wachstum weitestgehend ausgeschlossen, indem die Bodenfeuchte im Bedarfsfall durch Beregnung angehoben wurde, sodass die nutzbare Feldkapazität stets zwischen 60 bis 90 % lag. Behandlungseffekte auf das Pflanzenwachstum können daher größtenteils auf CO<sub>2</sub>-bedingte Änderungen in der Photosynthese zurückgeführt werden. Bei den C<sub>3</sub>-Pflanzen wurden neben Kammermessungen zur Bestandesevapotranspiration nur Messungen zur Bodenfeuchte im Oberboden (0 bis 40 cm Tiefe) und zur Bestandestemperatur durchgeführt, während bei den C<sub>4</sub>-Pflanzen Transpirationmessungen auf Einzelblatt und Bestandesebene, Temperaturmessungen sowie ausführliche Messreihen zur Bodenfeuchte bis in über 100 cm Bodentiefe durchgeführt wurden. Im Folgenden werden Ergebnisse aus den verschiedenen FACE-Versuchen zu den in Abbildung 3-1 diskutierten Primär- und möglichen Sekundäreffekten erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration gezeigt.

#### 5.2.1 Stomatäre Leitfähigkeit und Transpirationsrate auf Einzelblattebene

Während des zweijährigen Maisexperiments wurde die stomatäre Leitfähigkeit (gs) an mehreren Tagen an den oberen sonnenexponierten Blättern in der gut bewässerten Variante mit normaler und erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration gemessen. In Abb. 3-6 sind die zum gleichen Zeitpunkt durchgeführten Messungen zu gs dargestellt. Danach ist gs unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration um etwa 20 % bis 50 %

CO <sub>2</sub>	Wasser	2007	2008
normal	feucht	7,21	7,60
	trocken		8,06
erhöht	feucht	7,24	8,34
	trocken		10,1
% CO <sub>2</sub> -Effekt	feucht	0	10
	trocken		25

Tab. 3-4: Auswirkungen einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration (FACE) auf die Wasserausnutzungseffizienz der Biomasseproduktion (g kg<sup>-1</sup>) von Mais unter ausreichender und reduzierter Wasserversorgung. Ergebnisse aus der FACE-Versuchsreihe mit Mais von 2007 bis 2008.

verringert. Porometrische Untersuchungen an unterschiedlichen Blättern von verschiedenen Sorten von Sorghum-Hirse lieferten einen CO<sub>2</sub>-Effekt in ähnlichem Umfang.

### 5.2.2 Transpirationsrate auf Bestandesebene

Wie bereits erläutert, sind bei der Aufskalierung des CO<sub>2</sub>-Effekts vom Einzelblatt auf die Bestandesebene weitere Faktoren zu berücksichtigen (Abb. 3-1). Ein wesentlicher Aspekt sind Änderungen in der Blattfläche pro Pflanze. Es hat sich jedoch gezeigt, dass der grüne Blattflächenindex in der Regel bei allen untersuchten Pflanzenarten kaum durch CO<sub>2</sub> beeinflusst wird. Der Wasserverbrauch auf Bestandesebene wurde in der FACE-Versuchsreihe mit der C<sub>3</sub>-Fruchtfolge mit Bestandegaswechsellammern gemessen, wobei die Evapotranspiration (Wasserfluss von etwa 0,7 m<sup>2</sup> großen Bestandesausschnitten) erfasst wurde (BURKART et al. 2011). Durch den Kammereinschluss der Pflanzen gab es leichte Änderungen im Mikroklima (Temperatur, Strahlung, Windgeschwindigkeit) im Vergleich zu den Feldbedingungen. Die so über die Vegetationsperiode ermittelte Reduktion der Evapotranspiration durch die erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration reichte von 9 % bei Win-

tergerste bis 18 % bei der Zuckerrübe. Bei den anschließenden FACE-Versuchsreihen mit C<sub>4</sub>-Pflanzen wurde die Transpiration der ganzen Pflanzen mit Hilfe von Saftflussmanschetten erfasst. Die Manschetten werden knapp über dem Boden an den Stängel montiert und versorgen diesen über ein Heizband mit einem konstanten Wärmestrom. Über Temperatursensoren ober- und unterhalb des erwärmten Stängelabschnitts wird die Verlagerung der Wärme durch den Transpirationsstrom erfasst und dieser so quantifiziert. Mit der Methode wurde beim Mais unter guter Bewässerung

eine deutliche Abnahme des Transpirationsstroms unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration festgestellt. An den Messtagen im ersten Versuchsjahr wurde insgesamt ein Wasserverbrauch von 52,1 mm unter normaler und von 37,3 mm unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration gefunden (Abb. 3-7). Im zweiten Versuchsjahr lagen die entsprechenden Werte bei 36,9 beziehungsweise 29,3 mm. Danach beträgt die durchschnittliche Reduktion der Bestandestranspiration durch die erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration 25 %. Bei der anschließenden Versuchsreihe mit Sorghum-Hirse wurde mit der gleichen Methode ein ähnlich großer Transpirationsabfall nachgewiesen.

### 5.2.3 Temperatur der Bestandesoberfläche und der Bestandesluft

Zu ausgewählten Terminen, das heißt bei geschlossenem Bestand, sonnigem Wetter mit hoher Einstrahlung (um die Mittagszeit) und wenig Wind, wurden von einer Hebebühne in etwa 10 Meter Höhe über dem Versuchsfeld Aufnahmen der unterschiedlich behandelten Pflanzenbestände mit einer Thermokamera durchgeführt. Bei allen Pflanzenarten war unter diesen Bedingungen innerhalb der Versuchsfläche mit erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration eine Erwärmung der Bestandesoberfläche um etwa 1 bis 2°C im Vergleich zur Fläche außerhalb des Begasungsringes zu sehen (Abb. 3-8). Beim Winterweizen erfolgte die Thermographie ausnahmsweise unter relativ windigen Bedingungen mit entsprechenden Konsequenzen für die CO<sub>2</sub>-Verteilung nach dem CO<sub>2</sub>-Austritt aus den vertikalen Begasungsröhren und dem Erwärmungsmuster. Das Wärmebild des Zuckerrübenbestandes wurde Anfang Juli aufgenommen als der Bestand in der normal gedüngten Stickstoffvariante (N100) gerade den Bestandesschluss erreicht hatte (Abb. 3-8). In einem linken Streifen mit verringerter Düngung (N50) war das Blattwachstum und somit die transpiratorische Oberfläche etwas geringer, was eine höheren Oberflächentemperatur zur Folge hatte. Innerhalb des FACE-Ringes war für beide N-Stufen eine deutliche Zunahme der Oberflächentemperatur zu erkennen. Das unterste Wärmebild in Abb. 3-8 wurde während des ersten Maisversuches vor Beginn der unterschiedlichen Wasserversorgung aufgenommen. Man erkennt deutlich die Erhöhung der Oberflächentemperatur in den Versuchsflächen mit CO<sub>2</sub>-Anreicherung.

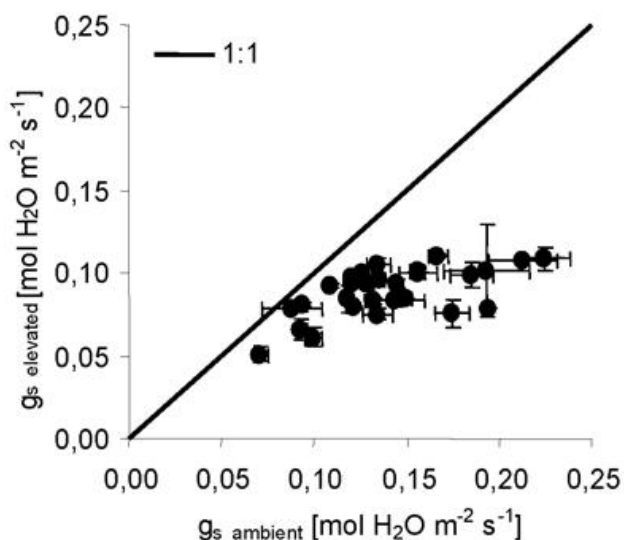


Abb. 3-6: Messwerte der stomatären Leitfähigkeit (g<sub>s</sub>) von Maisblättern unter normaler (ambient) und erhöhter (elevated) atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentration aus dem Maisversuchsjahr 2007 und 2008. Die Pflanzen waren gut bewässert.

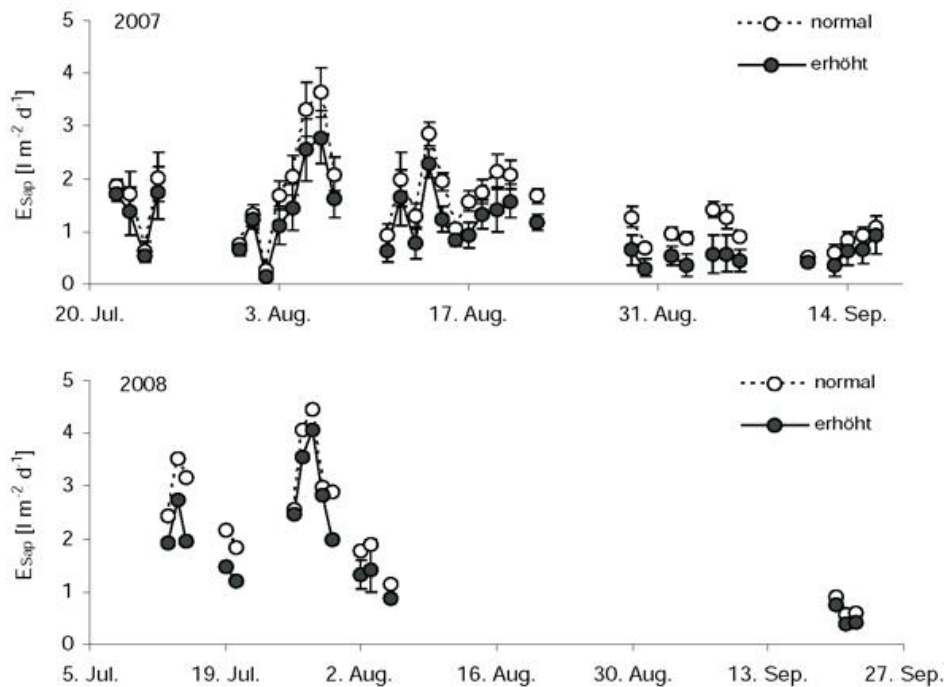


Abb. 3-7: Saisonaler Verlauf der Saftflussrate (Esap) des Maisbestandes unter normaler und erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration bei ausreichender Wasserversorgung in 2007 und 2008.

Neben den punktuellen Messungen der Oberflächentemperatur wurden über die ganze Vegetationsperiode in Kooperation mit dem DWD in Braunschweig kontinuierlich die Lufttemperatur in etwa 70 % Bestandshöhe aufgezeichnet. Es wurde eine positive Korrelation zwischen der Globalstrahlung und der  $\text{CO}_2$ -bedingten Erhöhung der Bestandeslufttemperatur gefunden. Entsprechend war der  $\text{CO}_2$ -Effekt zur Mittagszeit am größten und der mittlere Erwärmungseffekt über die Wachstumsperiode reichte meist von 0,3 bis 0,5°C, während nachts kaum Temperaturdifferenzen auftraten (Abb. 3-9). Abgesehen vom ersten Versuchsjahr mit Wintergerste waren die beobachteten  $\text{CO}_2$ -Effekte auf die Lufttemperatur im Bestand bei den einzelnen Kulturen relativ ähnlich - inklusive der Maisresultate. Das Tagesmittel der Lufttemperatur-Differenz zwischen den beiden  $\text{CO}_2$ -Varianten war so gering ( $< 0,2^\circ\text{C}$ ), dass kein Temperatur-Effekt auf die Phänologie zu erwarten ist. Dies stimmt überein mit entsprechenden phänologischen Messungen an den Versuchspflanzen.

#### 5.2.4 Änderungen in der Bodenfeuchte

Die  $\text{CO}_2$ -Anreicherung führte bei allen hier untersuchten Pflanzenspezies zu einer Erhöhung der Bodenfeuchte, wie sich bei der kontinuierlichen Messung mit Bodenfeuchte-Sensoren (TDR-Sonden) oder bei punktuellen gravimetrischen Feuchtemessungen durch den DWD zum Ende der Vegetationsperiode herausstellte (BURKART et al. 2011). Abbildung 3-10 zeigt als Beispiel den Verlauf des pflanzenverfügbaren Bodenwassers (entsprechend nutzbare Feldkapazität) in 0 bis 60 cm Tiefe für das zweite Maisversuchsjahr. Anfang Juli begann die unterschiedliche Wasserversorgung der trockenen und feuchten Ringhälften. Im weiteren Verlauf fiel das pflanzenverfügbare Bodenwasser

in der trockenen Variante auf bis zu etwa 10 mm ab, während in den feuchten Versuchspartellen die nutzbare Feldkapazität über 50 % lag. In beiden Bewässerungsvarianten war im Verlauf der Vegetationsperiode ein deutlicher  $\text{CO}_2$ -Effekt zu sehen und die Bodenwasserreserven waren unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration bis zu 20 mm höher als unter normaler  $\text{CO}_2$ -Konzentration. In der feuchten Variante wurde ab August die Bewässerungsmenge auf den FACE-Flächen verringert, um Staunässe zu verhindern, und der Maisbestand bei normaler  $\text{CO}_2$ -Konzentration erhielt bis zur Ernte 20 mm mehr Wasser über die Tropfbewässerung.

## 6 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend haben die Braunschweiger FACE-Versuche folgende Ergebnisse geliefert:

- eine deutliche Stimulation der Photosynthese bei den  $\text{C}_3$ -Pflanzen Gerste, Zuckerrübe und Weizen, aber eine vergleichsweise geringe Stimulation des Wachstums und der Erträge, die niedriger ausfiel als in vielen ähnlichen Kammerversuchen,
- eine deutliche Beeinflussung des Wasserhaushaltes (verminderte Blatt- und Bestandstranspiration, höhere Bodenfeuchten) bei  $\text{C}_3$ - und  $\text{C}_4$ -Pflanzen,
- ähnliche  $\text{CO}_2$ -Effekte bei hoher und niedriger N-Düngung,
- deutliche Veränderungen der Kornqualität und
- kein  $\text{CO}_2$ -Effekt auf das Wachstum von Mais bei ausreichender Wasserversorgung, aber Kompensation von Trockenstresseffekten.

Die weitere Anpassung der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion an den unvermeidbaren Klimawandel in den nächsten Jahrzehnten steht jetzt im Mittelpunkt des wissenschaftlichen und politischen Interesses. Eine Anpassung zur Vermeidung negativer Effekte und zur Nutzung positiver Effekte gelingt, wenn einerseits die regionalen Szenarien des Klimawandels möglichst genau bekannt sind und andererseits die tatsächlichen „Nettoeffekte“ der unterschiedlichen Wirkungen der verschiedenen Klimaelemente bestmöglich bekannt sind. Im Hinblick auf den  $\text{CO}_2$ -Düngeeffekt in der Pflanzenproduktion sollte sich die zukünftige wissenschaftliche Bearbeitung auf zwei Bereiche konzentrieren. Die erste Herausforderung besteht darin, die Wechselwirkungen des  $\text{CO}_2$  mit den übrigen Elementen des Klimawandels (Trockenheit, Temperaturanstieg, Hitzeperioden, phytotoxische Ozonkonzentrationen) und mit Aspekten des landwirtschaftlichen Managements noch besser zu verstehen. Die überwiegende Mehrzahl der

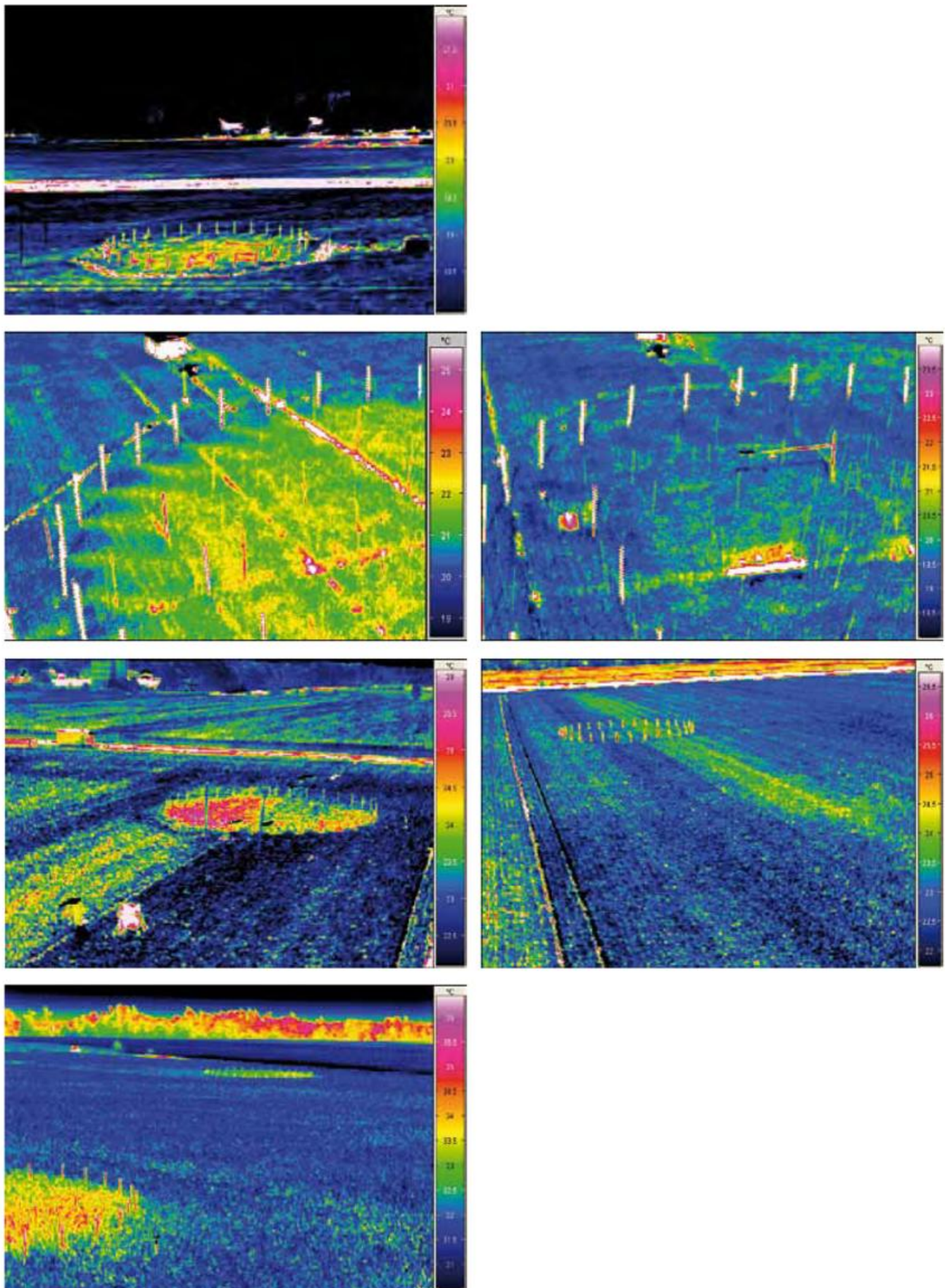


Abb. 3-8: Wärmebilder der Bestandesoberfläche der einzelnen untersuchten Kulturpflanzen unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration (von oben nach unten: FACE-Ring mit Wintergerste; Winterweizen in FACE-Ring (links) und in normaler CO<sub>2</sub>-Atmosphäre (rechts); Zuckerrübe in FACE-Ring (links) und in normaler CO<sub>2</sub>-Atmosphäre (rechts); Maisversuchsfeld mit zwei FACE-Ringen).

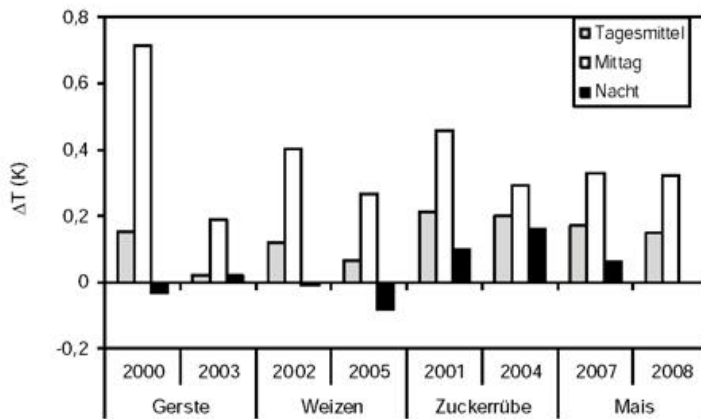


Abb. 3-9: Differenz der Bestandestemperaturen zwischen Versuchsflächen mit erhöhter (550 ppm) und normaler  $\text{CO}_2$ -Konzentration. Die Temperatur wurde in etwa 70% der Bestandeshöhe gemessen. Angegeben sind das Tagesmittel (0-24 Uhr, Mittag (11-15 Uhr) und Nachtmittel (23-5 Uhr) für die Kulturpflanzen aus den FACE-Versuchsreihen bis 2008. Die Messwerte für die Fruchtfolge (2000-2005) beziehen sich jeweils auf die ganze Vegetationsperiode und für die Maisversuche (gut bewässerte Variante) auf die Monate Juli bis August.

bisherigen Untersuchungen hat sich nur mit den Wirkungen des  $\text{CO}_2$  als Einzelfaktor befasst. Es mangelt aber vor allem an relevanten Feldstudien zur Interaktion verschiedener Klimatelemente. Zukünftig ist beispielsweise in den Sommermonaten verstärkt mit Trockenheit und mit häufigerem Auftreten von Hitzeperioden zu rechnen. Ob und wie die Auswirkungen dieser Stressfaktoren durch mehr  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre modifiziert werden, ist eine offene Frage.

Nicht zuletzt wegen der überwiegend negativen Einflüsse der prognostizierten Klimaänderungen (Temperaturanstieg, Trockenheit) auf das Pflanzenwachstum sollte der positive Effekt durch den  $\text{CO}_2$ -Anstieg möglichst ausgeschöpft werden. Wie oben dargestellt mehrten sich bei FACE-Experimenten die Hinweise, dass die heutigen Sorten unserer Kulturpflanzen die theoretisch möglich Steigerung der Photosynthese unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration nur zum Teil in Ertragssteigerung umsetzen (LEAKEY et al. 2009). Die Ursachen hierfür sind ver-

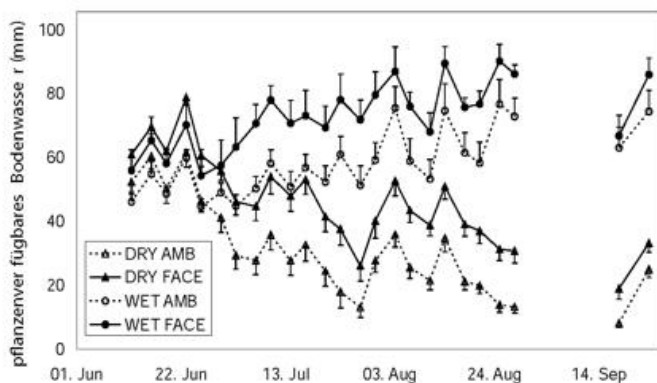


Abb. 3-10: Saisonaler Verlauf des pflanzenverfügbaren Bodenwassers (0-60 cm Tiefe) unter Maisbeständen bei normaler (AMB) und erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration (FACE) sowie mit unterschiedlicher Wasserversorgung ab Anfang Juli (feucht: WET; trocken: DRY).

mutlich pflanzeninterne Regulationsprozesse, die zu unterschiedlichen Entwicklungsphasen das Wachstum und die Ertragsbildung steuern und in komplexer Weise von der genetischen Ausstattung und den Witterungsbedingungen abhängen. Es sollen daher in Zukunft FACE-Versuche mit möglichst vielen Genotypen einer Pflanzenart durchgeführt werden, um zu prüfen, ob es intraspezifische Variabilität im  $\text{CO}_2$ -Effekt auf Wachstum und Ertrag gibt. Mit diesem Ansatz sollen die zugrunde liegenden Prozesse ermittelt und der  $\text{CO}_2$ -Düngeeffekt auf den Ertrag optimiert werden.

Am Thünen-Institut für Biodiversität wird beiden Fragestellungen nachgegangen. Laufende Untersuchungen bearbeiten die relative Empfindlichkeit verschiedener Sorghum-Genotypen gegenüber Trockenheit und einer erhöhten  $\text{CO}_2$ -Konzentration. Ein Feldversuchsprojekt widmet sich weiterhin dem Screening einer hohen Zahl von Gerstegenotypen, um Spannbreiten der Wachstumsreaktionen gegenüber einer  $\text{CO}_2$ -Anreicherung zu testen. Darüber hinaus wird die Infrastruktur für Untersuchungen zur Interaktion zwischen hohen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen (FACE) und erhöhten Temperaturen (unter anderem Hitzestress) unter Feldbedingungen aufgebaut, die in 2013 beginnen.

## 7 Literatur

- AINSWORTH, E., ROGERS, A., 2007: The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising  $\text{CO}_2$ : mechanisms and environmental interactions. *Plant Cell Environ.* **30**, 258–270.
- BURKART, S., MANDERSCHIED, R., WITTICH, K.-P., LÖPMEIER, F. J., WEIGEL, H.-J., 2011: Elevated  $\text{CO}_2$  effects on canopy and soil water flux parameters measured using a large chamber in crops grown with free-air  $\text{CO}_2$  enrichment. *Plant Biol.* **13**, 258–269.
- EASTERLING, W.E., AGGARWAL, P.K., BATIMA, P., BRANDER, L.M., ERDA, L., HOWDEN, S.M., KIRILENKO, A., MORTON, J., SOUSSANA, J.-F., SCHMIDHUBER, J. ET AL., 2007: FOOD, FIBRE AND FOREST PRODUCTS. In: PARRY, M.L., CANZIANI, O.F., PALUTIKOF, J.P., VAN DER LINDEN, P.J., HANSON, C.E., Eds. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, UK: Cambridge University Press, 273–313.
- ERBS, M., MANDERSCHIED, R., WEIGEL, H.J., 2012: A combined rain shelter and free-air  $\text{CO}_2$  enrichment system to study climate change impacts on plants in the field. *MEE* **3**, 81–88.
- HENDREY, G.R., MIGLIETTA, F., 2006: FACE technology: past, present, and future. In: 'Managed ecosystems and  $\text{CO}_2$  case studies, processes, and perspectives'. (Eds J. Nosberger, S.P. Long, R.J. Norby, M. Stitt, G.R. Hendrey, H. Blum), Springer-Verlag, Berlin, pp. 15–43.

- LEAKEY, A.D.B., 2009: Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C-4 crops for food and fuel. *Proc. R. Soc. Lond. B: Biol. Sci.* **276**, 2333-2343.
- LEAKEY, A.D.B., AINSWORTH, E.A., BERNACCHI, C.J., ROGERS, A., LONG, S.P. AND ORT, D.R., 2009: Elevated CO<sub>2</sub> effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *J. Exp. Bot.* **60**, 2859-2876.
- MANDERSCHIED, R., PACHOLSKI, A., FRÜHAUF, C., WEIGEL, H.J., 2009: Effects of free air carbon dioxide enrichment and nitrogen supply on growth and yield of winter barley cultivated in a crop rotation. *Field Crops Res.* **110**, 185-196.
- MANDERSCHIED, R., PACHOLSKI, A., WEIGEL, H.J., 2010: Effect of free air carbon dioxide enrichment combined with two nitrogen levels on growth, yield and yield quality of sugar beet: evidence for a sink limitation of beet growth under elevated CO<sub>2</sub>. *Eur. J. Agron.* **32**, 228-239.
- PETERS, G.P., MARLAND, G., LEQUERE, C., BODEN, T., CANADELL, J.G., RAUPACH, M.R., 2012: Rapid growth in CO<sub>2</sub> emissions after the 2008–2009 global financial crisis. *Nature Clim. Change* **2**, 2-4.
- TAUB, D.R., MILLER, B., ALLEN, H., 2008: Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the protein concentration of food crops: a meta-analysis. *Glob. Change Biol.* **14**, 565-575.
- WIESER, H., MANDERSCHIED, R., ERBS, M., WEIGEL H.J., 2008: Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations on the quantitative protein composition of wheat grain. *J. Agric. Food Chem.* **56**, 6531-6535.

F.-M. CHMIELEWSKI, K. BLÜMEL

# 4 Klimawandel und Obstbau

## Climate Change and Fruit Growing

### Zusammenfassung

Der Klimawandel birgt für den Obstanbau sowohl Chancen als auch Risiken. Die Chancen liegen vor allem darin, dass durch die verlängerte Vegetationsperiode und die höheren Temperaturen in allen Jahreszeiten zunehmend wärmeliebende Arten als auch Sorten mit einer längeren Reifezeit in Deutschland angebaut werden können. Von höheren atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalten könnten gerade Obstgehölze profitieren, die ausreichend mit Wasser und Nährstoffen versorgt werden. Allerdings könnte Trockenheit während der Sommermonate den Bewässerungsbedarf erhöhen. Zu den Risiken, und damit zum Gegenstand der Forschung, zählen Veränderungen im winterlichen Kältereiz für die Gehölze (Dormanzbrechung), die Gefahr von Spätfrostschäden infolge einer früheren Baumblüte, zunehmender Schädlingsdruck unter wärmeren Bedingungen sowie die Gefahr der Ausbreitung bekannter und neuer Pflanzenkrankheiten. Veränderungen der klimatischen Bedingungen können zudem ertragsbeeinflussend sein.

### Abstract

Climate change includes both, opportunities and risks for fruit growing. The opportunities lie in the fact that due to the extended growing season length and higher temperatures in all seasons, heat-loving species and varieties with a longer maturity period can be increasingly grown in Germany. Just fruit trees, which are usually sufficiently supplied with water and nutrients, could benefit from the higher atmospheric CO<sub>2</sub>-concentrations. However, drought during the summer months could increase the irrigation demand. The risks, and thus the subject of the research, include changes in the cold stimulus for the trees during winter (release of dormancy), the danger of late frost damage as a result of an earlier beginning of fruit tree blossom, and the increase of known and new pests and diseases under warmer conditions. Climate change can also affect the fruit yield.

### 1 Einleitung

Obwohl der Obstbau nur einen geringen Anteil an der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland einnimmt, wird in nahezu jedem Bundesland Obst angebaut. Zum Baumobst zählen Obstarten wie Apfel, Birne, Pflaume/Zwetschge, Süßkirsche, Sauerkirsche, Mirabelle/Reneklode, Aprikose und Pfirsich. Der Apfel ist mit einem Anteil von 85,3 %, die wichtigste Obstart in Deutschland (STATISTISCHES JAHRBUCH 2010). Mit großem Abstand werden Pflaumen/Zwetschgen (5,7 %), Birnen (4,0 %) Süß- (2,7 %) und Sauerkirschen (2,3 %) kultiviert. Den Schwerpunkt des Obstbaus in Deutschland hinsichtlich der Anbaufläche bildet Baden-Württemberg (31,6 %) gefolgt von Niedersachsen (18,6 %), Rheinland-Pfalz (8,9 %) und Sachsen (8,6 %).

Im Vergleich zum Pflanzenbau, wo Möglichkeiten zur Anpassung an Klimaänderungen relativ schnell greifen können, sind bei der Anlage und Umgestaltung von Obstplantagen längerfristige Aspekte, wie klimatische Veränderungen, von vornherein zu berücksichtigen. Immerhin beträgt die Nutzungsdauer von Obstplantagen 25 bis 30

Jahre, und der Höchstertrag beim Baumobst stellt sich erst nach etwa 7 bis 10 Jahren ein. Die Anpassung des Obstbaus an Klimatrends benötigt daher Zeit und längerfristige Investitionen. Zudem sind die Obstanbaugebiete stark regional begrenzt und auf klimatisch sowie topographisch begünstigte Gebiete beschränkt (Abb. 4-1). Dies erhöht generell die Sensitivität des Obstbaus gegenüber klimatischen Veränderungen.

Im Vergleich zu landwirtschaftlichen Kulturarten befinden sich Untersuchungen zu den Auswirkungen von Klimaschwankungen und -änderungen auf den Obstbau noch in den Anfängen.

Eine der ersten Untersuchungen wurde an der Michigan State University (MSU) im Rahmen des Projektes „Pileus“ (2005-2007) durchgeführt. Obwohl das Gesamtziel dieses Projekts wesentlich weiter gefasst war, wurden in diesem Forschungsvorhaben erste Untersuchungen zu den Auswirkungen von Klimaschwankungen und -änderungen auf den Anbau von Sauerkirschen in Michigan durchgeführt (WINKLER et al. 2002, ZAVALLONI 2006). Nahezu zeitgleich (2006-2009) wurden im Rahmen des Projektes „KliO“

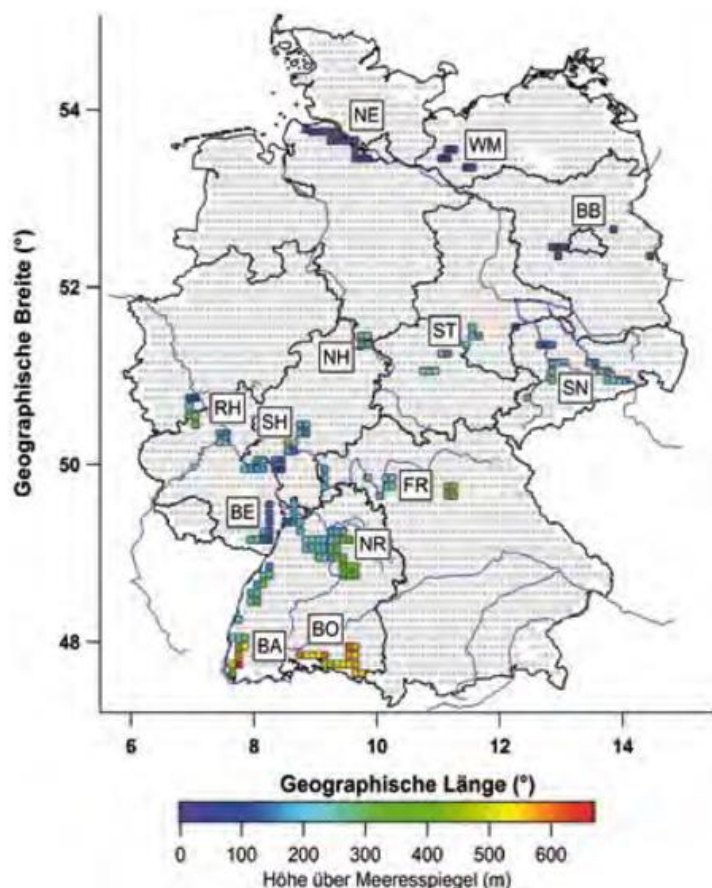


Abb. 4-1: Hauptanbaugebiete für Baumobst in Deutschland. NE: Niederelbe, WM: West-Mecklenburg, BB: Havelland/Brandenburg, ST: Stüßer See/Thüringen, SN: Elbtal/Sachsen, RH: Rheinland/Rheinessen, NH: Nordhessen, SH: Südhessen, FR: Franken, BE: Bergstraße, NR: Neckarregion, BA: Baden, BO: Bodenseegebiet.

erstmalig die Chancen und Risiken des Klimawandels für den Obstbau in Deutschland analysiert (CHMIELEWSKI et al. 2009a, 2009b). Die hier vorgenommenen Abschätzungen zu den klimabedingten Schäden im Apfelanbau und den möglichen Kosten des Klimawandels basierten auf verschiedenen Impact-Modellansätzen (phänologische Modelle, Wasserhaushaltsmodelle, Ertragsmodelle, Schaderregermodelle) und Regionalisierungen des ECHAM5/OM-Modelllaufes (WETTREG, REMO-UBA, Treibhausgas-Emissionsszenarien B1 und A1B). Spätere Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft in Washington (USA), die neben annuellen Kulturarten auch den Apfelanbau betrachtet haben, kamen zu sehr ähnlichen Resultaten wie in KliO (STÖCKLE 2010).

Das Projekt CLIMARK (2010-2014), das von der MSU koordiniert wird, ist

nunmehr auf den Sauerkirschanbau in den USA (Michigan) und in Europa (Deutschland, Polen, Ukraine, Ungarn) ausgerichtet. Dieses Projekt geht weit über den Rahmen herkömmlicher Impactstudien hinaus und untersucht zusätzlich Aspekte des Klimawandels auf nationale und internationale Handelsbeziehungen (WINKLER et al. 2010). Die in KliO begonnenen Studien für Deutschland werden ebenfalls auf regionaler Ebene fortgeführt und vertieft (INKLIM-A Hessen, CHARIKO 2010-2014). Hierbei werden die bereits in KliO entwickelten Ansätze methodisch weiter verbessert und auf den Obstanbau in Hessen angewandt. In den nachfolgenden Abschnitten wird auf einige methodische Aspekte bei den Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Obstbau eingegangen.

## 2 Mögliche Folgen von Klimaänderungen im Obstbau

Klimatische Veränderungen in den Obstbauregionen können sowohl positive als auch negative Folgen für den Anbau von Baumobst haben. Bereits heute sind die ersten Folgen rezenter Klimaänderungen im Obstbau erkennbar. Sichtbare Anzeichen sind Verschiebungen in der Vegetationsentwicklung, wie ein vielfach beschriebener früherer Blühbeginn der Obstgehölze in Deutschland (CHMIELEWSKI et al. 2004, ESTRELLA et al. 2007, HENNIGES et al. 2007, BLANKE und KUNZ 2009). Vor allem zeitig blühende Obstarten, wie Aprikose und Pfirsich, zeigen die stärkste Verfrühung im Blühbeginn (Tab. 4-1).

Zu den positiven Effekten des Klimawandels zählt gewiss die für die Zukunft angenommene Verlängerung der thermischen Vegetationszeit in Deutschland um mehr als einen Monat (CHMIELEWSKI et al. 2009b). Hierdurch können neue Sorten angebaut werden, die eine deutlich längere Reifezeit benötigen und bisher aufgrund der thermischen Verhältnisse nicht für den Anbau in Deutschland geeignet waren. Dieser Trend zu neuen Sorten ist bereits heute feststellbar. So wird seit einigen Jahren die wärmeliebende, neuseeländische Apfelsorte „Braeburn“ mit Erfolg an

Obstart	x	Datum	s	T in 45 Jahren	Konfidenzintervall ± Tage
Apfel früh	126	06.05.	7,6	-12,5**	7,1
Apfel spät	129	09.05.	8,6	-12,9*	8,2
Aprikose	106	16.04.	12,4	-17,2**	12,0
Birne	120	30.04.	10,1	-13,7**	7,3
Pfirsich	111	21.04.	11,5	-15,7**	7,7
Pflaume	117	27.04.	10,4	-14,1**	10,2
Sauerkirsche	121	01.05.	7,1	- 9,5**	6,9
Süßkirsche	115	25.04.	7,7	- 9,5*	7,6

Tab. 4-1: Mittlere Eintrittstermine und Trends im Blühbeginn von Obstgehölzen in ganz Deutschland (x: mittlerer Eintrittstermin in Tagen nach Jahresbeginn, Datum, s: Standardabweichung der Jahreswerte, T: Trend 1961-2005 mit 95 %-Konfidenzintervall in Tagen, Signifikanz des Trends mit \*: p < 5 %, \*\*: p < 1 %, \*\*\*p < 0,1 %.

der Niederelbe angebaut und vermarktet. Diese Apfelsorte rangiert schon heute an sechster Stelle im Apfelsortiment der Niederelbe (GÖRGENS 2007). Weitere, spätreifende Sorten wie „Fuji“, „Pink Lady“ und „Granny Smith“ könnten somit im Zuge des Klimawandels auch in Deutschland an Bedeutung gewinnen.

## 2.1 Erfüllung des winterlichen Kältereizes

Äpfel können in fast allen gemäßigten Klimazonen der Welt erfolgreich angebaut werden. Hierfür gibt es Züchtungen und Unterlagen, die sich für die meisten Regionen eignen. Um den Winter unbeschadet zu überstehen, müssen die Bäume im Herbst in einen Ruhezustand gelangen, um nicht zu erfrieren bzw. nicht vor Winterende auszutreiben. Die Winterruhe (Dormanz) kann nach LANG et al. (1987) in drei Stadien eingeteilt werden, die Para-, Endo- und Ökodormanz, die durch verschiedenen Faktoren in der Pflanze selbst (Dominanz der Triebe, Phytohormone, Enzyme, etc.) und durch die Umwelt (Tageslänge, Lufttemperatur, Spektralverschiebung der Lichtes, etc.) induziert und letztendlich auch wieder aufgehoben werden. Hierbei wird angenommen, dass zur Überwindung der Endodormanz (eigentliche Winterruhe) ein sorten- beziehungsweise artenspezifisches Kältebedürfnis („chilling requirement“,  $C^*$ ) erforderlich ist, dem die Gehölze ausgesetzt sein müssen. Diese Annahme ist vor dem Hintergrund der sehr komplexen, biochemischen Prozesse, beispielsweise in den Blütenknospen der Bäume, gewiss zu einfach, jedoch eine bisher weit verbreitete Theorie. Für Apfelbäume wird ein Kältebedürfnis von ungefähr 600 - 1800 Kältestunden („chilling hours“, CH) angenommen (unter anderen BALDOCCHI und WONG 2008). Zur Berechnung der „chilling hours“ werden stündliche Temperaturen verwendet, die in einem fest vorgegebenen Intervall liegen müssen (siehe Gleichung 2). Es gibt heutzutage auch einige neuere Apfelsorten, die an ausgesprochen milde Winter angepasst sind und dementsprechend ein Kältebedürfnis von unter 600 CH besitzen. Solche Sorten wie „Beverly Hills“, „Gordon“, „Tropical Beauty“ werden beispielsweise im südlichen Kalifornien und in Florida angebaut (ANDERSEN und CROCKER 2009). In solchen Regionen ist die Frage, ob die winterlichen Bedingungen ausgereicht haben, dass Kältebedürfnis der Gehölze zu befriedigen, ein alljährliches Problem. Somit ist in tropischen Gebieten unserer Erde der Anbau von Obst aus den gemäßigten Breiten ohne weitergehende Behandlung meist nicht möglich, da die Temperaturen in diesen Regionen nicht mehr den für die Gehölze erforderlichen Kältereiz erfüllen.

Ein unzureichender winterlicher Kältereiz kann einen verspäteten und ungleichmäßigen Beginn der Baumbüte nach sich ziehen. Ebenso kann ein längerer Blühzeitraum, mit verstärktem Knospenabwurf, die Folge sein (EREZ 2000, LEGAVE et al. 1982). Dies kann dann im Verlauf des Jahres zu einer ungleichmäßigen Fruchtreife und damit zu ökonomischen Konsequenzen für die Obstbauern führen (COUVILLON 1995). In Frankreich wurde bereits

durch die deutlich ansteigenden Wintertemperaturen, das Absterben von Knospen und Blüten bei einigen Aprikosensorten beobachtet (SEGUIN et al. 2005).

Der in Zukunft zu erwartende deutliche Anstieg der Lufttemperatur, vor allem im Herbst und im Winter, könnte zum Ende dieses Jahrhunderts, selbst in den gemäßigten Breiten, zu Veränderungen im winterlichen Kältereiz führen. Dementsprechend wurden hierzu erste Untersuchungen in verschiedenen Regionen der Erde durchgeführt (SCHWARZ und HANES 2010, DARBYSHIR et al. 2011). Hierbei hat sich gezeigt, dass sich der in einigen subtropischen Gegenden zur Verfügung stehende Kältereiz bereits reduziert hat (BALDOCCHI und WONG 2008, LUEDELING et al. 2009b, 2009c). Für Deutschland konnte bisher keine signifikante Änderung der winterlichen Kältesumme zwischen 1950 und 2010 festgestellt werden (LUEDELING et al. 2009a). Untersuchungen von CHMIELEWSKI et al. (2012) lassen vermuten, dass selbst bis zum Ende dieses Jahrhunderts das Kältebedürfnis für die meisten Obstarten in Deutschland erfüllt sein wird, obwohl es künftig zu stärkeren regionalen Verschiebungen in der Beendigung der Winterruhe (Endodormanz) kommen kann. Das Ende der Gehölzruhe hängt sowohl vom Kältebedürfnis der Pflanze als auch von den klimatischen Bedingungen am Standort, vor allem zwischen Oktober und Februar ab. In diesem Zeitraum liegen die Temperaturen meist in einem Bereich, der zur Überwindung der Dormanz förderlich ist. Zur Beschreibung dieser Ruhephase werden sogenannte Kältestunden-Modelle verwendet, die auf der Grundlage von stündlichen Temperaturdaten ( $T_{ih}$ ) rechnen. Der pflanzenspezifische Kältebedarf ( $C^*$ ) wird hierbei in Kältestunden, Kälteeinheiten (chilling units, CU) bzw. Kälteportionen (chill portions, CP) angegeben. Die insgesamt bis zur Zeit (Tag)  $t$  akkumulierte Kältesumme  $S_c(t)$  wird hierbei mit verschiedenen Modellansätzen  $R_c(T_{ih})$  berechnet. Der notwendige Kältereiz  $C^*$  ist am Tag  $t_1$  erfüllt, wenn  $S_c(t)$  für  $t=t_1$  zum ersten Mal gleich oder größer als  $C^*$  wird (Gleichung 1).

$$S_c(t) = \sum_{i=t_0}^t \sum_{h=1}^{24} R_c(T_{ih}), \text{ mit } S_c(t_1) \geq C^* \quad (1)$$

Der einfachste und relativ weit verbreitete Ansatz ist hierbei das Weinberger-Eggert Modell (WEINBERGER 1950), das zur Überwindung der Dormanz stündliche Kältereize (CH) mit Temperaturen im Bereich zwischen 0 und 7,2 °C aufsummiert.

$$R_c(T_{ih}) = \begin{cases} 1 \text{ CH, wenn } 0 < T_{ih} < 7.2 \text{ °C} \\ 0 \text{ CH, wenn } T_{ih} \leq 0 \text{ °C oder } T_{ih} \geq 7.2 \text{ °C} \end{cases} \quad (2)$$

Das Utah-Modell (RICHARDSON et al. 1974) ist etwas detaillierter, da es eine Wichtung der stündlichen Temperaturen, entsprechend ihres Einflusses auf die Freisetzung der Dormanz, vornimmt (UCU). Der Ansatz geht davon aus, dass vor allem Temperaturen zwischen 2,5 °C und < 9,2 °C (Gewicht = 1) hierfür effektiv sind. Hingegen können höhere Temperaturen ab 16 °C die akkumulierte Kältesumme wieder verringern.

$$R_c(T_{ih}) = \begin{cases} 0.0 \text{ UCU, wenn } T_{ih} < 1.5^\circ\text{C} \\ 0.5 \text{ UCU, wenn } 1.5^\circ\text{C} \leq T_{ih} < 2.5^\circ\text{C} \\ 1.0 \text{ UCU, wenn } 2.5^\circ\text{C} \leq T_{ih} < 9.2^\circ\text{C} \\ 0.5 \text{ UCU, wenn } 9.2^\circ\text{C} \leq T_{ih} < 12.5^\circ\text{C} \\ 0.0 \text{ UCU, wenn } 12.5^\circ\text{C} \leq T_{ih} < 16.0^\circ\text{C} \\ -0.5 \text{ UCU, wenn } 16.0^\circ\text{C} \leq T_{ih} < 18.0^\circ\text{C} \\ -1.0 \text{ UCU, wenn } T_{ih} \geq 18.0^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

Eine Abwandlung des Utah-Modells stellt das Positiv-Utah Modell dar (LINSLEY-NOAKES et al. 1995), das den reduzierenden Einfluss von Temperaturen  $\geq 16,0^\circ\text{C}$  auf die Aufhebung der winterlichen Ruhephase nicht berücksichtigt. Dieses Modell findet vor allem in subtropischen Regionen Anwendung.

Das wohl am stärksten pflanzenphysiologisch begründete Modell ist das Dynamische Modell (FISHMAN et al. 1987a, 1987b, EREZ und FISHMAN 1998), das auf weit komplexeren Annahmen als Gleichung (1) basiert. Dieses Modell berechnet sogenannte Kälteportionen (CP), die einfach gesagt erst dann irreversibel festgeschrieben werden, wenn die Pflanze über eine bestimmte Zeit förderlichen Temperaturen zur Überwindung der Dormanz ausgesetzt war. Höhere Temperaturen über einen längeren Zeitraum können diesen Vorgang verzögern, jedoch kurze warme Abschnitte ihn sogar beschleunigen. Optimale Temperaturen werden hier zwischen  $6^\circ\text{C}$  und  $8^\circ\text{C}$  angenommen. Diese Annahmen stammen weitestgehend aus

experimentellen Beobachtungen und sind in die Modellierung eingeflossen (FISHMANN 1987b).

Neben diesen vier Modellen existieren noch weitere Ansätze, auf die hier nicht weiter eingegangen wird. Allgemein kann man sagen, dass das Weinberger-Eggert-Modell ein sehr einfaches und bei den Obstbauern weit verbreitetes Modell ist. Neuere Untersuchungen kommen jedoch zu dem Schluss, dass das Modell vermutlich zu simpel ist, um die Winterruhe der Gehölze ausreichend beschreiben zu können (DARBYSHIR 2011, LUEDELING und BROWN 2011, CAMPOY et al. 2012). Hingegen wird oft das dynamische Modell als bestes und universell einsetzbares Modell angesehen (LUEDELING und BROWN 2011, DARBYSHIR et al. 2011).

Untersuchungen zum Modellverhalten unter sich verändernden klimatischen Bedingungen haben gezeigt, dass das Weinberger-Eggert-Modell, im Vergleich zu den drei anderen Modellansätzen, ein deutlich differierendes Verhalten aufweist (CHMIELEWSKI et al. 2012). Während das einfache CH-Modell für wärmere klimatische Verhältnissen in Deutschland (2071-2100, REMO-UBA, Szenario A1B) stets ein späteres Ende der Winterruhe berechnet, sind die Ergebnisse der anderen Modelle stark vom Kältebedürfnis der Gehölze ( $C^*$ ) abhängig. Nach diesen drei Ansätzen würde sich für Kulturen mit einem geringen Kältebedarf (700-1100 h) das Ende der Dormanz im langjährigen Mittel leicht verspäten, sich für Arten mit einem

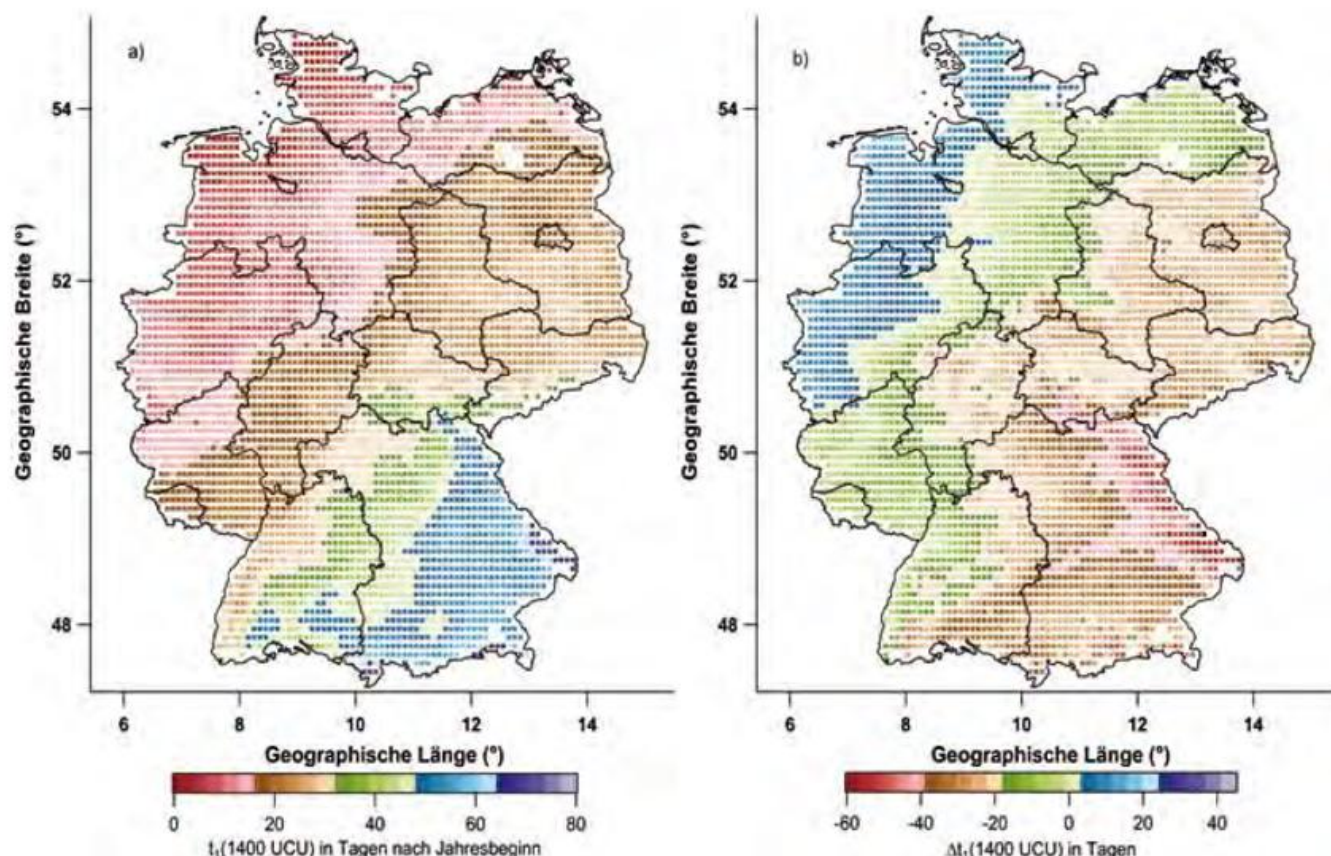


Abb. 4-2: (a) Mittleres Ende der Winterruhe ( $t_1$ ) für Gehölze mit einem Kältebedürfnis von 1400 Kälteeinheiten (UCU: Kältestunden nach dem Utah-Modell) für heutige klimatische Bedingungen 1971-2000; (b) Mögliche Veränderungen dieses Terms ( $\Delta t_1$ ) 2071-2100 (REMO-UBA, Szenario A1B) minus 1971-2000 (REMO-UBA, C20).

mittleren Bedarf (1200-1400 h) nur geringe Veränderungen ergeben und sich für Obstarten mit einem hohen Kältebedürfnis (1500-1800 h) das Ende der Winterruhe zunehmend verfrühen.

Abbildung 4-2 (a) zeigt, dass das Ende der Dormanz für einen Kältereiz von 1400 Stunden (Utah Modell) etwas früher in den maritimen, nordwestdeutschen Regionen (< 15 Tage nach Jahresbeginn, DOY) als in den winterlich kühleren, südöstlichen Gebieten (> 35 DOY) gebrochen wird. Somit ist ein klarer NW/SE-Gradient über Deutschland erkennbar. Abbildung 4-2 (b) veranschaulicht mögliche Änderungen dieses Termins zum Ende dieses Jahrhunderts im Vergleich zu heute. Interessant ist hierbei, dass bei einem Kältebedürfnis von 1400 UCU nur in einem schmalen Streifen im Nordwesten der Republik (u.a. auch Anbauregion NE in Abb. 4-1) mit einem späteren Ende der Winterruhe zu rechnen ist. Dies ist die Region, in der dieser Termin heutzutage zuerst erreicht wird, siehe Abb. 4-2 (a). In den gegenwärtig winterkalten, südöstlichen Gegenden, führt die künftige Erwärmung hingegen zu einer deutlichen Verfrüfung des Endes der Winterruhe, um maximal bis zu 60 Tagen. Diese Befunde zeigen in ähnlicher Weise auch das Positive Utah und das Dynamische Modell und sollten daher bei der Projektion phänologischer Entwicklungsstadien für künftige klimatische Verhältnisse berücksichtigt werden.

## 2.2 Spätfrostschäden

Zu den gefürchteten Witterungsschäden im Obstbau gehört seit jeher Spätfrost, der den Fruchtansatz an den Bäumen stark reduzieren kann. Im Zuge des Klimawandels können sich die Häufigkeit und die Stärke der Fröste, die sowohl durch nächtliche Ausstrahlung als auch durch advective Prozesse entstehen können, ändern.

Nach dem außergewöhnlich milden Winter 2006/07 kam es im Frühjahr 2007 in vielen Ländern Osteuropas zu erheblichen Frostschäden mit starken Ertragseinbußen von teilweise über 50 % beim Apfel, wie in Ungarn, Polen, Tschechien, der Slowakei, sowie in Litauen und Lettland (ELLINGER und GÖRGENS 2007). Heftige Spätfrostereignisse Anfang Mai 2011 führten auch vor allem im Süden Deutschlands zu Schäden am Wein. Hier waren zum Teil nicht nur die Blütenknospen, sondern auch die Triebspitzen erfroren. Zusätzlich kam es zu Frostschäden an Kirschen und Äpfeln, die bereits als kleine Früchte an den Bäumen hingen.

Untersuchungen zu Veränderungen in der Häufigkeit und Stärke von Frostschäden unter sich ändernden klimatischen Bedingungen sind daher von Bedeutung. Hierfür ist es zunächst wichtig zu wissen, wie sich der Blühbeginn der Gehölze künftig ändern wird, da die Obstbäume zur Zeit der Blüte und kurz danach ihre stärkste Empfindlichkeit gegenüber Frost aufweisen. Für solche Abschätzungen sind phänologische Modelle erforderlich, die sowohl für heutige als auch für künftige klimatische Verhältnisse verlässli-

che Ergebnisse liefern. Die oben gemachten Aussagen zu den regionalen Veränderungen im Ende der Winterruhe legen die Verwendung von gekoppelten „Chilling/Forcing“ (CF)-Modellen nahe (CHMIELEWSKI et al. 2011). Reine Forcing-Modelle, zu denen das bekannte „Growing Degree Day“ (GDD)-Modell gehört (Gleichung 4b), sind unter heutigen klimatischen Bedingungen durchaus verwendbar, zeigen jedoch große Schwächen bei der Projektion von Veränderungen in der Pflanzenentwicklung unter wärmeren Bedingungen.

$$S_f(t) = \sum_{i=t_1}^t R_f(T_i), \text{ wobei } S_f(t_2) \geq F^* \quad (4a)$$

$$R_f(T_i) = \max(0, T_i - T_{BF}) \quad (4b)$$

Das erste Problem besteht in der Wahl eines geeigneten Starttermins ( $t_1$ ) für den Beginn der Temperatursummation. Ergibt sich für das optimale Modell ein relativ später Starttermin (zum Beispiel der 1. März), so ist das Modell nicht in der Lage, förderliche Temperaturen für die Entwicklung der Knospen zu berücksichtigen, die im Zuge des Klimawandels bereits im Januar oder Februar auftreten könnten. Eine Fixierung von  $t_1$  auf einen früheren Termin, beispielsweise den 1. Januar, ist hierfür scheinbar die Lösung, vorausgesetzt, dass die Winterruhe zu diesem Zeitpunkt bereits beendet ist. Theoretische Untersuchungen von BLÜMEL und CHMIELEWSKI (2012a) haben jedoch deutlich gezeigt, dass der phänologische Trend eines solchen Forcing-Modells nicht mehr von der Wahl der Modellparameter ( $T_{BF}$ : Basistemperatur für die Temperatursumme,  $F^*$ : notwendige Temperatursumme bis zum Phaseneintritt) abhängt, sondern nur noch einem eigenen, modellinternen Verlauf folgt, der lediglich von dem vorgegebenen Temperaturanstieg im Frühjahr abhängt. Damit besitzt das Forcing-Modell keinen Wert mehr und berechnet einen viel zu starken phänologischen Trend für die Zukunft. Meist ist zudem die optimale Basistemperatur im Modell ( $T_{BF}$ ) physiologisch nicht zu erklären (zum Beispiel  $T_{BF} < 0^\circ\text{C}$ ).

Um dennoch unter wärmeren klimatischen Bedingungen einen zeitgerechten Start der Forcing-Modelle zu ermöglichen (zum Beispiel 1. Januar), wurden das GDD-Modell um einen Tageslängenterm erweitert (Gleichung 5b). DL ist hierbei die Zeit in Stunden von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang und EXPO ein weiterer Modellparameter, der mit zu optimieren ist. Die akkumulierte Wärmesumme  $S_f(t)$  in (5a) zusammen mit (5b) wird dann nicht wie in (4b) in GDD, sondern in Photo-Thermischen Einheiten (PTU) angegeben.

$$S_f(t) = \sum_{i=t_1}^t R_f(T_i), \text{ wobei } S_f(t_2) \geq F^* \quad (5a)$$

$$R_f(T_i) = \max(0, T_i - T_{BF}) \cdot \left( \frac{DL}{10h} \right)^{EXPO} \quad (5b)$$

Dieser neue Term widerspiegelt vermutlich zum einen die bei einigen Gehölzen nachgewiesene photoperiodische Reaktion (BASLER und KÖRNER 2012), führt aber in jedem

	Beobachtung	REMO-UBA	ECHAM5 CLM	HadCM3 CLM	WETTREG Lauf 0	WETTREG Lauf 1	Modellmittel
1971-2000	119 (2,7) 29.04.	120 (3,8) 30.04.	120 (3,3) 30.04.	120 (3,2) 30.04.	120 (1,4) 30.04.	120 (1,7) 30.04.	120 (1,5) 30.04.
2071-2100		105 (3,4) 15.04.	105 (2,7) 15.04.	104 (3,6) 14.04.	98 (1,6) 08.04.	98 (2,2) 08.04.	102 (4,4) 12.04.
Differenz		-15 (5,0)	-15 (4,1)	-16 (4,7)	-22 (2,1)	-22 (2,8)	-18 (4,5)
p-Wert		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007
Signifikanz		***	***	***	***	***	***

Tab. 4-2: Blühbeginn beim frühreifenden Apfel in Hessen (Mittelwert über die Obstbauregionen), berechnet mit dem gekoppelten Dynamischen Modell und dem modifizierten GDD-Modell (Gleichung 5). 30-jährige Mittelwerte (in DOY) mit einseitigem 95 %-Konfidenzintervall in Klammern (in Tagen) für 1971-2000 und 2071-2100 sowie Differenz beider Werte (in Tagen) und p-Wert (in %) zur H0: „Differenz gleich null“ und H1: „Differenz ungleich null“. Signifikanz: \*: p < 5%, \*\*: p < 1%, \*\*\*p < 0,1%.

Fall zu einer realistischen Basistemperatur, auch wenn  $t_j$  im Modell auf den 1. Januar gesetzt wird. Der eigentliche Vorteil der Gleichung (5b) zeigt sich, wenn diese Forcing-Funktion mit den zuvor beschriebenen Kältestunden-Modellen kombiniert wird. Die Verwendung von Chilling-Modellen bietet sich gerade für Obstgehölze an, da sich in der Literatur Angaben zum Kältebedarf  $C^*$  von Obstarten und -sorten finden lassen. Die Kopplung von beispielsweise Gleichung (1) mit Gleichung (5) führt bei der Optimierung (Eichung) des Modells nicht nur zu einer realistischen Basistemperatur  $T_{BF}$  im Ansatz (5b), sondern auch zu einem realistischen Kältebedürfnis  $C^*$  der Obstart (siehe auch MATZNELLER et al. 2012).

Als Beispiel sei hier die mögliche Verschiebungen des Blühbeginns beim Apfel in Hessen für fünf regionale Klimaszenarien dargestellt (BLÜMEL und CHMIELEWSKI 2012b). Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Blühbeginn des Apfels zum Ende dieses Jahrhunderts in den Obstbauregionen Hessens im Mittel signifikant um 18 Tage ( $\pm 4,5$  d) verfrühen kann (Tab. 4-2).

Um eine Aussage zu den möglichen Veränderungen in der Spätfrostgefahr zu machen, ist zusätzlich noch das Blühende zu berechnen, um wenigstens drei frostsensitive Entwicklungszeiträume betrachten zu können (n Tage vor dem Blühbeginn, Blühbeginn bis Blühende, nach Blühende), in denen sich die Empfindlichkeit der Knospen, Blüten beziehungsweise Jungfrüchte gegenüber Frost leicht unterscheidet. Dementsprechend variiert auch der angenommene Schaden. Angaben hierzu findet man in der Literatur, zum Beispiel in RIEGER (2006).

Neben der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Frost bestimmter Stärke in diesen Zeitabschnitten ist es von Interesse abzuschätzen, wie sich die Schäden an den Knospen oder Blüten künftig ändern könnten. Dieses Wissen ist wiederum erforderlich, um den späteren Ertragsverlust durch Frost berechnen zu können. Für diese Berechnungen kann man die Minimumtemperatur der Luft ( $T_n$ ) verwenden, beziehungsweise besser das Minimum der Bestandstemperatur ( $T_{veg}$ ), da dieses in klaren, windschwachen Strahlungsnächten wesentlich kleiner als  $T_n$  sein kann. In windigen und

bewölkten Nächten hingegen gleichen sich beide Temperaturen an. Die Berechnung der Bestandstemperatur ist generell nur mit aufwendigen SVAT-Modellen (*Soil-Vegetation-Atmosphere*) möglich, so dass man sich entweder auf die Minimumtemperatur beschränken muss, wobei der Blütenschaden dann vermutlich unterschätzt wird, oder approximativ die Feuchttemperatur ( $T_f$ ) verwenden muss, die von den Obstbauern als Startzeitpunkt für die Frost-

schutzberegnung genutzt wird. Diese Temperatur stellt sich jedoch nur auf einer feuchten Blattoberfläche ein und nicht bei einem trockenen Bestand. In BLÜMEL und CHMIELEWSKI (2012b) wurde daher die Bestandstemperatur ( $T_{veg}$ ) approximativ aus einer modifizierten Feuchttemperatur ( $T_{fm}$ ) berechnet (Gleichung 6a), die nachfolgend noch mittels Windgeschwindigkeit ( $V_{10}$ ) und Bedeckungsgrad ( $N$ ) korrigiert wurde, da bei geringen Windgeschwindigkeiten  $T_{fm}$  im Vergleich zu  $T_{veg}$  immer noch zu hoch war. Dieses  $T_{fm}^*$  in Gleichung (6b) wurde zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit von Spätfrostschäden an der den Blüten verwendet.

$$T_{fm} = \left[ T - \frac{1}{\gamma} \cdot (E(T_{fm}) - e) \cdot \frac{r_H(V_{10})}{r_H(V_{10}) + r_s} \right] \quad (6a)$$

$$T_{fm}^* = T_{fm} - \left[ \frac{1K \cdot ms^{-1}}{V_{10} + 1ms^{-1}} \cdot (1 - N) \right] \quad (6b)$$

$T$ : Lufttemperatur;  $\gamma$ : Psychrometerkonstante;  $E$ : Sättigungsdampfdruck;  $e$ : Dampfdruck;  $r_H$ : aerodynamischer Widerstand für Wärmeleitung, der von der Windgeschwindigkeit  $V_{10}$  abhängt;  $r_s$ : Bulk-Stomatawiderstand

Tabelle 4-3 zeigt die berechneten Wahrscheinlichkeit für Frostschäden bestimmter Stärke für jeweils 30-jährige Zeiträume für heutige (Beobachtung, C20) und für künftige Klimaverhältnisse im Mittel über fünf regionale Klimamodelle. Hierbei zeigt sich, dass für heutige klimatische Bedingungen lediglich leichte Frostschäden mit bis 10 % Ertragsverlust in einer nennenswerten Anzahl und Häufigkeit (etwa 40 %) auftreten. Fröste, die zu stärkeren Schäden beim Apfel führen, das heißt zu Mindererträgen zwischen 10 % und 50 % oder sogar zwischen 50 % und 100 %, sind relativ selten und treten im Durchschnitt nur etwa alle 14 Jahre auf. An diesen Verhältnissen wird sich vermutlich auch zum Ende dieses Jahrhunderts in den Obstbaugebieten Hessens nichts ändern. Dieses Ergebnis dürfte zunächst für die Obstbauern erfreulich sein, ist jedoch auch für andere Obstarten und Anbauregionen zu prüfen.

	Frostschaden > 0 % - 10 %	Frostschaden > 10 % - 50 %	Frostschaden > 50 % - 100 %
Beobachtung (1971-2000)	44,1 (11,1)	7,6 (4,7)	7,0 (7,0)
Modellmittel C20 (1971-2000)	38,4 (6,8)	3,8 (1,8)	2,7 (4,4)
Modellmittel A1B (2071-2100)	30,1 (10,9)	3,6 (3,3)	2,9 (3,0)
Differenz	-8,4 (12,4)	-0,1 (3,7)	0,1 (5,0)
p-Wert	17,34	93,33	95,62
Signifikanz	n.s.	n.s.	n.s.

Tab. 4-3: Wahrscheinlichkeiten für leichte, mittlere und starke Frostschäden beim frühreifenden Apfel in den Obstbauregionen Hessens, im Zeitraum 10 Tage vor Blühbeginn bis 31. Juli. 30-jährige Mittelwerte mit einseitigem 95%-Konfidenzintervall in Klammern (in %) für 1971-2000 und 2071-2100 sowie Differenz beider Werte (in %) und p-Wert (in %) zur H0: „Differenz gleich null“ und H1: „Differenz ungleich null“, n.s.: nicht signifikante Änderung.

### 2.3 Schädlinge und Krankheiten im Obstbau

Das Auftreten von Pflanzenschädlingen und -krankheiten wird ebenfalls durch den Witterungsverlauf und das Klima beeinflusst. Schadinsekten sind poikilotherm (wechselwarm), wodurch ihre Entwicklung maßgeblich durch die Temperatur gesteuert wird. Ihr vermehrtes Erscheinen würde zu Ertragseinbußen führen, wenn keine adäquate Bekämpfung durchgeführt wird, die dem veränderten zeitlichen Auftreten und der Intensität der Schädlinge angepasst ist.

Ein gefürchteter Schädling im Apfelanbau ist der Apfelwickler (*Cydia pomonella*), dessen Maden sich in die Äpfel einbohren und damit die Früchte für Tafelobst unbrauchbar machen. Seine Entwicklung ist primär temperaturabhängig, wodurch sich mit steigender Temperatur der Befallsdruck erhöhen kann. Beobachtungen des Apfelwicklers im nördlichsten Obstanbaugebiet Deutschlands, der Niederelbe, deuten auf das Auftreten einer partiellen zweiten Generation dieses Schädlings in wärmeren Jahren wie 2006, 2008 und 2010 hin (WEBER und GÖRGENS 2009). Demzufolge ist es auch bei uns vorstellbar, dass sich künftig im Jahresverlauf eine komplette zweite beziehungsweise sogar dritte Generation dieses Schädlings ausbilden kann, wie es in Südfrankreich oder in den warmen Gebieten der USA heute schon der Fall ist.

Die Bekämpfung des Apfelwicklers gehört bereits heute zur obstbaulichen Praxis, denn die Mindereinnahmen bei einem Fruchtbefall durch die Made des Apfelwicklers belaufen sich immerhin auf 2/3 gegenüber nicht geschädigtem Tafelobst. Eine Nichtbekämpfung dieses Schädlings würde zudem im Folgejahr den Schaden erhöhen, so dass auch bei geringem Befall Pflanzenschutzmaßnahmen sinnvoll sind. Erste Abschätzungen mit dem Apfelwickler-Modell (RIMpro-Cydia, WEBER und GÖRGENS 2009) haben gezeigt, dass sich in allen Obstbauregionen Deutschlands die Bedingungen für diesen Schädling verbessern, so dass künftig mit mehr als einer Generation im Jahr gerechnet werden muss (CHMIELEWSKI et al. 2009b). Gegenstand der Forschung ist gegenwärtig die weitere Verbesserung und Validierung des Modells.

Wichtige Pflanzenkrankheiten beim Apfel sind bakterielle Erkrankungen wie Feuerbrand oder Pilzkrankungen wie Apfelschorf, Mehltau und Fruchtfäule. Es ist äußerst schwierig, die Auswirkungen des Klimawandels auf die komplexen Beziehungen zwischen Krankheitserregern (Pathogene wie Bakterien, Viren, Pilze),

Überträgern (Insekten) und der Pflanze selbst abzuschätzen (SCHERM 2004). Die Ausbreitung von Pflanzenkrankheiten wird häufig durch feucht-warme Witterungsschnitte begünstigt. Der Pilz *Diplodia seriata*, Verursacher der Schwarzen Sommerfäule an Äpfeln, ist ein neuer Pathogen an der Niederelbe, der vermutlich vermehrt in Jahren mit hohen Temperaturen und häufigen Regenschauern während der Vegetationszeit auftritt (WEBER 2009). In Frankreich, Nordamerika und Südafrika ist dieser Pilz schon seit längerem als Fruchtfäule-Erreger bekannt, der ungewöhnlich hohe Temperaturen für die Blatt- und Fruchtfäule benötigt (GESCHE und WEBER 2008). LADÁNYI et al. (2010) stellten fest, dass Niederschlag während der Kirschblüte die Ausbreitung von bakteriellen und pilzlichen Krankheiten allgemein fördert. Ein künftig erhöhter Befallsdruck wird ebenfalls einen umfassenden und zeitlich angepassten Pflanzenschutz erforderlich machen.

### 2.4 Klimawandel und Obstertrag

Obwohl man seit vielen Jahrzehnten versucht, den Witterungseinfluss auf den Obstertrag zu untersuchen, beispielsweise auf Äpfel in verschiedenen Regionen Deutschlands (unter anderen ZIELKE 1929, HOLTHUSEN 2010), existiert bis heute kein komplexes Ertragsmodell für Baumobstkulturen. Dies liegt unter anderem daran, dass die Ertragsbildung beim Obst von einer Vielzahl von Faktoren abhängt, die zum Teil nichtklimatischen Ursprungs sind. Zu diesen Parametern zählt beispielsweise die Sorten- und Unterlagenwahl, der Pflanzabstand, die Baumerziehung (Höhe und Form der Bäume) und nicht zuletzt das Alter der Bäume. Allein diese Faktoren machen eine meteorologische Ertragsanalyse, wie sie von landwirtschaftlichen Kulturen bekannt ist, äußerst schwer. Unter dem Eindruck des Klimawandels und der vergleichsweise deutlich langsameren Anpassungsmöglichkeiten bei mehrjährigen Kulturen erscheint es jedoch notwendig, die Wirkung klimatischer Parameter intensiver zu untersuchen (HOLTHUSEN und CHMIELEWSKI 2011).

Anstelle von mechanistischen Modellen werden daher vorerst für die Ertragsberechnung beim Obst Ertragsfunktionen („Yield-Functions“) verwendet. Nach HANDSCHACK (2000) hängt die Ertragsbildung beim

Apfel unter anderem vom Vorjahresertrag, der Alternanz, der zur Blüte gelangten Knospen, dem Fruchtansatz und dem Einzelfruchtgewicht ab.

Untersuchungen von HOLTHUSEN (2010) haben gezeigt, dass sich, nach einer gewissenhaften Aufbereitung der Ertragsdaten, ein Teil der jährlichen Varianz von Apfeltrügen an der Niederelbe durch Witterungsgrößen erklären lässt. ZAVALLONI et al. (2008) hatten im Rahmen des Pileus-Projekts ebenfalls eine Ertragsfunktion zur Schätzung von Sauerkirscherträgen entwickelt. Die jährliche Variabilität der Kirscherträge (Sorte „Montmorency“) konnte hierbei maßgeblich durch den Niederschlag in einem Zeitraum von 30 Tagen vor dem Beginn der ersten Herbstfröste im Vorjahr, die prozentuale Anzahl der fruchtbaren Blüten, ebenfalls unter Berücksichtigung von Blütenschäden durch Spätfrost im Folgejahr und der Anzahl feuchter Tage während der Bestäubung beschrieben werden ( $R^2=0,68$  für die interne Modellvalidierung).

Zur Untersuchung von möglichen Veränderungen des Apfeltrages im Projekt KliO wurde ein Wasserhaushalts- und Ertragsmodell für landwirtschaftliche Nutzpflanzen (SIMWASER, STENITZER 1988) modifiziert, um auch Rechnungen für Dauerkulturen durchführen zu können. Hierzu wurde in das Modell ein Vollertragsapfelbaum (Sorte „Elstar“ beziehungsweise „Jonagold“) mit konstantem Alter (unveränderte jährliche Startwerte für die Pflanzenparameter im Modell) implementiert. Mit diesem einfachen Ansatz war es möglich, erste klimabedingte Veränderungen des Apfeltrages auf der Grundlage von Änderungen in der Frischmasse abzuschätzen. Weitere ertragsbeeinflussende Parameter konnten noch nicht implementiert werden. Ebenso war es bisher nicht möglich, den  $CO_2$ -Düngeneffekt in dem Modell zu berücksichtigen, der gerade bei Obstbäumen, die keinem Wasser- und Nährstoffmangel unterliegen, relevant sein kann (JANSSENS et al. 2000), wenngleich es nur wenige Untersuchungen hierzu gibt (AINWORTH und LONG 2005).

Die mit SIMWASER durchgeführten Modellrechnungen ergaben bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) einen leichten Rückgang der Apfeltrüge in Deutschland, der insbesondere auf die signifikante Verkürzung der Reifephase um bis zu 20 Tage im Mittel (WETTREG 2006, Szenario A1B) zurückzuführen war (CHMIELWSKI et al. 2009b). Beobachtungen in der Neckarregion belegen die Tendenz zu einer Verkürzung der Reifephase, beispielsweise beim „Golden Delicious“, durch eine stärkere Verfrühung des Erntebeginns (-23 Tage, 1962-2007) gegenüber dem Blühbeginn (-11 Tage). Hierdurch ergeben sich einerseits neue Vermarktungsmöglichkeiten (RUESS 2009), andererseits könnte sich dies, bei einer weiteren Verkürzung der Reifephase, im Apfeltrug widerspiegeln. Um in diesem Punkt verlässliche Aussagen treffen zu können, ist die Entwicklung von Ertragsmodellen für Obstarten in Zukunft unerlässlich.

### 3 Fazit

Man kann mit Sicherheit davon ausgehen, dass Untersuchungen zu den Auswirkungen von Klimaschwankungen und Klimaänderungen auf Dauerkulturen und insbesondere auf Obstgehölze in den kommenden Jahrzehnten weiterhin Gegenstand vieler Studien auf nationaler und internationaler Ebene sein werden. Sowohl in der methodischen Herangehensweise, als auch in der Entwicklung verlässlicher Impaktmodelle ist noch viel Arbeit zu leisten. Die hier vorgestellten Methoden und Ansätze sind ein erster Versuch, sich dieser durchaus schwierigen Problematik zu nähern. Gegenwärtig liegt der größte Wert solcher Studien vor allem in der Entwicklung von geeigneten Methoden zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels im Obstbau. Die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle sind bereits eine gute Grundlage für solche Testrechnungen. Jedoch sind in den RCMs nicht alle Größen in gleicher Weise zuverlässig. Vor allem die Variabilität einzelner Modellvariablen, wie beispielsweise die Minimumtemperatur der Luft, die für die Beurteilung der Veränderung von Spätfrostschäden benötigt wird, ist von Modell zu Modell sehr unterschiedlich, was teilweise zu sehr differierenden Aussagen führt. Dies betrifft leider auch bereits die Verteilung der Modellvariablen im Kontrolllauf. Somit haben derzeit noch methodische Aspekte wie die Entwicklung und Validierung von Impaktmodellen den Vorrang gegenüber einer dezidierten Berechnung von Ertragsschäden auf der Grundlage von Klimaszenarien.

### Literatur

- AINSWORTH, E.A., LONG, S.P., 2005: What have we learned from 15 years of free-air  $CO_2$  enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising  $CO_2$ . *New Phytol.* **165**, 351-372.
- ANDERSEN, P.C., CROCKER, T.E., 2009: Low chill apple cultivars for North Florida and North central Florida. HS764, Univ. Florida, IFAS Extension, 10 p.
- BALDOCCHI, D., WONG, S., 2008: Accumulated winter chill is decreasing in the fruit growing regions of California. *Climate Change* **87**, 153-166.
- BASLER, D., KÖRNER, C., 2012: Photoperiodic sensitivity of bud burst in 14 temperate forest tree species. *Agricultural and Forest Meteorology* **165**, 73-81.
- BLANKE M., KUNZ, A., 2009: Einfluss rezenter Klimaveränderungen auf die Phänologie bei Kernobst am Standort Klein-Altendorf - anhand 50-jähriger Aufzeichnungen. *Erwerbs-Obstbau* **5**, DOI 10.1007/s10341-009-0086-3.
- BLÜMEL, K., CHMIELEWSKI, F.-M., 2012a: Shortcomings of classical phenological forcing models and a way to overcome them. *Agricultural and Forest Meteorology* **164**, 10-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrfor.2012.05.001>.
- BLÜMEL, K., CHMIELEWSKI, F.-M., 2012b: Klimawandel in Hessen – Chancen, Risiken und Kosten für

- den Obst- und Weinbau. Jahresbericht, *Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG)*, 218 S. [http://www.agrar.hu-berlin.de/agrarmet/forschung/fp/CHARIKO\\_html](http://www.agrar.hu-berlin.de/agrarmet/forschung/fp/CHARIKO_html), letzter Zugriff 2012.
- CAMPOY, J.A., RUIZ, D., ALLDERMAN, L., COOK, N., EGEE, J., 2012: The fulfilment of chilling requirements and the adaptation of apricot (*Prunus armeniaca* L.) in warm winter climates: An approach in Murcia (Spain) and the Western Cape (South Africa). *Europ. J. Agronomy* **37**, 43-55.
- CHMIELEWSKI, F.-M., BLÜMEL, K., HENNIGES, Y., BLANKE, M., WEBER, R.W.S., ZOTH, M., 2011: Phenological Models for the Beginning of Apple Blossom in Germany. *Meteorologische Zeitschrift* **20**, 5, 487-496.
- CHMIELEWSKI, F.-M., BLÜMEL, K., PÁLEŠOVÁ, I., 2012: Climate change and possible shifts of dormancy release for deciduous fruit crops in Germany. *Climate Research* **54**, 209-219, <http://dx.doi.org/10.3354/cr01115>.
- CHMIELEWSKI, F.-M., BLÜMEL, K., HENNIGES, Y., MÜLLER A., 2009a: Klimawandel und Obstbau in Deutschland. Endbericht des BMBF-Verbundprojekts KliO. Eigenverlag, *Humboldt-Universität zu Berlin*, 237 S., [http://www.agrar.hu-berlin.de/agrarmet/forschung/fp/KliO\\_html](http://www.agrar.hu-berlin.de/agrarmet/forschung/fp/KliO_html), letzter Zugriff 2012.
- CHMIELEWSKI, F.-M., BLÜMEL, K., HENNIGES, Y., MÜLLER, A., WEBER, R.W.S., 2009b: Climate Change: Chances, Risks, and Costs for the German Fruit Growing Sector (in German). In: Mahammadzadeh, M., H. Biebeler, H. Bardt, (Eds.): *Climate Protection and Adaptation to Climate Impacts – Strategies, Measurements, Examples. Institute of German Economy Cologne, Media GmbH*, 279-286.
- CHMIELEWSKI, F.-M., MÜLLER, A., BRUNS, E., 2004: Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, **121**, 69-78.
- COUVILLON G.A., 1995: Temperature and Stress Effects on rest in Fruit Trees: A Review. *Acta Horticulture* **395**, 11-19.
- DARBYSHIRE R., WEBB, L., GOODWIN, I., BARLOWA, S., 2011: Winter chilling trends for deciduous fruit trees in Australia. *Agricultural and Forest Meteorology* **151**, 1074-1085
- ELLINGER, W., GÖRGENS, M., 2007: EU-Kernobstschätzung 2007. *Mitteilungen des OVR* **62**, 9, 320-327.
- EREZ, A., 2000: Bud dormancy; phenomenon, problems and solutions in the tropics and subtropics. In: Erez, A. (Ed.): *Temperate Fruit Crops in Warm Climates. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands*, 17-48.
- EREZ, A., FISHMAN, S., 1998: The dynamic model for chilling evaluation in peach buds. Proc. Fourth Intern Peach Symp., *Acta Hort.*, 507-510
- ESTRELLA N., SPARKS, T., MENZEL, A., 2007: Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. *Global Change Biology* **13**, 1737-1747.
- FISHMAN, S., EREZ, A., COUVILLON, G.A., 1987a: The temperature-dependence of dormancy breaking in plants - mathematical analysis of a 2-step model involving a cooperative transition. *J. Theor. Biol.* **124**, 473-483.
- FISHMAN, S., EREZ, A., COUVILLON, G.A., 1987b: The temperature-dependence of dormancy breaking in plants - computer simulation of processes studied under controlled temperatures. *J. Theor. Biol.* **126**, 309-321.
- GESCHE Q., WEBER, R.W.S., 2008: Aktuelles zur Infektionsbiologie von *Diplodia seriata* an Äpfeln im Niederelbegebiet. *Mitteilungen des OVR* **63**, 11, 373-308.
- GÖRGENS, M., 2007: Baumobsterhebung 2007 II. Ergebnisse für das Niederelbegebiet. *Mitteilungen des OVR* **62**, 11, 411-414.
- HANDSCHACK, M., 2000: Sieben Komponenten der Ertragsbildung, Ertragsschwankungen und ihre Ursachen, Bekämpfung der Alternanz. In: FRIEDRICH, G., FISCHER, M. (Hrsg.): *Physiologische Grundlagen des Obstbaues*. 3. Aufl. Stuttgart (Hohenheim), *Ulmer*, 210-227.
- HENNIGES, Y., VOLLMER, I., WEBER, R.W.S., GÖRGENS, M., CHMIELEWSKI, F.-M., 2007: Der Klimawandel, eine Herausforderung für den norddeutschen Obstbau. In: *Mitteilungen des Obstbauversuchsrings des Alten Landes* **62**, Nr. 5, 156-160.
- HOLTHUSEN, H.H.F., 2010: Climate Change and Apple Yield - Influence of Weather and Climate on Yield Formation. Master Thesis, Humboldt-Universität zu Berlin, 162 S.
- HOLTHUSEN, H.H.F., CHMIELEWSKI, F.-M., 2011: Klimawandel und Apfeleertrag - Einfluss von Witterung und Klima auf die Ertragsbildung an der Niederelbe. *DGG-Proceedings* **1**, 3, 1-5, DOI: 10.5288/dgg-pr-01-03-hh-2011.
- JANSSENS, I.A., MOUSSEAU, M., CEULEMANS, M.R., 2000: Crop Ecosystem Response to Climatic Change, Tree Crops. In: Reddy, K.R., H.F. Hodges (Ed.): *Climate Change and Global Crop Productivity. CABI Publishing, New York, USA*, 245-270.
- LANG, G.A., EARLY, J.D., MARTIN, G.C., DARNELL, R.L., 1987: Endodormancy, paradormancy, and ecodormancy-physiological terminology and classification for dormancy research. *HortScience* **22**, 371-377.
- LADÁNYI, M., PERSELY, S.Z., SZABÓ, T., SZABÓ, Z., SOLTÉSZ, M., NYÉKI, J., 2010: Climatic indicator analysis of blooming time for sour cherries. *International Journal of Horticultural Science* **16**, 11-16.
- LEGAVE, J.M., GARCIA, M., MARCO, F., 1982: Some descriptive aspects of drops process of flower buds or young flowers on apricot in south of France. *Acta Horticulture* **121**, 75-83.
- LINSLEY-NOAKES, G.C., LOUW, M., ALLAN, P., 1995: Estimating daily Positive Utah Chill Units using daily minimum and maximum temperatures. *Journal of the South African Society of Horticultural Science* **5**, 19-23.
- LUEDELING, E., BLANKE, M., GEBAUER, J., 2009a: Auswirkungen des Klimawandels auf die Verfügbarkeit von Kältewirkungen (Chilling) für Obstgehölze in Deutschland. *Erwerbs-Obstbau* **51**, 81-94.
- LUEDELING, E., BROWN, P.H., 2011: A global analysis of the comparability of winter chill models for fruit and nut trees. *Int. J. Biometeorol.* **55**, 411-421.

- LUEDLING E., GEBAUER, J., BUERKERT, A., 2009b: Climate change effects on winter chill for tree crops with chilling requirements on the Arabian Peninsula. *Climate Change* **96**, 219-237.
- LUEDLING E., ZHANG, M., GIRVETZ, E.H., 2009c: Climatic changes lead to declining winter chill for fruit and nut trees in California during 1950-2099. *PLoS ONE* **4**(7), e6166.
- MATZNELLER, P., BLÜMEL, K., CHMIELEWIKI, F.-M., 2012: Models for the beginning of sour cherry blossom. Submitted to *Int. J. Biometeorol.*
- RICHARDSON, E.A., SEELEY, S.D., WALKER, D.R., 1974: A model for estimating the completion of rest for "Redhaven" and "Elberta" peach trees. *HortScience* **1**, 331-332.
- RIEGER, M., 2006: Introduction to fruit crops. *Haworth Press*, New York, 462 p.
- RUESS, F., 2009: Austrieb, Blüte und Erntebedingungen von „Golden Delicious“. Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Phänologie in der mittleren Neckarregion. *Obstbau* **2**, 76-78.
- SCHERM, H., 2004: Climate change, can we predict the impacts on plant pathology and pest management? *Can. J. Plant Pathol.* **26**, 267-273.
- SCHWARTZ M.D., HANES, J.M., 2010: Continental-scale phenology: warming and chilling. *Int. J. Climatol.* **30**, 1598-1959.
- SEGUIN, B., N. BRISSON, J. M. LEGAVE, DE I.G. COR-TAZAR, 2005: Adaptation of horticulture and viticulture to climate change in France. In: *NFJ Report* **1**, 3, p. 23.
- STATISTISCHES JAHRBUCH 2010: Statistisches Jahrbuch 2010 für die Bundesrepublik Deutschland. *Statistisches Bundesamt*, Wiesbaden, 745 S.
- STENITZER, E., 1988: SIMWASER – Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes, *Mitteilungen aus der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt*, Petzenkirchen, Nummer **31**.
- STÖCKLE, C.O., NELSON, R.L., HIGGINS, S., BRUNNER, J., GROVE, G., BOYDSTON, R., WHITING, M., KRUGER, C., 2010: Assessment of climate change impact on Eastern Washington agriculture. *Climatic Change* **102**, 77-102.
- WEINBERGER, J.H., 1950: Chilling requirements of peach varieties. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.* **56**, 122-128.
- WINKLER, J.A., ANDRESEN, J.A., GUENTCHEV, G., KRIEGEL, R.D., 2002: Possible impacts of projected climate change on specialized agriculture in the Great Lakes Region. *Journal of Great Lakes Research* **28**, 608-625.
- WINKLER, J.A., THORNSBURY, S., ARTAVIO, M., CHMIELEWSKI, F.-M., KIR-SCHKE, D., LEE, S., LISZEWSKA, M., LOVERIDGE, S., TAN, P.-N., ZHONG, S., ANDRESEN, J.A., BLACK, J.R., KURLUS, R., NIZALOV, D., OLYNK, N., USTRNUL, Z., ZAVALLONI, C., BISANZ, J.M., BUJDOSÓ, G., FUSINA, L., HENNIGES, Y., HILSENDEGEN, P., LAR, K., MALARZEWSKI, L., MOELLER, T., MURMYLO, R., NIEDZWIEDZ, T., NIZALOVA, O., PRAWIRANATA, H., ROTHWELL, N., VAN RAVENSWAY, J., VON WITZKE, H., WOODS, M., 2010: Multi-regional climate change assessments for international market systems with longterm investments: A conceptual framework. *Climatic Change* **103**, 445-470.
- WEBER, R.W.S., 2009: Possible impacts of climate change on harmful fungi in orchards. The examples of fruit rot pathogens on apples (in German). *Erwerbs-Obstbau* **51**, 115-120.
- WEBER, R.W.S., Görgens, M., 2009: Klimawandel und Obstbau in Deutschland. *Endbericht des BMBF-Verbundprojekts KliO*, Jork, 52 S.
- ZAVALLONI, ANDRESEN, C.J.A., WINKLER, J.A., FLORE, J.A., BLACK, J.R., BEEDY, T.L., 2006: The Pileus Project: Climatic impacts on sour cherry production in the Great Lakes Region in past and projected future time frames. *Acta Horticulturae (ISHS)* **707**, 101-108.
- ZAVALLONI, C., ANDRESEN, J.A., BLACK, J.R., WINKLER, J.A., GUENTCHEV, G., PIROMSOPA, K., POLLYEA, A., BISANZ, J.M., 2008: A Preliminary Analysis of the Impacts of Past and Projected Future Climate on Sour Cherry Production in the Great Lakes Region of the USA, Proc. VIIIth IS on Modelling in Fruit Research. *Acta Hort.* **803**, 123-130.
- ZIELKE, W., 1929: Untersuchungen über den Einfluss der Witterung auf die Ernten einiger Obstgattungen und -sorten in Deutschland. In: *Gartenbauwissenschaft* **2**, 5/6, 459-589.

B. KÖSTNER, K.-O. WENKEL, CH. BERNHOFER

# 5 Neue modellbasierte Informationssysteme für Klimafolgeszenarien in der Landwirtschaft

New model-based information systems for climate impact scenarios in agriculture

## Zusammenfassung

Mit dem Klimawandel ist auch die Agrarmeteorologie herausgefordert, sich mit Klimafolgen und der Erstellung und Interpretation von Klimafolgeszenarien auseinanderzusetzen. Nachdem nun unterschiedliche regionale Klimaprojektionen vorliegen und immer mehr Einzelstudien über Klimawirkungen entstehen, ist mehr Standardisierung erforderlich, um eine bessere Vergleichbarkeit der Studien für weitere, gemeinsame Fortschritte zu erzielen. Das LandCaRe-DSS (Land, Climate and Resources Decision Support System) dient dafür als aktuelles Beispiel. Es wurde als flexibles, modellbasiertes Entscheidungshilfesystem entwickelt, um die Nutzung von Klimaprojektionen und ihre Verknüpfung mit Impactmodellen zu erleichtern und zu vereinheitlichen. Es unterstützt Multimodellsimulationen für regionale Klimafolgeszenarien und ermöglicht, die Wirkung verschiedener Anpassungsmaßnahmen der Landwirtschaft an den Klimawandel zu testen.

## Summary

With climate change also agrometeorology is challenged to deal with climate impact and the generation and interpretation of climate impact scenarios. Since multiple regional climate projections are available, and more and more single studies on climate impact are conducted, there is the need for more standardisation to aim at improved comparability of studies for further common progress. The LandCaRe DSS (Land, Climate and Resources Decision Support System) is used as a recent example. It was developed as a flexible, model-based decision support system to facilitate and unify the use of climate projections and their link with impact models. It supports multi-model simulations for regional climate impact scenarios and allows testing the impact of different adaptation measures of agriculture to climate change.

## 1 Einleitung

Mit dem Klimawandel steht die Agrarmeteorologie bzw. die Agrarklimatologie vor neuen Herausforderungen. Zu ihren Aufgaben gehören die statistische Bearbeitung von landwirtschaftlich relevanten, meteorologischen Phasen, die Entwicklung und Anwendung von klimatischen Indizes, die sich auf Reaktionen von Boden, Nutzpflanzen oder Schädlingen beziehen und die Untersuchung der Wechselwirkungen von Klima und Agrarökosystemen anhand von Austauschprozessen und Kenngrößen (siehe LÖPMEIER et al. 2013). Von der Agrarklimatologie werden insbesondere mittel- bis langfristige, strategische Entscheidungen in der Landwirtschaft unterstützt. Die neuen Herausforderungen bestehen nun darin, dass man sich dafür nicht länger nur auf die Erfahrung der Vergangenheit berufen kann, sondern auch zukünftige Veränderungen durch den Klimawandel in Form von Szenarien einbeziehen muss, um Handlungsoptionen zu prüfen.

Die bereits beobachteten Veränderungen des Klimas werden durch Klimaprojektionen fortgesetzt, die eine Spannweite von möglichen zukünftigen Veränderungen beschreiben. Für Deutschland stehen mittlerweile eine Reihe von regionalen Klimaprojektionen sowie Informationen über Klimaanpassung zur Verfügung ([climate-service-center.de](http://climate-service-center.de), [anpassung.net.de](http://anpassung.net.de), [dwd.de/klima](http://dwd.de/klima)), die auf Länderebene zum Teil weiter untersetzt werden (zum Beispiel Regionales Klimainformationssystem ReKIS, [rekis.org](http://rekis.org); Klimawandel in Regionen, [klimazug.de](http://klimazug.de)). Um Anpassungen an den Klimawandel planen zu können, müssen mögliche Auswirkungen auf der regionalen oder lokalen Ebene bekannt sein.

Grundsätzlich gibt es zwei Herangehensweisen, regionale Klimafolgen abzuschätzen:

1. Anwendung von Fachwissen und lokalem Erfahrungswissen für die qualitative Extrapolation von beobachteten Trends in die Zukunft,



Abb. 5-1: Abfolge von Szenarien und Modellen von der globalen zur lokalen Ebene.

2. Quantifizierung von Wirkungen durch modellbasierte Extrapolation von Prozessen.

Herangehensweisen vom Typ A zeichnen sich vor allem durch Realitätsnähe und Vertrauenswürdigkeit aus, haben aber den Nachteil, dass bisher nicht aufgetretene Rahmenbedingungen und Prozesse unberücksichtigt bleiben und Aussagen auf die nahe Zukunft beschränkt sind. Herangehensweisen vom Typ B ermöglichen eine umfassende Quantifizierung von einzelnen Prozessen unter verschiedenen denkbaren Rahmenbedingungen, auch weit in die Zukunft hinein. Die Modelle können jedoch nur bereits bekannte Prozesse simulieren und geben in der Regel eher mittlere als extreme Wirkungen wieder. Idealerweise sollte die Ableitung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel auf einer Kombination von beiden Herangehensweisen beruhen.

Herangehensweisen vom Typ B erfordern den Umgang mit Klimaprojektionen und quantifizierten Klimafolgeszenarien. Dafür müssen die Klimadaten mit Impaktmodellen verknüpft werden. Eine entsprechende Modellkette von der globalen zur lokalen Ebene zeigt Abb. 5-1 (vergleiche KÖSTNER und KUHNERT 2011), wobei es für jeden

Schritt – beginnend bei den Emissionsszenarien – mehrere, zunächst gleichwertige Alternativen gibt.

Modellbasierte Entscheidungshilfesysteme (decision support systems, DSS) können zur Analyse von Klimaprojektionen und Quantifizierung von Klimafolgeszenarien dienen. Solche Systeme wurden ursprünglich für die Wirtschaft entwickelt, um Manager bei strategischen Entscheidungen unter komplexen Sachverhalten zu unterstützen (STABELL 1987). Allgemein versteht man darunter interaktive, flexible, computerbasierte Informationssysteme zur verbesserten Entscheidungsfindung bei der Erfassung und Lösung komplexer, wenig strukturierter strategischer Managementprobleme (MATTHIES et al. 2007). Die Komponenten eines DSS bestehen aus Datenbanken für Modelle, Parameter und Variablen sowie Programmen für Schnittstellen und Simulationskontrolle. Für räumliche Analysen sind die Daten georeferenziert und typischerweise gitterbasiert. Die interaktive Nutzung in der Praxis wird durch Benutzeroberflächen und webbasierten Zugang erleichtert. Bisherige Informations- und Entscheidungshilfesysteme für die strategische Planung in der Landwirtschaft beziehen sich auf die Landnutzungsplanung (MATTHEWS et al. 1999)

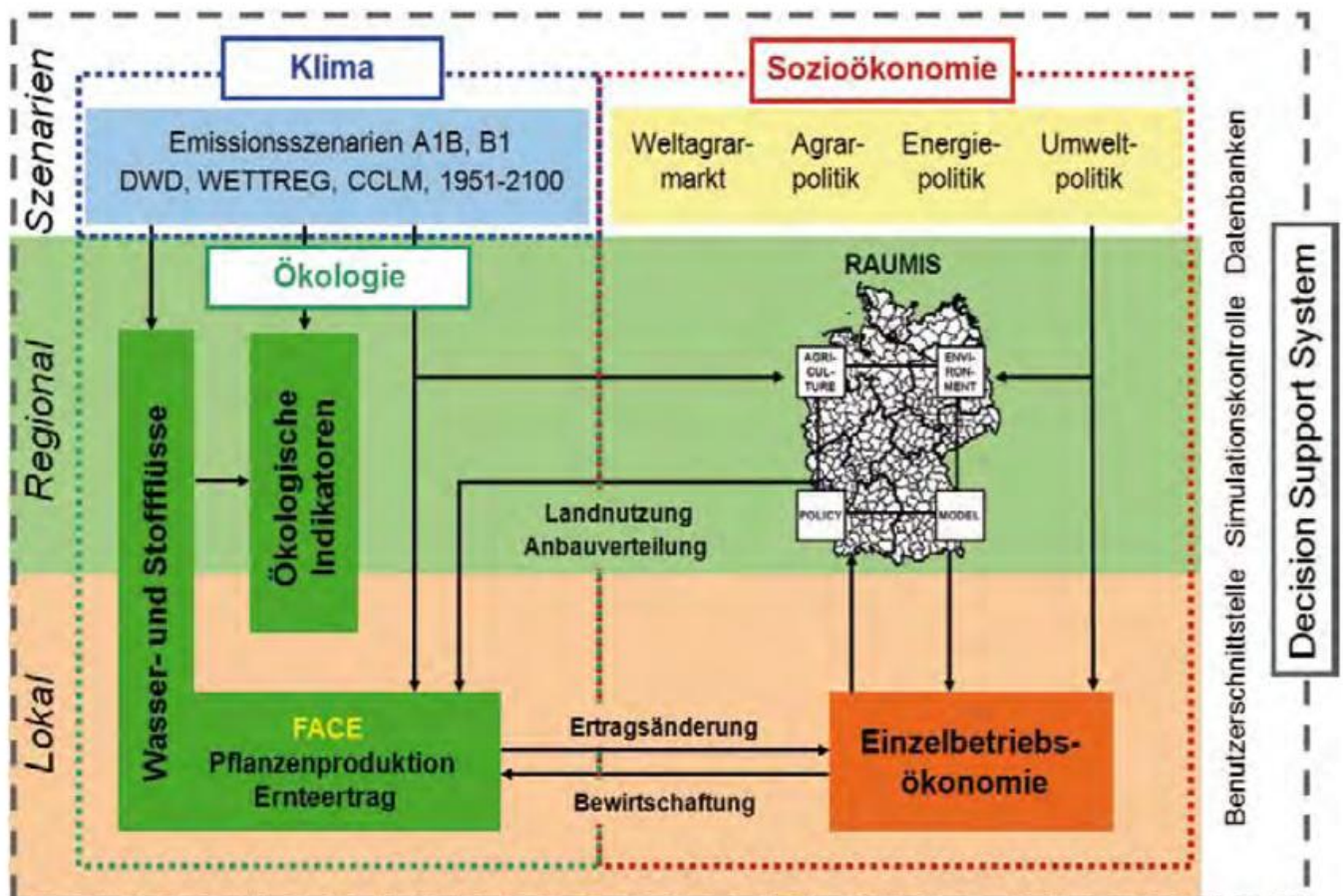


Abb. 5-2: Schematische Übersicht zur Konzeption des LandCaRe-DSS.

oder die Analyse des Einflusses von Politiken auf Betriebe und ländliche Regionen (BROUWER und van ITTERSUM 2010) ohne bereits den Klimawandel zu berücksichtigen.

Im Rahmen des transdisziplinären Forschungsprojektes „Land, Climate and Resources 2020“ (LandCaRe2020; KÖSTNER et al. 2009) wurde der Prototyp eines DSS für die Landwirtschaft im Klimawandel entwickelt. Das LandCaRe Decision Support System (LandCaRe-DSS; WENKEL et al. 2011a) entstand unter Beteiligung von Fachleuten aus der Meteorologie, Agrarwissenschaft und Ökologie mit Hilfe von Praxispartnern in Verwaltung und Betrieben. Es wurde zunächst auf zwei Modellregionen in Sachsen und Brandenburg angewandt und wird derzeit erweitert. Anhand des LandCaRe-DSS sollen im Folgenden exemplarisch die Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten eines solchen Werkzeugs vorgestellt werden.

## 2 Aufbau des LandCaRe-DSS

### 2.1 Gesamtkonzeption

Auf der Basis intensiver Kommunikation mit Praxispartnern entstand der konzeptionelle Rahmen für das DSS. Eine Strukturierung erfolgte nach den Modulen Klima, Ökologie und Sozioökonomie. Sie entsprechen Themen und Modellen in diesem Bereich, die mit Daten auf den räumlichen Ebenen lokal und regional sowie mit Szenarien der zeitlichen Phasen Vergangenheit und Zukunft verknüpft werden (Abb. 5-2). Aus Konsistenzgründen werden Simulationen zukünftiger Perioden nicht mit Beobachtungsdaten, sondern stets mit Kontrollläufen der regionalen Klimamodelle verglichen.

Das Ökologiemodul fasst klimabezogene Indizes einschließlich phänologischer Termine und wichtige Kennwerte von Ökosystemprozessen als ökologische Indikatoren zusammen. Die entsprechenden Modelle beziehen ihre „treibenden“ Variablen aus einer Klimadatenbank (Meteorologie, TU Dresden). Die Schnittstelle zur Sozioökonomie wird auf regionaler Ebene durch Szenarien über gegenwärtige und zukünftige Anbauverteilungen hergestellt. Diese beruhen auf landwirtschaftlichen Standortfaktoren sowie Annahmen über Förderpolitiken und Agrarpreisentwicklungen, wie zum Beispiel die prozentuale Zunahme von Mais als Energiepflanze oder von Weizen aufgrund höherer Erlöse. Die sozioökonomischen Szenarien wurden vom Informationssystem RAUMIS (Heinrich von Thünen-Institut, vTI, Braunschweig; HENRICHSMEYER et al. 1996) abgeleitet, das den Agrarsektor Deutschland abbildet. Die Umsetzung in standortgerechte Verteilungen der gebietstypischen Fruchtarten erfolgt durch ein eigens dafür konzipiertes Modell (WENKEL et al. 2011a). Auf lokaler Ebene ist die Schnittstelle zwischen Betriebsökonomie und Agrarmodellen einerseits durch die Übergabe von Managementanweisungen an die Produktionsmodelle realisiert, andererseits durch die Übergabe des simulierten Ernteertrags an die Betriebsökonomie, um zukünftige Erlöse von Betrieben einschätzen zu können. Die Möglichkeit, auch

ökonomische Klimafolgenzenarien für einzelne Betriebe rechnen zu können, wurde als Nutzeranforderung von Praxispartnern gewünscht. Solche Berechnungen sind jedoch nur in überschaubaren Zeitrahmen von Förderpolitiken und Preisentwicklungen sinnvoll. Die zugrunde gelegte „vTI-baseline“ (OFFERMANN et al. 2010) ist derzeit auf den Zeitraum 2009 bis 2019 ausgelegt. Vom Nutzer wählbar sind das Baseline-Szenario sowie eine dazu optimistische und pessimistische Variante. Ein wesentlicher Aspekt des LandCaRe-DSS besteht darin, dass verschiedene Anpassungsmaßnahmen auf Betriebsebene als Managementoptionen getestet werden können, wie zum Beispiel die Wahl von Fruchtart und Fruchtfolge, Art der Bodenbearbeitung, Düngungsregime und Beregnung.

### 2.2 Klimadatenbank

Die Klimadatenbank des LandCaRe-DSS besteht aus Beobachtungsdaten von Klimastationen und simulierten Daten von Klimaprojektionen. Die Beobachtungsdaten stammen überwiegend vom Deutschen Wetterdienst. Sie wurden für das Gebiet der neuen Bundesländer auf Homogenität geprüft und sind ab 1951 verfügbar (FRANKE 2009). Alle Klimaprojektionen, die derzeit im DSS genutzt werden, sind vom Globalmodell ECHAM5/MPI-OM (Deutsches Klimarechenzentrum, MPI für Meteorologie, Hamburg) abgeleitet. Die regionalen Klimaprojektionen basieren auf den dynamischen regionalen Klimamodellen CLM (= COSMO-CLM beziehungsweise CCLM; ROCKEL et al. 2008) und REMO (JACOB und PODZUN 1997) im 18-beziehungsweise 10-km-Gitter und den stationsbezogenen, statistisch-dynamischen Modellen WETTREG beziehungsweise für Sachsen WEREX (ENKE et al. 2005). Für die Projektionen von CLM werden niederschlagskorrigierte Versionen (LINDAU und SIMMER 2012) und für REMO eine räumliche Driftkorrektur des Niederschlags verwendet (BERNHOFER et al. 2011). Für die Berücksichtigung von räumlichen Abweichungen kann bei den dynamischen Klimamodellen optional eine räumlich-gleitende Mittelung von jeweils neun Gitterpunkten erfolgen. Zur Vergleichbarkeit des Niederschlags aus statistisch-dynamischen und dynamischen Klimamodellen werden erstere nach RICHTER korrigiert (BERNHOFER et al. 2011). Alle Projektionen sind für den Zeitraum 1961-2100 und das Emissionsszenario A1B, CLM und WETTREG2006 auch für B1 verfügbar. Im Folgenden werden nur Ergebnisse für das Szenario A1B vorgestellt. Die Simulationen mit Impaktmodellen auf Basis stationsbezogener Klimaprojektionen können auch mit regionalisierten Daten im 1-km-Gitter erfolgen (FRANKE et al. 2008). Das LandCaRe-DSS wurde bewusst als offenes System konzipiert. Seit Beginn des Projektes sind neue Klimaprojektionen und Auswertefunktionen in die Datenbank integriert worden.

### 2.3 Geodatenbank

Gitterbasierte Daten der Landoberfläche beziehen sich auf Topographie, Boden und Bodennutzungstypen. Die höchste räumliche Auflösung von simulierten Ergebnis-

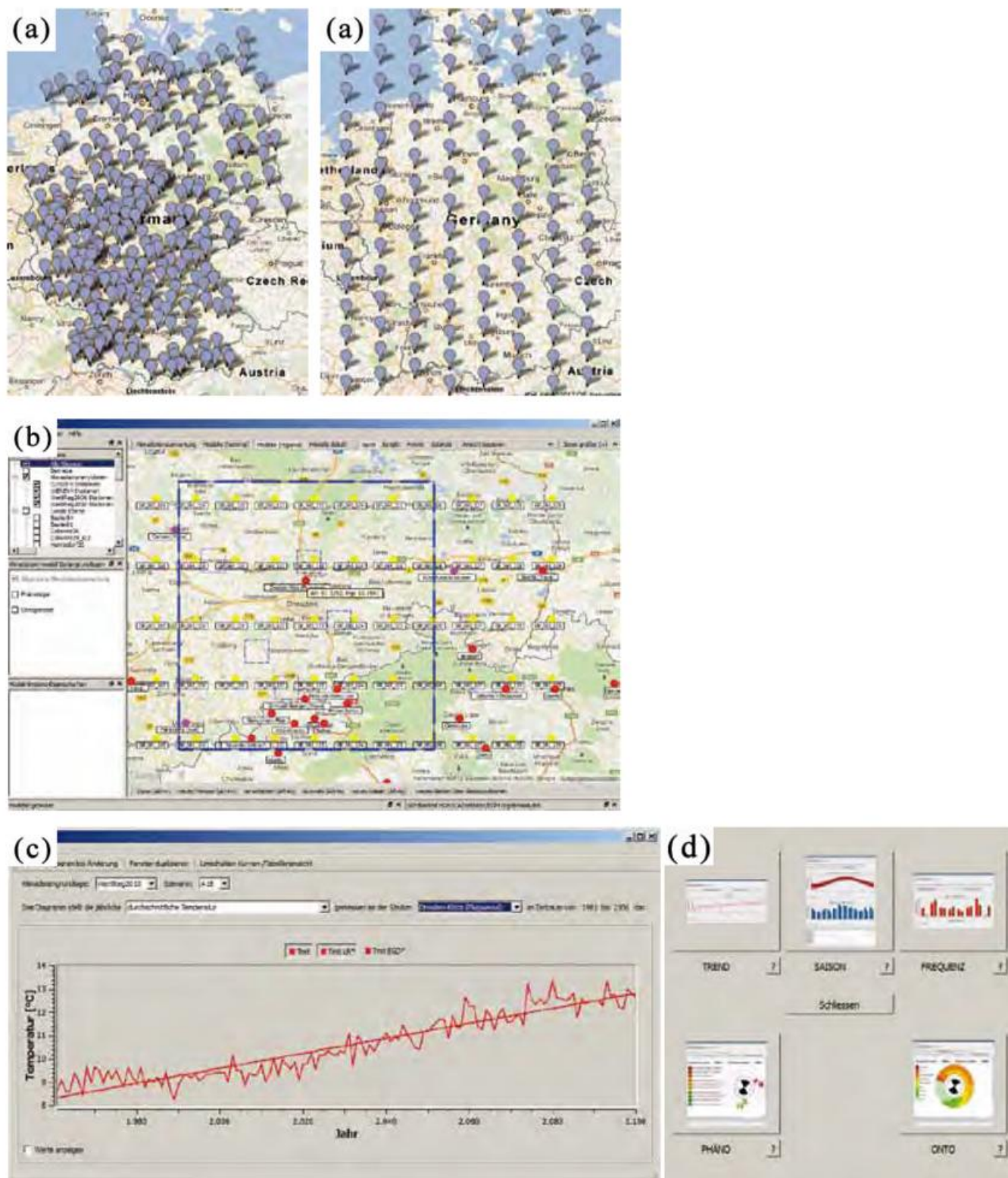


Abb. 5-3: Ansicht der Benutzeroberfläche zur Auswahl von Klimastationen und Gitterpunkten in der Webversion (a) und zur Auswertung von dynamischen und statistisch-dynamischen Projektionen in der Expertenversion für die Modellregion Dresden (b). Beispiel für die statistische Auswertung von Klimagrößen (c) und Ansicht der Modellauswahl zur Klimaanalyse (d).

sen beträgt 100x100 m<sup>2</sup> und richtet sich vor allem nach den von den Agrarmodellen benötigten Bodenkarten. Soweit verfügbar werden möglichst einheitliche Bodeninformationen verwendet. Die Anpassung von Bodenkarten, Agrarmodellen und ihre Validierung sind ein wesentlicher Bestandteil der Erweiterung von Modellgebieten. Zur räumlichen Orientierung auf der Benutzeroberfläche

werden „Google-Karten“ (Google Earth™ Map Service) genutzt (Abb. 5-3).

### 2.4 Modelldatenbank

Die im DSS verwendeten Modelle reichen von relativ einfachen Algorithmen zur statistischen Auswertung von Klima-

daten und Berechnung von Indizes bis zur Simulation von komplexen Prozessen. Die Modellplattform erlaubt Berechnungen von jährlichen und monatlichen Klimastatistiken, klimatischen Indizes, phänologischen Phasen von Pflanzen sowie Simulationen zu Wasserhaushalt, Bodenerosion, Biomasseproduktion, Ernteertrag und Zusatzwasserbedarf einschließlich ökonomischer Kennwerte auf Betriebsebene (WENKEL et al. 2011a). Die zeitliche Auflösung der Simulationen beträgt in der Regel einen Tag. Die Ergebnisse werden standardgemäß als Mittelwert beziehungsweise Median mit Schwankungsbreiten und Extremwerten über 30-jährige Zeitperioden ausgegeben, um Fehlinterpretationen über kürzere Zeiträume zu vermeiden.

## 2.5 Modellregionen

Das LandCaRe-DSS wurde exemplarisch anhand von zwei Modellregionen entwickelt, die sich hinsichtlich klimatischer und weiterer Standortfaktoren deutlich unterscheiden. Die Regionen beziehen sich auf das Einzugsgebiet der Uecker mit der Uckermark in Brandenburg (2600 km<sup>2</sup>) und das Einzugsgebiet der Weißeritz in Sachsen einschließlich

der nördlich gelegenen Lößstandorte in der Lommatzcher Pflege (400 km<sup>2</sup>). Das Ueckergebiet gehört dem Nordostdeutschen Tiefland an (0-169 m NN) und ist von kontinentalem Klima geprägt mit einer Jahresmitteltemperatur von 8,6 °C und mittleren Jahresniederschlägen von 505 mm (Station Angermünde). Das Weißeritzgebiet liegt im östlichen Erzgebirge (102-904 m NN). Die Jahresmitteltemperaturen (1971-2000) liegen zwischen 9°C (Dresden-Klotzsche) und 4,5°C (Zinnwald), die Jahresniederschläge zwischen 747 und 1067 mm. Inzwischen wurde das Gebiet in Sachsen auf die knapp 5000 km<sup>2</sup> große Modellregion Dresden (BERNHOFER et al. 2009) und Ostsachsen erweitert.

## 3 Funktionsweise des LandCaRe-DSS

Das LandCaRe-DSS kann als Informations- und Entscheidungshilfesystem auf verschiedenen Ebenen der Wissensvermittlung genutzt werden:

- Eine allgemein zugängliche Webversion ermöglicht, das DSS anhand der Modellregionen des Projektes LandCaRe2020 kennen zu lernen und stellt deutsch-

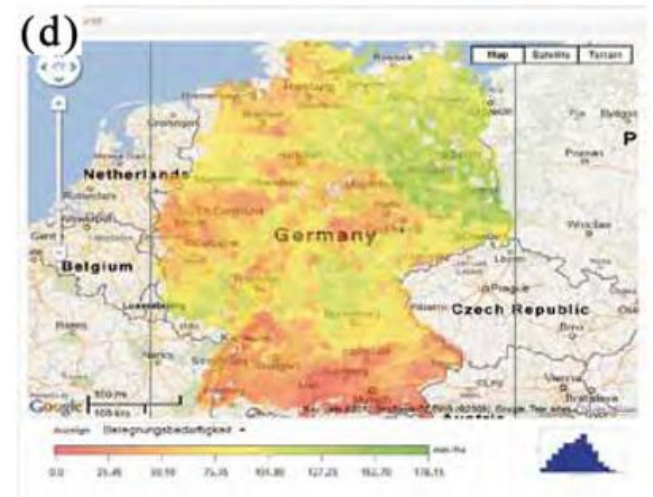
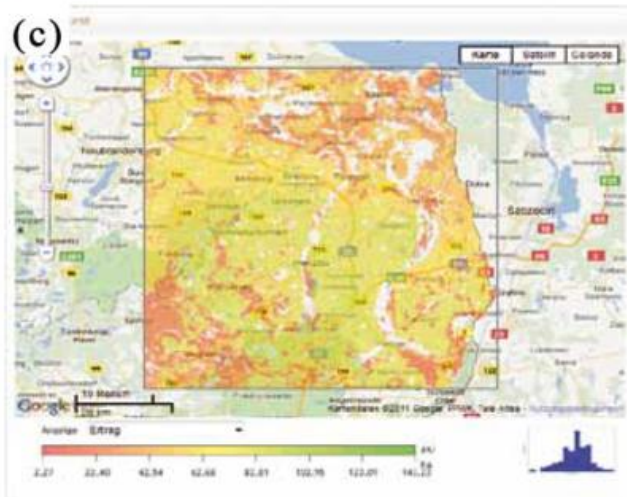
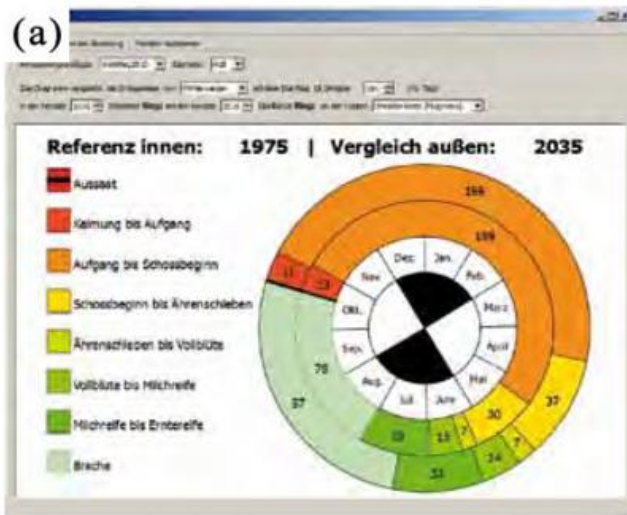


Abb. 5-4: Beispiele für Bildschirmansichten der verschiedenen räumlichen Ebenen des DSS: Analyse der Entwicklungsphasen von Fruchtarten mit punktuellen Daten von Klimastationen oder Gitterpunkten (a), lokale Analyse von Ackerschlägen, hier mit Ansicht der unterlegten Bodenkarte (1 Gitter = 100x10=m<sup>2</sup>) (b), regionale Ertragssimulation im Modell Uckermark (c), Auswahl von deutschlandweiten Agrarkarten, Beispiel Beregnungsbedürftigkeit (d).

landweit Analysemöglichkeiten zu Klimaprojektionen und Klimaindizes sowie Agrarthemenkarten zur Verfügung.

- Über einen geschützten Zugang können Nutzergruppen für neu hinzugekommene Regionen oder Projekte spezielle Anwendungen durchführen, mehr Parameter ändern und Ergebnisse verwalten.
- Der ursprüngliche Prototyp (BERG et al. 2009) wird zur Zeit als Desktopversion (Expertenversion) weiterentwickelt. Diese lokal installierbare Version wird für Forschung und Entwicklung eingesetzt, ist vom zentralen DSS-Server (LivingLogic AG, Bayreuth) entkoppelt und nur mit den Servern von Klimadatenbank (Meteorologie, TU Dresden) und Google™ verknüpft.

Hinsichtlich der räumlichen Ebenen werden Klimaanalysen für Stations- beziehungsweise Gitterpunkte, regionale bzw. lokale Modellsimulationen und deutschlandweite Karten unterschieden (Abb. 5-4). Die Klimaanalyse umfasst Trendberechnungen für Klimatelemente, Ereignistage und Indizes wie zum Beispiel die thermische Vegetationsperiode, Klimatische Wasserbilanz oder den Rebsortenindex. Weiter ist es möglich, Klimatelemente hinsichtlich Saisonalität und Monatsmittelwerten sowie Frequenz und Schwellenwerten zu untersuchen. Ebenfalls integriert wurden Untersuchungen zur Änderung phänologischer Phasen typischer Zeigerpflanzen und der Entwicklungsstadien landwirtschaftlicher Fruchtarten.

Die regionale Ebene bietet die Möglichkeit, die verschiedenen Impaktmodelle zu ökologischen und landwirtschaftlichen Kenngrößen auf ausgewählte Gebiete anzuwenden. Es können Risiken hinsichtlich Bodenerosion, Wasserhaushalt, Biomasseproduktion, Ernteertrag und Beregnungsbedarf untersucht werden. Da diese Modelle bestimmte Landnutzungs- und Bodeninformationen voraussetzen und für die jeweilige Region zu validieren sind, kann die regionale Ebene nur schrittweise erweitert werden.

Die lokale beziehungsweise Betriebsebene wird derzeit im Rahmen des KLIMZUG-Forschungsprojektes REGKLAM (Regionales Klimaanpassungsprogramm Modellregion Dresden) in Zusammenarbeit mit dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) angewandt. Ein weiterer Fokus liegt in bereits heute sehr trockenen Gebieten Nordostsachsens. Durch die Zusammenarbeit von universitärer Forschung, angewandter Forschung des LfULG sowie landwirtschaftlichen Arbeitskreisen und Betrieben sollen das DSS und die Kenntnisse über regionale Klimafolgen und Anpassung weiter verbessert werden.

#### 4 Ergebnisse für Modellgebiete in Brandenburg und Sachsen

Im Folgenden werden beispielhaft Ergebnisse von Simulationen mit dem LandCaRe-DSS aus den Modellregionen

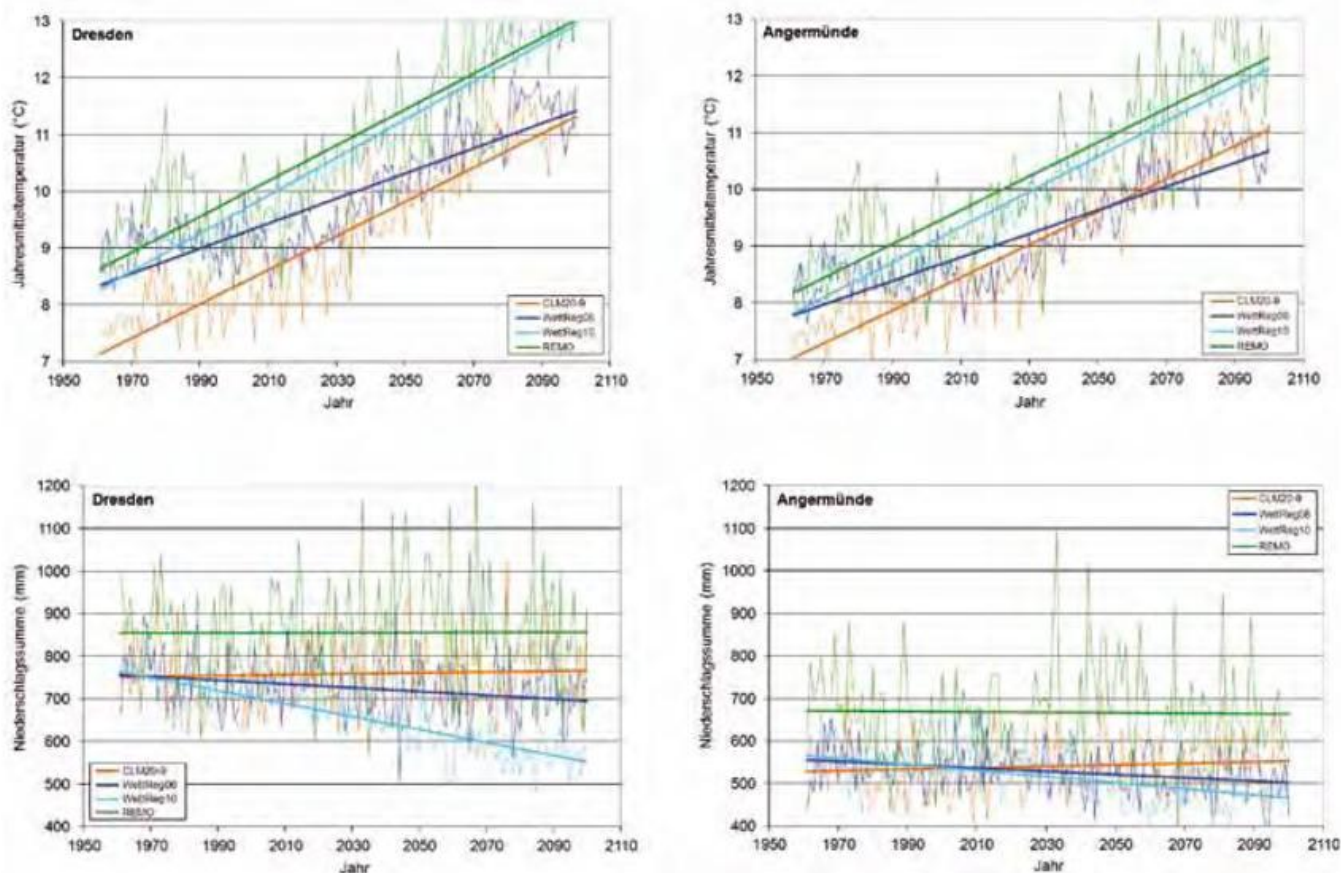


Abb. 5-5: Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlagssumme mit linearen Trends für Dresden und Angermünde der Klimaprojektionen WETTREG2006, WETTREG2010 (jeweils Mittelwert aus 3 Realisierungen), CLM (CLM20-9, Mittelwert aus 9 Gitterpunkten und 2 Realisierungen) und REMO-1 (1. Realisierung).

Änderung des Eintrittstermins	Vorfrühling	Erstfrühling	Vollfrühling	Frühsommer	Hochsommer	Spätsommer	Frühherbst	Vollherbst	Spätherbst
(d)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
<b>Angermünde</b>									
WettReg2006	-7	-1	1	-1	-2	-3	-5	-1	0
WettReg2010	-14	-10	-8	-8	-7	-10	-14	-5	0
CLM20-9	-13	-6	-5	-5	-4	-7	-12	-3	2
REMO-1	-13	-4	-4	-3	-2	-5	-7	-3	2
<b>Dresden</b>									
WettReg2006	-3	-1	3	-2	-1	-2	-4	-1	1
WettReg2010	-9	-10	-5	-7	-6	-8	-12	-4	0
CLM20-9	-8	-5	-3	-5	-3	-5	-10	-10	1
REMO-1	-8	-5	1	-3	-1	-2	-7	-7	1

Tab. 5-1: Änderung von Eintrittsterminen (in Tagen) der Jahreszeiten indiziert durch (1) Blüte des Schneeglöckchens, (2) Blattentfaltung der Stachelbeere, (3) Apfelblüte, (4) Blüte des Schwarzen Holunders, (5) Blüte der Sommerlinde, (6) Fruchtreife des Frühlapfels, (7) Fruchtreife des Schwarzen Holunders, (8) Fruchtreife der Stieleiche, (9) Blattverfärbung der Stieleiche beim Vergleich 30-jähriger Mittelwerte der Periode 2021-2050 mit 1961-1990 für Klimaprojektionen von vier regionalen Klimamodellen an den Stationen beziehungsweise Gitterpunkten Angermünde und Dresden. Die regionale Anpassung der Phänologiemodelle erfolgte durch Henniges und Chmielewski (unpubliziert).

nen vorgestellt. Sie beziehen sich auf die Modellgebiete Uckermark/Brandenburg und Weißeritzkreis/Sachsen und sowie auf Agrarstrukturgebiete in der Modellregion Dresden.

#### 4.1 Klimaanalysen

Analysen an Klimastationen und Gitterpunkten eignen sich, um zunächst die für eine Region verfügbaren Klimaprojektionen und ihre wesentlichen Unterschiede kennen zu lernen. In Abb. 5-5 sind Trendanalysen für die Stationen Dresden-Klotzsche und Angermünde (Uckermark) sowie von in der Nähe liegenden Gitterpunkten gegenübergestellt.

Auffallend ist die deutlich steilere Zunahme der mittleren Temperaturen bei WETTREG2010 im Vergleich zu WETTREG2006, die zum Ende des Jahrhunderts auf der Höhe der Temperaturen von REMO liegen. Diese Veränderung ist auf die Einführung einer dem Klimawandel angepassten Wetterlagen-Klassifikation zurückzuführen (KREIENKAMP et al. 2010). Für die Niederschläge ist typisch, dass die dynamischen Modelle kaum eine Tendenz zeigen, während die mittleren Niederschläge der statistisch-dynamischen Modelle, dem Trend der Beobachtungen folgend, abnehmen. Aus Abb. 5-5 ist ersichtlich, dass die Driftkorrektur der REMO-Projektion nicht ausreicht, um das Niederschlagsniveau der anderen Projektionen zu erreichen. Da Impaktmodelle an Beobachtungsdaten des Niederschlags angepasst sind und Pflanzen auf Luftfeuchte und Schwellenwerte der Bodenfeuchte reagieren, sind absolute Niederschlagswerte von großer Bedeutung, um sinnvolle Simulationsergebnisse zu erzielen. Die Projektionen von REMO werden daher derzeit nicht für Agrarmodelle im LandCaRe-DSS genutzt. Allgemein werden die Impaktmodelle jeweils mit mehreren gewählten Realisierungen durchgeführt. Einzelne Realisierungen, nicht biaskorrigierte Projektionen sowie individuelle Gitterpunkte stehen derzeit nur in der Expertenversion zur Verfügung.

#### 4.2 Phänologische Jahreszeiten und Entwicklungsphasen landwirtschaftlicher Fruchtarten

Für die Landnutzung sind Verschiebungen der Jahreszeiten und der phänologischen Phasen von Fruchtarten von großer Bedeutung (vergleiche CHMIELEWSKI und BLÜMEL 2013). Aus Tab. 5-1 wird ersichtlich, dass Verfrühungen vor allem für das Frühjahr, aber auch für den Frühherbst gelten. Hinsichtlich der Wirkungsrichtung verschiedener Klimaprojektionen auf die Eintrittstermine ergeben sich keine prinzipiellen Unterschiede zwischen den Methoden der Klimaprojektionen. Stärkste Verschiebungen sind bei der Projektion WETTREG2010 zu verzeichnen, gefolgt von CLM, REMO und WETTREG2006. Die Abweichung zwischen einzelnen Jahren liegt in der Größenordnung der Änderung über 30 Jahre. Hinsichtlich räumlicher Unterschiede fällt vor allem der zeitigere Vorfrühling in Angermünde im Vergleich zu Dresden auf. Insgesamt ergeben sich für die Länge der phänologischen Vegetationsperiode (hier berechnet aus der Differenz der Eintrittstermine von Blattentfaltung und Blattverfärbung von Stieleiche) nur geringe Änderungen in Dresden/Angermünde von -1/-1 bis +3/+4 Tagen (2021-2050 minus 1961-1990) beim Vergleich der verschiedenen Klimamodelle. Dagegen betragen unter den gleichen Bedingungen die Verlängerungen der thermischen Vegetationsperiode zwischen +12/+6 und +33/+31 Tagen. Für die Planung von Anpassungen sollten in Anbetracht der großen Spannweite der Modellergebnisse immer auch die aktuellen Trends von Beobachtungsdaten herangezogen werden.

Auch bei den landwirtschaftlichen Fruchtarten treten bei allen Klimaprojektionen Verfrühungen beim Vergleich der Klimanormalperiode 2021-2050 mit 1961-1990 auf (Tab. 5-2). Diese sind, mit Ausnahme der Projektion WETTREG2006, am stärksten für die Phase des Schossens im Frühjahr ausgeprägt mit maximal -22 und -28 Tagen für Klimadaten der Stationen Angermünde und Dresden unter der Projektion WETTREG2010. Beim Vergleich des Zeitraums 1961-1990 mit dem gegenwärtigen Zeitraum 1991-2020 beträgt unter der Projektion WETTREG2010 die

Änderung des Eintrittstermins	Aufgang	Schossen	Ähren-schieben	Vollblüte	Milchreife	Brache
(d)						
<b>Angermünde</b>						
WettReg2006	-1	-3	-3	-4	-4	-6
WettReg2010	-2	-22	-17	-17	-17	-19
CLM20-9	-4	-13	-11	-11	-11	-13
REMO-1	-3	-24	-16	-16	-16	-15
<b>Dresden</b>						
WettReg2006	-1	-4	-4	-4	-5	-6
WettReg2010	-3	-28	-20	-20	-20	-21
CLM20-9	-5	-13	-12	-12	-12	-15
REMO-1	-3	-18	-13	-14	-14	-13

Tabelle 5-2: Änderung des mittleren Eintrittstermins (in Tagen) von Entwicklungsstadien des Winterweizens (gleicher Saattermin) beim Vergleich der Periode 2021-2050 mit 1961-1990 an den Stationen beziehungsweise Gitterpunkten Angermünde und Dresden.

Verfrühung des Schossens im Mittel -6 Tage. Diese Veränderung liegt in der Größenordnung wie sie auch in der Realität bereits stattgefunden hat (LfULG, pers. Mitteilung). Da Pflanzen sich an veränderte Verhältnisse anpassen können, sollte die Güte der phänologischen Modelle immer wieder durch neue Beobachtungsdaten geprüft werden.

### 4.3. Landwirtschaftlicher Ertrag und Zusatzwasserbedarf

Eine zentrale Frage für die Landwirtschaft im Klimawandel betrifft die Ertragssicherheit (EITZINGER et al. 2009). Dies ist für die Ernährung und regionale Versorgung, sowie für Fragen von Ertragsversicherungen und Rücklagenbildung von Bedeutung (FUCHS et al. 2009). In das LandCaRe-DSS wurden daher zwei Ertragsmodelle für Ackerkulturen integriert. Das Ertragsmodell YIELDSTAT (MIRSCHERL et al. 2009) ist statistisch basiert, während das prozessbasierte Modell MONICA (NENDEL et al. 2011) neben der Pflanzenproduktion auch Wasser-, Stickstoff- und Kohlenstoffflüsse des Agrarökosystems simuliert. Statistisch-basierte Modelle haben den Vorteil, dass sie mit wenigen Klimagrößen wie etwa Temperatur, Niederschlag und Strahlung auskommen und geringere Rechenzeiten benötigen. Die Gültigkeit ihrer Annahmen muss anhand von langfristig erfassten Erträgen aufgezeigt und immer wieder geprüft werden. Für Sachsen wurde dies anhand von Ertragsstatistiken aus dem Zeitraum 1951-2006 ermöglicht (LfULG 2009, MIRSCHERL et al. 2009). Prozessbasierte Modelle benötigen mehr Parameter, sie erlauben jedoch eine bessere Analyse der Zusammenhänge von Klima, Bewirtschaftung, Ertrag und umweltrelevanten Größen.

In der Modellregion Dresden des Projekts REGKLAM werden Fokusregionen und landwirtschaftliche Modellbetriebe untersucht, die verschiedenen Agrarstrukturgebieten angehören. Trotz der sehr unterschiedlichen standörtlichen Voraussetzungen weisen alle Gebiete relative Zunahmen der mittleren Erträge einer regional typischen Anbauverteilung beim Vergleich der Periode 2021-2050 mit 1961-1990 auf (Abb. 5-6). Im Vergleich zu anderen Fruchtarten sind die Stei-

gerungen bei Winterweizen deutlicher ausgeprägt. Dies entspricht den Beobachtungen und mag daran liegen, dass in die Sortenzüchtung von Weizen mehr als in andere Getreidearten in den letzten Jahrzehnten investiert wurde (LfULG 2009). Dagegen ergeben sich für Silomais, der aufgrund seines C<sub>4</sub>-Photosynthesetypus nicht direkt

vom CO<sub>2</sub>-Düungeeffekt profitiert (siehe MANDERSCHIED und WEIGEL, 2013), stagnierende oder abnehmende mittlere Erträge.

Bei den einzelnen Agrarstrukturgebieten liegen die Ertragszuwächse im Erzgebirgsvorland und im fruchtbaren Löbhügelland höher als in der Sächsischen Schweiz und auf den sandigen Böden im Heidegebiet. Dagegen scheinen die relativ hohen mittleren Erträge von Winterweizen im Löbhügelland (80-90 dt/ha) zukünftig weniger steigerungsfähig als die in den anderen Regionen (55-80 dt/ha). Größte Zunahmen treten bei der CLM-Projektion auf, die keinen abnehmenden Trend der Niederschläge aufweist. Bis zur Periode 2021-2050 unterscheiden sich die beiden WETTREG-Projektionen kaum bei der Ertragssimulation. Deutlich geringere Ertragszunahmen unter WETTREG2010 im Vergleich zu WETTREG2006 zeigen sich erst in der Klimanormalperiode 2071-2100 (ohne Abbildung). Unter Annahme eines fortgesetzten CO<sub>2</sub>-Düungeffektes wären dann immer noch Zunahmen der mittleren Erträge für C<sub>3</sub>-Getreidearten zu verzeichnen (+15 bis +35 % in Bezug auf 1961-1990, -3 bis +11 % in Bezug auf 1991-2020). Relative mittlere Abnahmen bei Silomais würden zwischen -8 und -23 % in Bezug auf 1961-1990 und +3 bis -21% in Bezug auf 1991-2020 betragen. Auch für Erzgebirgsvorland und Erzgebirgskamm werden relative Abnahmen bei Silomais simuliert, obwohl aufgrund ansteigender Temperaturen für höhere Lagen günstigere Wachstumsbedingungen erwartet werden – hier fehlen aber weitgehend geeignete Böden. Die Ertragsstatistik von Silomais weist in den vergangenen Jahren (1992-2006) ebenfalls keinen zunehmenden Trend auf, die hohen Ertragsschwankungen werden vor allem auf Trockenheit zurückgeführt (LfULG 2009).

Die Wahl der Bezugsperiode ist für die Interpretation von großer Bedeutung. Bei Bezug auf die Klimanormalperiode 1961-1990 liegt ein Großteil der Ertragssteigerung von heute aus betrachtet bereits in der Vergangenheit. Bei Bezug auf die Periode 1991-2020 fallen die Ertragszunahmen deutlich geringer aus. Die Zunahmen bei den C<sub>3</sub>-Getreidearten sind vor allem auf die Wirkung des CO<sub>2</sub>-Düungeffektes

zurückzuführen. Dieser wurde anhand der Ergebnisse von langjährigen FACE-Versuchen (WEIGEL et al. 2006) in den Ertragsmodellen berücksichtigt. Ob sich dieser positive Produktionseffekt zukünftig in der Praxis entsprechend zeigt, wird auch davon abhängen, ob durch Sortenwahl und optimales Management die Voraussetzungen dafür geschaffen werden können. Weiter ist zu bedenken, dass der CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt zu einer Verschlechterung der Kornqualität führen kann (vergleiche MANDERSCHIED und WEIGEL, 2012).

Neben dem Ertrag stellt sich die Frage nach dem zukünftigen Beregnungsbedarf von landwirtschaftlichen Fruchtarten. Es ist davon auszugehen, dass dieser besonders im Osten Deutschlands zunimmt. In der Modellregion Dresden ist ein Anstieg des Zusatzwasserbedarfs besonders unter der Projektion WETTREG2010 zu verzeichnen, während für WETTREG2006 nur ein geringerer Anstieg, für die dynamischen Modelle kein Anstieg des Zusatzwasserbedarfes simuliert wird. Vorläufige Ergebnisse zeigen, dass eine Beregnung unter der Projektion WETTREG2010\_A1B in der Periode 2021-2050 im sächsischen Heidegebiet zu mittleren Ertragssteigerungen um 18 % bei Winterweizen und 28 % bei Silomais führen würde im Vergleich zur Simulation ohne Beregnung. Die ökonomischen Kennzahlen (prozesskostenfreie Leistungen) weisen jedoch darauf hin, dass eine Beregnungswürdigkeit aufgrund höherer Ertragsertlöse pro Fläche eher an Gunststandorten wie dem Löbhügelland gegeben wäre. Für die Uckermark wurde auch die statistische Projektion STAR2/2K (GERSTENGARBE und WERNER 1997) getestet. Der zukünftige Beregnungsbedarf liegt hier noch über den Ergebnissen aus Sachsen (WENKEL et al. 2011b). Mit der Streubreite von Ergebnissen auf der Basis verschiedener Klimamodelle und -projektionen muss man sich weiter auseinandersetzen. Mehr Sicherheit kann bei übereinstimmenden Trends aus Beobachtungsdaten gewonnen werden. Generell ist hinsichtlich Entscheidungen über Anpassungsmaßnahmen eine integrative Sicht von Klimaentwicklung, Landschaftswasserhaushalt, Wasserregulierung und Zusatzbewässerung unabdingbar.

## 5 Abschließende Bewertung und Ausblick

In den letzten Jahren wurden große Fortschritte zur Kenntnis des regionalen Klimawandels erzielt. Diese werden sich in Wechselwirkung mit der Forschung über Beobachtungsverfahren und Modellierung auf globaler und regionaler Ebene weiter verbessern. Gleichzeitig wird erwartet, dass Akteure seitens der Klimaanpassung ihr Klimawissen entsprechend aktualisieren und Variabilitäten von Simulationen berücksichtigen. Es werden daher flexible Informationssysteme benötigt, die den Umgang mit dem komplexen Wissen und zunehmenden Daten erleichtern und Klimaprojektionen anhand quantifizierter Klimafolgen interpretieren.

Vorbild für solche Informationssysteme können modellbasierte Entscheidungshilfesysteme (DSS) sein, die zur Vermittlung von Klima- und Klimafolgenwissen entwickelt werden. Sie tragen zur Vereinheitlichung und Standardi-

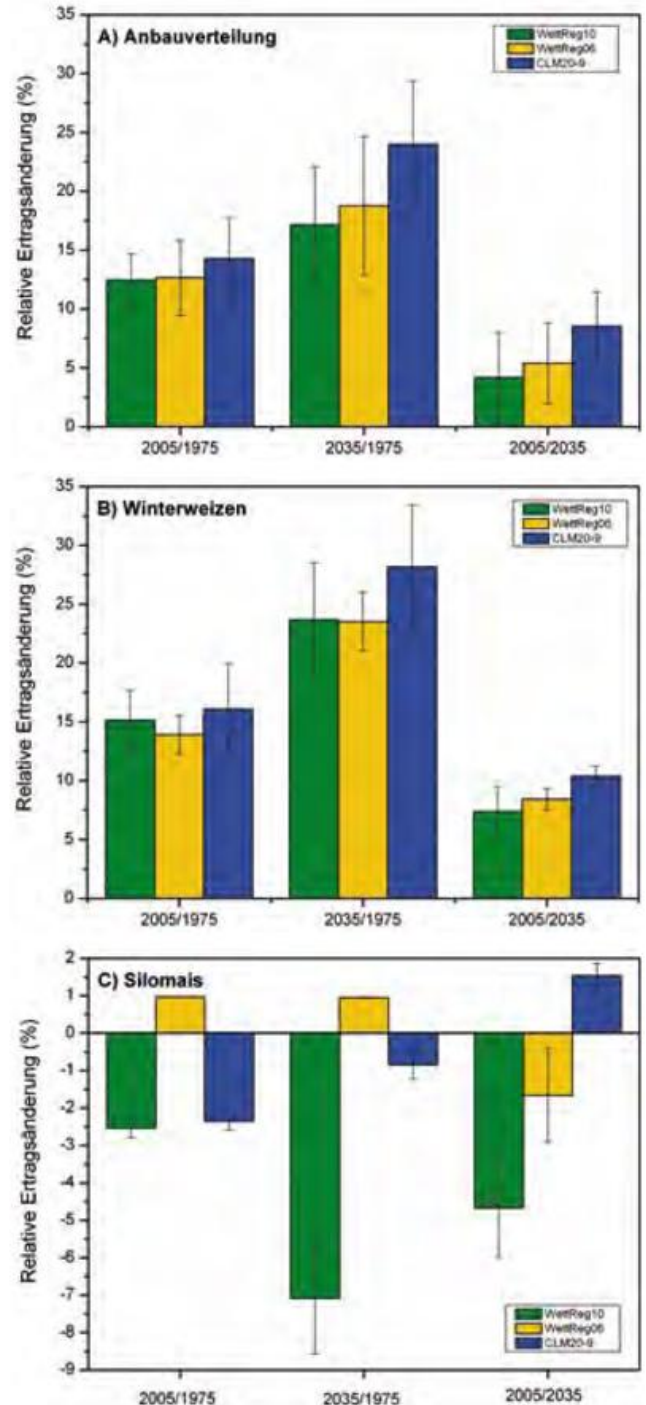


Abb. 5-6: Relative Ertragsänderungen beim Vergleich der Perioden 1961-1990 (1975), 1991-2020 (2005) und 2021-2050 (2035) für das Emissionsszenario A1B mit dem Modell YIELDSTAT für eine regional-typische Anbauverteilung verschiedener Fruchtarten (A), Winterweizen (B) und Silomais (C). Die Säulen geben Mittelwerte von vier Agrarstrukturgebieten, die Fehlerbalken die Spambreite zwischen den Gebieten, in der Modellregion Dresden wieder.

sierung des zunehmenden Wissens um den Klimawandel bei und dienen als Plattform für Ensemblesimulationen von Klimawirkungen. Für die Einschätzung der Unsicherheit von Simulationsergebnissen und der Entwicklung in der nahen Zukunft kommen gerade regionalen Beobachtungsdaten hohe Bedeutung zu. Dies gilt nicht nur für Klimaelemente, sondern auch für phänologische Beobachtungen,

Ertragsstatistiken, Bewirtschaftungsinformationen sowie für das Auftreten von Pflanzen-schädlingen und -krankheiten. Besonders die letzt genannten Effekte werden bei der Impaktmodellierung bisher kaum berücksichtigt.

Ein weiterer Vorteil webbasierter Entscheidungshilfesysteme ergibt sich dadurch, dass sie eine identische Daten- und Modellbasis garantieren und die gemeinsame Nutzung durch Akteure aus Forschung und Praxis erleichtern. Dadurch wird das Wissen in den verschiedenen Fachbereichen und Praxisfeldern vereinheitlicht und vergleichbar.

Das LandCaRe-DSS kann als Vorreiter für Klimaimpakt Decision Support Systeme gelten. Es integriert Forschungsergebnisse der Klimatologie, Agrarmeteorologie und -ökologie und regionalisiert diese für nutzerspezifische Informationen über Klimawandel und Klimafolgen. Damit trägt es auch dazu bei, den Umgang mit Klimafolgeszenarien zu lernen und diese für die Planung von Klimaanpassungen im Pflanzenbau, beim Risikomanagement von Betrieben und damit verbundenen mittel- und langfristigen Investitionen zu nutzen.

**Danksagung**

Die Autoren danken allen an den Stakeholder-Workshops und der Forschung beteiligten Personen und Organisationen, insbesondere dem Sächsischen Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL) und dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Für Hilfen bei der Datenauswertung sei Dr. Martina Alsheimer und Dipl.-Geogr. Tobias Donix gedankt. Die Arbeiten wurden beziehungsweise werden durch Förderungen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (LandCaRe2020, FKZ 01LS05104-9; REGKLAM, FKZ 01LR0802B) und des SMUL/LfULG (FKZ 070322, B526) unterstützt.

**Literatur**

BERG, M., WIELAND, R., WENKEL, K.-O., 2009: LandCaRe-DSS - ein interaktives, modellgestütztes Wissens- und Entscheidungsunterstützungssystem für die Klimaanpassung der Landwirtschaft. In: BILL, R., KORDUAN, P., THEUVSEN, L., MORGENSTERN, M. (Hrsg.) Anforderungen an die Agrarinformatik durch Globalisierung und Klimaveränderung. *GI-Editition, Lecture Notes in Informatics*, 25-28.

BERNHOFER, CH., MATSCHULLAT, J., BOBETH, A. (Hrsg.) 2009: Das Klima in der REGKLAM-Modellregion Dresden. Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes REGKLAM – Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden. Heft 1.

BERNHOFER, CH., MATSCHULLAT, J., BOBETH, A. (Hrsg.) 2011: Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden. Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes REGKLAM – Regionales Klima-

anpassungsprogramm für die Modellregion Dresden. Heft 2.

BROUWER, F.M., VAN ITTERSUM, M. (Eds), 2010: Environmental and Agricultural Modelling. Integrated Approaches for Policy Impact Assessment. Dordrecht.

EITZINGER, J., KERSEBAUM, K.C., FORMAYER, H. (Hrsg.), 2009: Landwirtschaft im Klimawandel. Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. *AgriMedia*, ISBN 978-3-86037-378-1.

CHMIELEWSKI, F.M., BLÜMEL, K., 2012. Klimawandel und Obstbau. Promet, dieser Band.

ENKE, W., SCHNEIDER, F., DEUTSCHLÄNDER, T., 2005: A novel scheme to derive optimized circulation pattern classifications for downscaling and forecast purposes. *Theoretical and Applied Climatology* **82**, 51-63.

FRANKE, J. 2009: Risiken des Klimawandels für den Wasserhaushalt – Variabilität und Trend des zeitlichen Niederschlagsspektrums. *Tharandter Klimaprotokolle*, Bd. **15**.

FRANKE, J., HÄNTZSCHEL, J., GOLDBERG, V., BERNHOFER, C., 2008: Application of a trigonometric approach to the regionalization of precipitation for a complex small-scale terrain in a GIS environment. *Meteorological Applications* **15**, 483-490.

FUCHS, C., FOCK, T., KASTEN, J., 2009: Notwendigkeiten für eine Risikoabsicherung im Ackerbau dargestellt am Beispiel Nordostdeutschlands. Berichte über Landwirtschaft. *Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft* **87** (2), 267-294.

GERSTENGARBE, F.-W., WERNER, P. C., 1997: Eine objektive Klimaklassifikation für Deutschland. *Annals of Meteorology* **34**, 73-74.

HENRICHSMEYER, W., CYPRIS, C., LÖHE, W., MEUDT, M., SANDER, R., SOTHEN, F. VON, ISERMAYER, F., SCHEFSKI, A., SCHLEEF, K.H., NEANDER, E., FASTERDING, F., HELMKE, B., NEUMANN, M., NIEBERG, H., MANEGOLD, D., MEIER, TH. (1996): Entwicklung des gesamtdeutschen Agrarsektormodells RAUMIS96. Endbericht zum Kooperationsprojekt. *Forschungsbericht für das BML* (94 HS 021), Bonn/Braunschweig.

JACOB, D., PODZUN, R., 1997: Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorological Atmospheric Physics* **63**, 119-129.

KÖSTNER, B. BERNHOFER, CH.; ANTER, J.; BERG, M.; FRANKE, J., GÖMANN, H., KERSEBAUM, K.C., KREINS, P., KUHNERT, M.; LINDAU, R., MANDERSCHIED, R., MENGELKAMP, H.-T., MIRSCHEL, W., NENDEL, C., NOZINSKI, E., RICHWIEN, M., PÄTZOLD, A., SIMMER, C., STONNER, R., WEIGEL, H.J., WENKEL, K.-O., WIELAND, R.; 2009. Anpassung ländlicher Räume an regionale Klimaänderungen – die Wissensplattform LandCaRe-DSS. In: MAHAMMADZADEH, M., BIEBELER, H., BARDT, H. (Hrsg.) 2009: Klimaschutz und Anpassung an die Klimafolgen - Strategien, Maßnahmen und Anwendungsbeispiele. Köln, 295-301.

KÖSTNER, B., KUHNERT, M., 2011: Simulation von Wasserhaushaltskomponenten unter dem Wandel des regio-

- nenal Klimas. In: HÜTTL, R.F., EMMERMANN, R., GERMER, S., NAUMANN, M., BENS, O. (Hrsg.): *Globaler Wandel und regionale Entwicklung – Anpassungsstrategien an globale Herausforderungen in der Region Berlin-Brandenburg*. Springer, Berlin, 43-49.
- KREIENKAMP, F., SPEKAT, A., ENKE, W., 2010: Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010. Bericht an das Umweltbundesamt (Z4-BR-50 201-2/4).
- LfULG (Hrsg.), 2009: *Klimawandel und Landwirtschaft – Fachliche Grundlagen für die Strategie zur Anpassung der sächsischen Landwirtschaft an den Klimawandel*. Informationsschrift des Sächsisches Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und Geologie (LfLUG), Dresden.
- LINDAU, R., SIMMER, C., 2012: On correcting precipitation as simulated by the regional climate model COSMO-CLM with daily rain gauge observations. *Meteorology & Atmospheric Physics*, DOI 10.1007/s00703-012-0215-7.
- LÖPMEIER, F.-J., WITTICH, K.-P., FRÜHAUF, C., 2013: *Entwicklungen und Stand der Aktivitäten in der Agrarmeteorologie*. Promet, dieser Band.
- MANDERSCHIED, R., Weigel, H.-J., 2012: *Das Braunschweiger FACE-Experiment*. Promet, dieser Band.
- MATTHEWS, K.B., SIBBALD, A.R., CRAW, S., 1999: Implementation of a spatial decision support system for rural land use planning: integrating GIS and environmental models with search and optimisation algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture* **23**, 9-26.
- MATTHIES, M., GIUPPONI, C., OSTENDORF, B., 2007: Environmental decision support systems: Current issues, methods and tools. *Environmental Modelling & Software* **22**, 123-127.
- MIRSCHHEL, W., WENKEL, K.-O., WIELAND, R., LUZI, K., ALBERT, E., KÖSTNER, B., 2009: Klimawandel und Ertragsleistung: Auswirkungen des Klimawandels auf die Ertragsleistung ausgewählter landwirtschaftlicher Fruchtarten im Freistaat Sachsen - eine landesweite regionaldifferenzierte Abschätzung In: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.): *Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfLUG, Sachsen)*, Heft **28/2009**, Dresden.
- NENDEL, C., Berg, M., Kersebaum, K.C., MIRSCHHEL, W., Specka, X., Wegehenkel, M., Wenkel, K.O., Wieland, R., 2011: The MONICA model: Testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. *Ecological Modelling* **222**, 1614-1625.
- OFFERMANN, F., GÖMANN, H., KREINS, P., VON LEDEBUR, O., PELIKAN, J., SALAMON, P., SANDERS, J., 2010. vTI-Baseline 2009 to 2019: Agri-economic projections for Germany. *Landbauforschung* **60** (3), 157-172.
- ROCKEL, B., WILL, A., HENSE, A. (eds); 2008: Regional climate modelling with COSMO-CLM (CCLM), *Meteorologische Zeitschrift* **17**, Special Issue.
- STABELL, C.B., 1987: Decision Support Systems: Alternative Perspectives and Schools. *Decision Support Systems* **3**, 243-251.
- WEIGEL, H.-J., MANDERSCHIED, R., BURKART, S., PACHOLSKI, A., WALOSZCZYK, K., FRÜHAUF, C., HEINEMEYER, O., 2006: Responses of an arable crop rotation system to elevated [CO<sub>2</sub>]. In: NÖSBERGER, J., LONG, S.P., NORBY, R.J., STITT, M., HENDREY, G.R., BLUM, H., (Eds.), *Managed ecosystems and CO<sub>2</sub>: Case studies, processes, and perspectives*. Springer, pp. 121-138.
- WENKEL, K.-O., MIRSCHHEL, W., BERG, M., WIELAND, R., KÖSTNER, B., 2011a: The LandCaRe Decision Support System – basic principles, architecture and methodology. In: Gnauck, A. (ed) *Modellierung und Simulation von Ökosystemen*. Berichte aus der Umweltinformatik. Shaker, Aachen.
- WENKEL, K.-O., MIRSCHHEL, W., BERG, M., NENDEL, C., WIELAND, R., KÖSTNER, B., 2011b: Klimawandel. Fluch oder Segen für die Landwirtschaft. Was die LandCaRe-Simulationen sagen. Senat der Bundesforschungsinstitute. *Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz*. Forschungsreport 2/2011, 4-8.

U. BUSCH, W. JANSSEN, C. PERSEKE-OCKELMANN

## 6 Das Beratungsangebot des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die Land- und Forstwirtschaft

The spectrum of services of the Deutscher Wetterdienst (DWD, German Weather Service) for agriculture and forestry

### Zusammenfassung

Die agrarmeteorologische Beratung des DWD bedient viele Bereiche des Agrarsektors und der Politik. Sie greift dafür auf ein umfangreiches meteorologisches und phänologisches Datenmaterial zurück, wendet darauf Prüf- und Ergänzungsroutinen an und nutzt die Daten als Eingangsgrößen für eine Vielzahl agrarmeteorologischer Modelle zur Berechnung des Bestandsklimas, von Pflanzenkrankheiten und land- bzw. forstwirtschaftlichen Parametern. Wichtige Produkte sind die agrarmeteorologischen Onlinehinweise zur Einhaltung von Umweltauflagen sowie zur Unterstützung einer ressourcenschonenden Land- und Forstwirtschaft, das Briefing-System agrowetter, die agrarmeteorologischen Warnungen und das Wetterfax. Die Politikberatung für Bund, Länder und die EU-Administration gewinnt zunehmend an Bedeutung.

### Summary

Through its Agrometeorological Advisory Services, the DWD supplies many areas of the agricultural sector and political life with specialized information. Based on a large amount of meteorological and phenological data, which are verified and completed by means of advanced test routines and then used as input data for a large range of agrometeorological models, it computes forecasts of crop climate conditions, plant diseases and various agriculture and forestry-related parameters. Key products are agrometeorological online information about compliance with environmental regulations and the support of a resource-efficient agriculture and forestry, the agro weather briefing system, agro-meteorological warnings and the weather fax. Consultancy and advice services for policy makers at the regional, federal and even European level are becoming increasingly important.

### 1 Die Agrarmeteorologie im Kontext der deutschen Landwirtschaft

Rund Vierfünftel der Landoberfläche Deutschlands werden land- und forstwirtschaftlich genutzt. Diese Flächen übernehmen neben der primären Nahrungs- und Rohstoffproduktion zahlreiche Naturschutz- und Klimafunktionen für die gesamte Gesellschaft.

In den letzten Jahrzehnten hat sich in der deutschen Landwirtschaft ein stetiger Wandel vollzogen. Während vor 100 Jahren ein Landwirt etwa 4 Mitbürger versorgte, liegt das heutige Verhältnis bei 1 zu 100. Die Ursachen hierfür sind in den Fortschritten des Kulturanbaus, der landwirtschaftlichen Technik, der Pflanzenzüchtung sowie in der Entwicklung von wirksameren Pflanzenschutz- und Düngemitteln zu suchen. Als Folge aller Effektivitätssteigerungen nimmt die Anzahl der Höfe kontinuierlich ab, die Größe der verbleibenden Betriebe allerdings zu. Gleichzeitig steigt die Nachfrage nach Nahrungsmitteln und nach Agrargütern

außerhalb der Nahrungsmittelproduktion (wie zum Beispiel den nachwachsenden Rohstoffen).

Die EU-Administration greift unmittelbar in die landwirtschaftlichen Abläufe ein, indem sie über Regeln sowohl die Umweltpolitik gestaltet als auch die Agrarmärkte steuert. Mit Hilfe von Gesetzen und Verordnungen wird versucht, die Zielparame- ter Ernährungssicherung, Biomassenproduktion, Ökonomie, Klimaschutz, Sicherung der Ökosysteme und Nachhaltigkeit gemäß der aktuellen gesellschaftlichen Erfordernisse in Einklang zu bringen. Die Verordnungen der EU werden in nationale Richtlinien überführt und auf Bundes- und Länderebene umgesetzt. Ein Teil dieser Umsetzungen betrifft auch die Beratungseinheiten der Agrarmeteorologie. Schon heute müssen Landwirte vor der Durchführung von möglicherweise umweltbelastenden Maßnahmen agrarmeteorologische Informationen einholen und diese als Nachweis in einer Schlagkartei dokumentieren. Diese Informationspflicht dient unter anderem dem Gewässer- und Bodenschutz und

### Ebene nachhaltige Land- und Forstwirtschaft

- Erstellung witterungsbasierter Planungsgrundlagen für ökologisch und ökonomisch sinnvolle Arbeitsmaßnahmen
- Verbreitung von Hinweisen auf mögliche direkte und indirekte Witterungsschäden

### Ebene Administration und Politik

- Beteiligung an gesetzlichen Regelwerken
- Abschätzung der Auswirkungen von extremen Witterungssituationen und des Klimawandels auf die Landwirtschaft
- Vermittlung agrarmeteorologischen Wissens für Entwicklungsländer (*Capacity Building*)

Tab. 6-1: Ziele und Aufgaben der Agrarmeteorologie des DWD auf unterschiedlichen Ebenen.

soll verhindern, dass zum Beispiel Nitrat in das Grundwasser ausgewaschen wird. Jedoch nicht nur aus Gründen des Naturschutzes, sondern auch weil das Ertragsniveau und die landwirtschaftliche Arbeitsmaßnahmen in hohem Maße vom Wetter abhängen, ist die agrarmeteorologische Beratung notwendig und eine echte Daseinsvorsorge.

Agrarmeteorologische Beratung wird in Deutschland von verschiedenen Einrichtungen angeboten. Beratungseinheiten existieren sowohl auf Länder- als auch auf länderübergreifender Ebene, letztere in Form der agrarmeteorologischen Beratungseinheiten des DWD sowie der Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz (ZEPP) mit dem Beratungsangebot ISIP (Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion).

## 2 Ziele und Aufgaben der agrarmeteorologischen Beratung des DWD

Die Landwirtschaft hat zahlreichen Anforderungen aus Politik und Gesellschaft gerecht zu werden. Deshalb richtet sich die agrarmeteorologische Beratung nicht nur unmittelbar an die Agrarwirtschaft, sondern auch an die Politikebene (siehe Tabelle 6-1).

Als angewandte Umweltwissenschaft ist der Agrarmeteorologie daran gelegen, die Landwirte bei der Durchführung einer nachhaltigen Landwirtschaft beratend zu unterstützen. Vorrangiges Ziel ist, die Ausschöpfung des Ertragspotentials aller landwirtschaftlichen Kulturen einschließlich der Sonderkulturen (Reben, Obst, Hopfen, Gemüse) unter Berücksichtigung der Witterungsaspekte zu gewährleisten. Für die Wachstumsprozesse von der Aussaat bis zur Fruchtreife sowie für die Ertragshöhe und die Qualität der Ernteprodukte sind agrarmeteorologische Faktoren wie Wasserhaushalt, Bodentemperatur

und Bestandsklima ganz entscheidend. Gleichzeitig weist die agrarmeteorologische Beratung auf witterungsbedingte Risiken hin, um Ernteschäden beziehungsweise Ertragseinbußen zu vermeiden. Neben den direkten Witterungseinflüssen spielen auch indirekte Einflüsse eine wichtige Rolle. Dazu zählen das witterungsbedingte Auftreten von Krankheiten und Schädlingen. Insofern verfolgt die Agrarmeteorologie gleichermaßen ökonomische und ökologische Ziele, denn eine bedarfsgerechte Ausbringung von Pflanzenschutz- und Düngemitteln ist nicht nur eine umweltschonende, sondern auch eine ökonomisch sinnvolle Maßnahme.

Auf der Politikebene hat die Agrarmeteorologie in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Umweltrechtliche Vorgaben verlangen zum Beispiel, dass möglicherweise umweltgefährdende Substanzen erst dann ausgebracht werden dürfen, wenn bestimmte agrarmeteorologische Bedingungen dies zulassen. Zu diesen gehören die Abwesenheit von Bodenfrost bei der Ausbringung von organischem Flüssigdünger und der Ausschluss hoher Windgeschwindigkeiten bei der Applikation von Pflanzenschutzmitteln, um zum Beispiel durch Abdrift verursachte Mitteleinträge in Fließgewässer beziehungsweise die Einwirkung der PSM auf Nichtzielorganismen zu verhindern. Weitere landwirtschaftliche Arbeitsmaßnahmen wie der Schnitt des Grünlands dürfen zum Schutz der Fauna nur in bestimmten phänologischen Zeitabschnitten erfolgen (siehe WESSNIGK und FILDEBRAND 2010).

Extremwetter und Klimawandel führen ebenfalls zu einer erhöhten Nachfrage nach spezieller agrarmeteorologischer Beratung auf der Politikebene. Schon heute regelt die EU-Administration, dass nationale Ausgleichsmaßnahmen für die Landwirtschaft bei witterungsbedingten Extremsituationen nur dann zulässig sind, wenn zum Beispiel die Agrarmeteorologie des DWD diese Ausnahmesituation für Deutschland fachlich belegt. Ein Beispiel ist das Auftreten von Dürren. Aussagen hierzu müssen für unterschiedliche Kulturen und pflanzliche Entwicklungsabschnitte auf der Grundlage einer bis in das Jahr 1961 zurückreichenden Häufigkeitsanalyse des Parameters Bodenfeuchte getroffen werden.

Kompetenztransfer (so genanntes „Capacity Building“) in Form von Schulung und Weiterbildung von Akademikern aus Entwicklungs- beziehungsweise Schwellenländern wird erst in jüngster Zeit wieder betrieben. Innerhalb des „International Leadership Trainings“ der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) schult die Agrarmeteorologie des DWD Agraringenieure und Agrarmeteorologen der Entwicklungsländer. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Unterstützung von Ländern bei der Einführung agrarmeteorologischer Beratungswerkzeuge wie zum Beispiel die Beratungssoftware AMBER (siehe Abschnitt 3.2).

### 3 Beratungsangebote des DWD

#### 3.1 Agrarmeteorologische Produktion: Aufbereitung meteorologischer Messwerte

Zurzeit werden stündliche Daten von etwa 500 deutschen Wetterstationen abgerufen und weiterverarbeitet. Da lückenlose Zeitreihen verschiedener Parameter (wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Strahlung) die Voraussetzung für eine weitere – auch modellbasierte – Nutzung sind, werden die Daten im ersten Schritt der Prozessierung auf Richtigkeit und Vollständigkeit überprüft. Daten, die wegen eines möglichen Sensordefektes außerhalb ihrer Toleranzgrenzen liegen, wegen eines Sensorausfalls fehlen oder aber von bestimmten Stationstypen nicht erfasst werden, da sie nicht zu deren Meldesoll gehören, müssen in einem aufwändigen Verfahren korrigiert, ersetzt beziehungsweise vervollständigt werden (siehe JANSSEN und SEDLATSCHKE 2001). Da die ersetzten Werte ebenfalls den Prüfkriterien genügen müssen, ist nach jeder Lückenschließung eine erneute Prüfung erforderlich. Die Datenvervollständigung reicht von einer einfachen zeitlichen Interpolation bis hin zur Ersetzung mittels räumlich verteilter Ersatzstationen. Ferner lassen sich Datenmängel durch Parametrisierung beheben, indem die angezweifelte oder fehlende Zielgröße aus ähnlichen Messgrößen abgeleitet wird (wie zum Beispiel die Globalstrahlung aus der Sonnenscheindauer). Abb. 6-1 erläutert die Vorgehensweise schematisch.

Das Prüfverfahren berücksichtigt insgesamt 44 verschiedene meteorologische Parameter. Jeder geprüfte Wert wird mit einem eigenen Qualitätsbyte versehen, aus dem die Herkunft des Wertes sowie dessen Prüfzustand hervorgeht. Mehrtägig verlängert werden die Messreihen um prognostizierte Daten stationsnaher Gitterpunkte der numerischen Wettervorhersagemodelle.

Alle geprüften, vervollständigten und prognostisch verlängerten Datensätze stehen in einer Datenbank als Eingangsgrößen für Beratungsmodelle zur Verfügung.

#### 3.2 Das agrarmeteorologische Softwarepaket AMBER

Sowohl die tägliche landwirtschaftliche Routineberatung als auch die Spezial- und die Politikberatung stützt sich auf das agrarmeteorologische Softwarepaket AMBER (= Agrarmeteorologische Beratung) als zentrales Beratungswerkzeug. Es wurde am Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung in Braunschweig entwickelt und unterliegt einer ständigen fachlichen und EDV-mäßigen Pflege. In AMBER (LÖPMEIER 1995) sind diverse objektive Beratungsverfahren einfacher oder komplexer Art integriert. Bei den landwirtschaftlich-relevanten Ausgabeparametern handelt es sich unter anderem um Infektionsniveaus pilzlich befallener Kulturen, um die Stärke von Schaderregerpopulationen, und natürlich um boden- und bestandsklimatische Größen, zumal die Modelle AMBETI/BEKLIMA sowie AMBAV Bestandteil des Softwarepakets sind (siehe Beitrag BRADEN in dieser Ausgabe). Die Kopplung aller Module, die zentrale Steuerung aller Ver-

fahren über die aktuelle phänologische Entwicklung sowie eine einheitliche Datenversorgung und Datenausgabe sind die wesentlichen Merkmale von AMBER. Auch agrarklimatologische Untersuchungen, die der Klimafolgenabschätzung und der landwirtschaftlichen Planung dienen, lassen sich mit AMBER durchführen (siehe LÖPMEIER 1999, FRIESLAND und LÖPMEIER 2006).

#### 3.3 Produkterzeugung und das Online-System agrowetter

Die Prozesse vom Erfassen der gemessenen Eingabegrößen, der Datenprüfung, der Anbindung von Gitterpunktwerten der numerischen Wettervorhersagemodelle, bis zum Ablegen ausgewählter AMBER-Berechnungsergebnisse in einer Datenbank laufen mehrmals täglich weitestgehend vollautomatisch ab. Anschließend stehen sie für vielfältige Abgabewege und -formen bereit.

Ein wichtiges Anschlussystem ist das Online-Beratungsangebot *agrowetter* ([www.agrowetter.de](http://www.agrowetter.de)). Mehrmals täglich aktualisiert bietet es Wetter- und agrarmeteorologische Information für die kommenden Tage. Bei den dargestellten Parametern handelt es sich unter anderem um Wasserhaushaltsgrößen, die Bodentemperatur sowie Infektions-, Hitzestress- und Waldbrandgefahrenindizes (siehe Abschnitt 3.8). Ferner bietet *agrowetter* eine interaktive Berechnungsberatung an und informiert über die aktuelle Vegetationsentwicklung.

Als Produktbeispiel zeigt Abb. 6-2 eine automatisch erzeugte Karte, in der die berechnete Feuchte eines sandigen Lehmbodens unter Gras deutschlandweit dargestellt ist. Eine stationsbezogene Grafik der Bodenfeuchte ist in Abb. 6-3 wiedergegeben. Im unteren Teil der Graphik ist das Vertikalprofil des pflanzenverfügbaren Wassers in Prozent nutzbarer Feldkapazität bis 60 cm Tiefe aufgetragen, während im oberen Teil der Grafik die für die Berechnung erforderlichen Eingabegrößen (Verdunstung, Tagesniederschlag, pflanzennutzbares Wasser) angegeben sind. Die Darstellung verknüpft den zurückliegen-

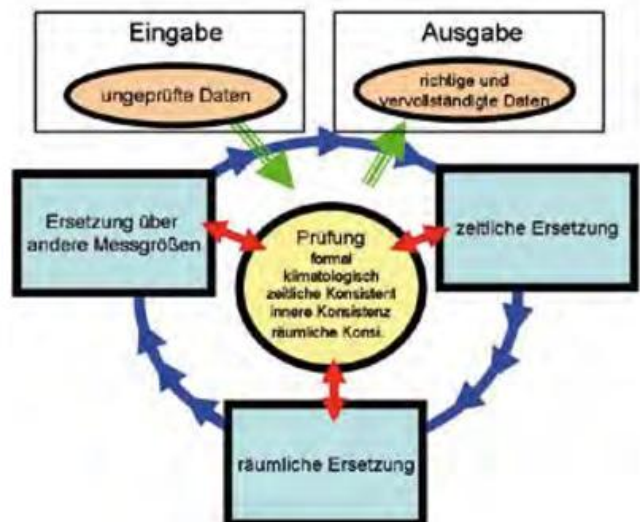


Abb. 6-1: Schematische Darstellung über den Ablauf der Datenprüfung und -vervollständigung Ebene.



Abb. 6-2: Berechnete Bodenfeuchte unter Gras bei sandigem Lehm in den obersten 60 cm. Werte in Prozent nutzbarer Feldkapazität.

### 3.4 Wetterfax für die Landwirtschaft

Ein wichtiges Beratungsangebot der Agrarmeteorologie des DWD ist das Wetterfax für die Landwirtschaft. Es war ursprünglich nur über das Faxgerät abrufbar und ist heute in grafisch und inhaltlich erweiterter Form auch im Internet verfügbar (zum Beispiel [www.dwd.de/agrowetter](http://www.dwd.de/agrowetter), [www.landwetter.de](http://www.landwetter.de), Zugang beschränkt auf geschlossene Nutzergruppe). Das Wetterfax ist auf die aktuellen Bedürfnisse der Landwirte und landwirtschaftlichen Berater ausgerichtet und saisonal für unterschiedliche Regionen Deutschlands abonnierbar. Die Beratungsqualität wird in regelmäßigen Umfragen, Gesprächen und in Kundenzufriedenheitsanalysen (zum Beispiel JEKLE 2010) abgefragt.

Das Wetterfax ist dreigliedrig aufgebaut und beginnt mit einer textlichen Einschätzung der bevorstehenden Wetterentwicklung sowie mit Hinweisen auf die Prognosegüte. Es schließt sich eine mehrtägige Zeitreihe prognostizierter Wetterdaten (inkl. Wetterpiktogramme) und agrarmeteorologischer Parameter an (wie zum Beispiel Verdunstung, Bodenfeuchte und -temperatur, Kornfeuchte und Infektionsniveaus). Den Abschluss bildet ein Textbaustein mit weiteren agrarmeteorologischen Hinweisen.

### 3.5 Telefonischer Ansagedienst (PID)

Einige Landwirte benötigen nur für bevorstehende, zeitlich begrenzte Arbeitsmaßnahmen kurzfristige agrarmeteorologische Informationen. Diesen Kunden steht der telefonische Ansagedienst zur Verfügung. Dessen Informationen leiten sich aus den Inhalten des Wetterfaxes ab.

den Zeitraum (links von der roten Markierung auf der Zeitskala) mit dem Prognosezeitraum (rechts von der roten Markierung) und zeigt in diesem konkreten Beispiel, dass die oberen Bodenschichten durch die prognostizierten Niederschläge (blaue Säulen) wieder mit Wasser aufgefüllt werden.

### 3.6 Artikel in der Fachpresse

Die landwirtschaftlichen Wochenblätter Deutschlands (wie zum Beispiel jene der Landwirtschaftskammern) werden wöchentlich mit einem Klimarückblick und einer agrarmeteorologischen Prognose versorgt. Die Klimarückblicke dienen dem Landwirt als Nachweis der guten fachlichen Praxis bei Cross Compliance Prüfungen im Hinblick auf agrarmeteorologische Vorgaben nach EU-Recht (das heißt Gewährung von Agrarzahungen nur bei Einhaltung umweltrelevanter Regeln). Eingegangen wird auch auf aktuelle witterungsrelevante Themen, die zum Beispiel den Beregnungsbedarf von Kulturen im Fall aufgetretener Dürren behandeln.

### 3.7 Agrarmeteorologische Gutachten

Die Abteilung Agrarmeteorologie ist in den verschiedensten Bereichen der Land- und Forstwirtschaft als unabhängiger Gutachter tätig. Dabei geht es zum Beispiel um mögliche Ausgleichszahlungen, die bei extremen Witterungsperioden von Landwirten entsprechend der BMELV-Rahmenrichtlinie 568/2008 geltend gemacht werden können (BMELV = Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz). Andere Beispiele sind ökologische Auswirkungen von Baumaßnahmen und Industrieprojekten im ländlichen Raum sowie Standortbewertungen für die Anbaueignung spezieller Kulturen (wie zum Beispiel Wein).

### 3.8 Waldbrandwarnungen

Zu den traditionellen Aufgaben des DWD gehört die tägliche Bereitstellung von Informationen über die Einschätzung der Waldbrandgefahr. Abnehmer der Informationen sind – neben den öffentlichen Medien – vor allem die Forst- und Innenministerien der Länder, da diesen gemäß Grundgesetz, Brandschutz- und Waldgesetzen das Katastrophenmanagement obliegt. Aufgrund bilateraler Verwaltungsvereinbarungen

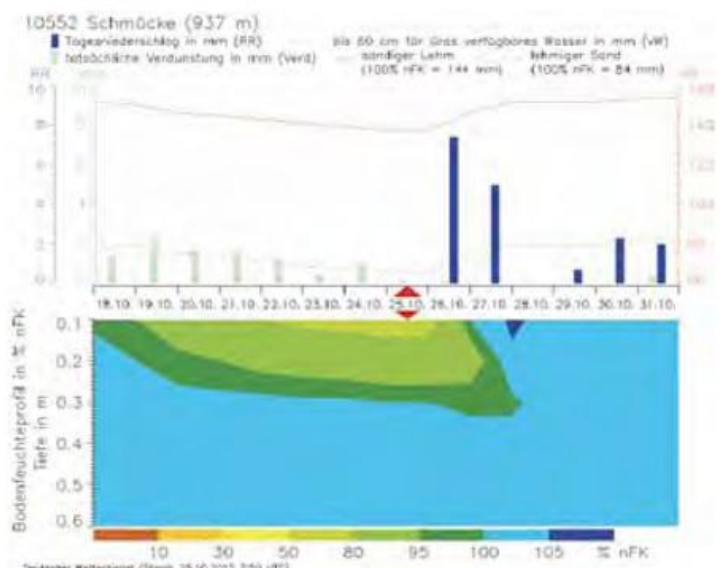


Abb. 6-3: Gemessener Niederschlag, berechnete aktuelle Verdunstung und aus beiden Größen abgeleitetes pflanzenverfügbares Wasser (oben) sowie Isoplethen der berechneten Bodenfeuchte (unten) für den Standort Schmöcke und den Zeitraum 18.10. bis 31.10.2012; erstellt am 25.10.2012.



Abb. 6-4: Aktivitäten des DWD im Bereich der Feuerthematik: vom Labor- zum Freilandexperiment, von der täglichen Prognose der Waldbrandgefahr zur Klimaprojektion (Foto 1: Zündexperiment bei unterschiedlichen Wassergehalten der Streu, Foto 2: Feuer auf Strohresten einer abgeernteten Getreidefläche (Braunschweig), Foto 3: Vollfeuer in Kieferparzelle (Lausitz), Karte 1: Internetdarstellung der täglichen Waldbrandgefahr, Karte 2: Ergebnisse eines Regionalmodells zur Abschätzung der Waldbrandgefahr für einen zukünftigen Projektionszeitraum).

werden ihnen vom März bis Oktober Indexwerte der witterungsbedingten Waldbrandgefahr zugeliefert. Die Bewertungen in Form der Stufen 1 bis 5 (sehr geringe Gefahr bis sehr hohe Gefahr) werden von einigen Forstbehörden auf ihren Internetseiten täglich veröffentlicht. Zudem macht der DWD die Modellergebnisse auf seiner eigenen Website publik, auf die wiederum andere Organisationen wie BBK (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bonn) und GFMC (Global Fire Monitoring Center, Universität Freiburg) verweisen. Ein weiterer Adressat ist die Bundeswehr.

Erfahrungswissen sammelte der DWD unter anderem durch seine Beteiligung an größeren Feuerexperimenten. Genannt sei in diesem Zusammenhang das Teilprojekt „Waldbrand“ des Deutschen Forschungsnetzes Naturkatastrophen (DFNK), welches unter Leitung des GFMC Waldbrandexperimente in der Lausitz durchführte (GOLDAMMER et al. 2004). Ferner betreibt der DWD im Rahmen seiner Möglichkeiten eigene Forschung. Diese befasst sich zum Beispiel mit kleineren Zündexperimenten, mit Untersuchungen des Wassergehalts von Nadelstreu (WITTICH 2005) und mit farbphänologischen Fragestellungen der Grasvergilbung, die einen Hinweis auf die Fähigkeit von Grasflächen liefern, Bodenfeuer zu tragen (WITTICH 2011).

Neben den experimentellen Arbeitsfeldern hat der DWD das Thema des Klimawandels aufgegriffen, um die zu erwartende Gefahrenänderung abzuschätzen (WITTICH et al. 2011). In diesem Zusammenhang unterstützt der DWD das von der Bundesregierung beschlossene und vom Umweltbundesamt durchgeführte Vorhaben DAS (Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel). Klimaprojektionen auf der Grundlage des kanadischen Fire Weather-Indexes, der von einer Reihe von Ländern als Klimawirkmodell benutzt wird, sind unter [www.deutscher-klimaatlas.de](http://www.deutscher-klimaatlas.de) einzusehen. Abb. 6-4 zeigt Aktivitäten des DWD im Bereich der Abschätzung der Waldbrandgefahr.

### 3.9 Politikberatung für Bund und Länder

Während in den letzten Jahrzehnten sich die agrarmeteorologische Beratungstätigkeit vorwiegend auf landwirtschaftliche Kundengruppen (praktizierende Landwirte und land-

wirtschaftliche Berater) beschränkte, hat inzwischen die Bedeutung der Politikberatung kontinuierlich zugenommen. Extreme Witterungsverhältnisse wie der nasse Sommer 2002 und der extrem trockene Sommer 2003, aber auch Einzelergebnisse wie durch Winderosion ausgelöste Massenkarambolagen auf Autobahnen und nicht zuletzt der Klimawandel waren häufiger Anlass für informelle Berichte an Ministerien. Dabei spielte die Bewertung der aktuellen Situation ebenso eine Rolle wie Häufigkeitsanalysen relevanter Ereignisse.

Darüber hinaus werden von der Politik für die Ausgestaltung von Gesetzen und Verordnungen spezielle agrarklimatologische Informationen eingefordert. Ein Beispiel ist die Düngeverordnung. Sie beschränkt während des Winters die Termine der Gülleausbringung auf bodenfrostfreie Zeiträume, um zu verhindern, dass flüssiger organischer Dünger oberflächlich abfließt. Wesentliche Regelungen für die Düngerverordnung basieren auf langjährigen Auswertungen des DWD über die Andauer von Bodenfrost in landwirtschaftlichen Böden. Modellergebnisse über Frosteindringtiefen und Auftauschichten für etwa 500 Messstationen sind im Internet ([www.agrowetter.de](http://www.agrowetter.de)) einsehbar.

Der DWD unterstützt außerdem Landwirte und Lohnunternehmer dabei, den Boden möglichst schonend zu bearbeiten und zu befahren (§ 17 des Bundesbodenschutzgesetzes). Da die Gefahr der Bodenverdichtung beim Einsatz von landwirtschaftlichen Maschinen und anderen vom Bodenwassergehalt abhängt, berechnet der DWD die Bodenfeuchte für diverse Kulturen und Bodenarten und macht die Ergebnisse im Internet unter [www.agrowetter.de](http://www.agrowetter.de) oder unter [www.landwetter.de](http://www.landwetter.de) öffentlich.

Bei besonderen Ereignissen, wie zum Beispiel dem Sandsturm im April 2011 in Mecklenburg-Vorpommern, stellt sich häufig die Frage nach der Ursache und der Außergewöhnlichkeit des Phänomens. Die Ursachenforschung erfordert eine Untersuchung mehrerer Einflussfaktoren. Für den erwähnten Sandsturm mussten neben der Bodenfeuchte in der Krume auch die Windgeschwindigkeit, die aktuellen landwirtschaftlichen Arbeitsmaßnahmen und der Entwicklungsstand der Pflanzen berücksichtigt werden. Die von der Politik geforderte Häufigkeitsabschätzung des Ereignisses

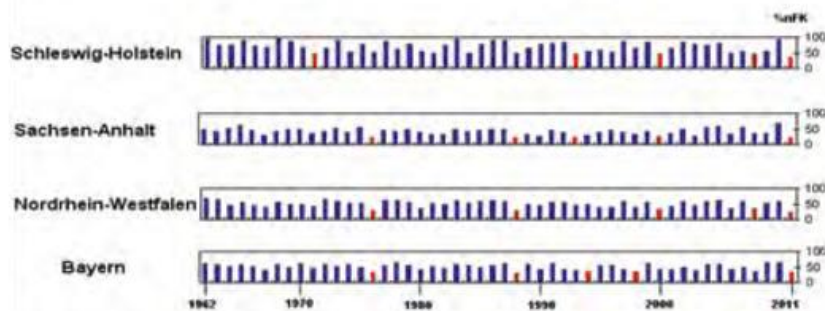


Abb. 6-5: Bodenfeuchtezustand in Prozent nutzbarer Feldkapazität, jeweils Mitte Mai, 1962 – 2011, für leichte Böden unter Wintergetreide (rot markiert sind die fünf niedrigsten Bodenfeuchten seit 1962).

verlangte einen Rückblick bis in das Jahr 1961, während die Berechnungen für die Abschätzung der zukünftigen Häufigkeit unter veränderten Klimabedingungen bis in das Jahr 2100 reichten.

Für Landwirtschaftsministerien erzeugt der DWD laufend agrarklimatologische Berichte über die Bodenfeuchtesituation sowie über mikroklimatische und sonstige produktionstechnisch relevante agrarmeteorologische Bedingungen. Diese werden auszugsweise im Klimastatusbericht des DWD ([www.ksb.dwd.de](http://www.ksb.dwd.de)) der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt. Die Abb. 6-5 zeigt ein typisches Beispiel für die Einschätzung der Bodenfeuchte als Jahreszeitreihe für vier Bundesländer Deutschlands.

#### 4 Künftige Bedeutung der agrarmeteorologischen Beratung

Der Klimawandel stellt vor allem die landwirtschaftliche Produktion vor neue Herausforderungen. Nicht nur in Deutschland und Europa, sondern mehr noch in den Entwicklungsländern wird die Anpassung an häufigere, außergewöhnliche Witterungsereignisse bewältigt werden müssen. Die agrarmeteorologische Beratung wird deshalb mehr denn je gefragt sein. Dies betrifft auch den Transfer agrarmeteorologischen Wissens in die Schwellen- und Entwicklungsländer, denn die wachsende Weltbevölkerung lässt sich nur dann ausreichend ernähren, wenn auf begrenzten landwirtschaftlich nutzbaren Flächen die Erträge noch weiter gesteigert werden, und zwar besonders in diesen Regionen.

In Bezug auf die landwirtschaftlichen Folgen des Klimawandels wird seitens der Landwirtschaftskammern, Länder- und Bundesbehörden immer häufiger die agrarmeteorologische Unterstützung eingefordert. Durch den steigenden Informationsbedarf, der auch für die Ausgestaltung gesetzlicher Regelungen genutzt wird, gewinnt die Politikberatung des DWD weiter an Bedeutung.

Weitere wichtige Zukunftsthemen sind zum Beispiel der Anbau neuer Energiekulturen zur Erzeugung von Biomasse.

Der Anbau wird nur gelingen können, wenn agrarklimatologische Randbedingungen berücksichtigt werden. Beratend kann die Agrarmeteorologie hier einen wichtigen Beitrag leisten.

#### Literatur

- FRIESLAND, H., LÖPMEIER, F.-J., 2006: The activities of the German Weather Service (DWD) in the field of agroclimatology. *Meteorol. Appl.* **13** (Supplement 1), 61–67.
- GOLDAMMER, J.G., HELD, A.C., HILLE, M., WITTICH, K.-P., KUEHRT, E., KOUTSIAS, N., OERTEL, D., THONICKE, K., CRAMER, W., 2004: Frühwarnung, Monitoring, Informationsmanagement und Simulation von Waldbrandgefahr. In: B. MERZ, H. APEL (Hrsg.) Risiken durch Naturgefahren in Deutschland. Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojekts Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK), *GeoForschungszentrum Potsdam, Sci. Tech. Rep. STR04/01*, 230-245.
- JANSSEN, W., SEDLATSCHKE, R., 2001: Ablauf der Datenprüfung und –vervollständigung im Geschäftsfeld Landwirtschaft. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **216**, Eigenverlag, 43 Seiten.
- JEKLE, A., 2010: Das Wetterfax für die Landwirtschaft – eine Kundenzufriedenheitsanalyse, Diplomarbeit im Studiengang Agrarwissenschaften der Technischen Universität München, Lehrstuhl für BWL-Marketing und Konsumforschung, 104 Seiten.
- LÖPMEIER, F.-J., 1995: The agrometeorological software-system AMBER; In: World Meteorological organization, Agricultural Meteorology, CAgM Report No. **61**, WMO/TD-No. 676, 9 S., Genf.
- LÖPMEIER, F.-J., 1999: Agrarklimatologie als EDV-gestütztes agrarmeteorologisches Informationssystem in der Beratung der Landwirtschaft und Landschaftsplanung. Abstracts; 4.Fachtagung BIOMET, 19.-20. April 1999 in München, S. 2.
- WESSNIGK, R., FILDEBRAND, J., 2010: Die Agrarmeteorologische Beratung des Deutschen Wetterdienstes unter spezieller Berücksichtigung von Sonderberatungen. Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology, 12-14 April 2010, Freiburg, Germany, *Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg* **20**, 16-19.
- WITTICH, K.-P., 2005: A single-layer litter moisture model for estimating forest-fire danger. *Meteorol. Zeitschrift* **14**, 157-164.
- WITTICH, K.-P., 2011: Phenological observations of grass curing in Germany. *Int. J. Biometeorol.* **55**, 313-318.
- WITTICH, K.-P., LÖPMEIER, F.-J., LEX, P., 2011: Waldbrände und Klimawandel in Deutschland. *AFZ-DerWald* **66**, 22-25.

T. GRÜNWARD, A. KNOHL, C. BERNHOFER

# 7 Energie- und Stoffflüsse über verschiedenen Landnutzungen

Energy and matter fluxes over different land uses

## Zusammenfassung

Die hier vorgestellten Ergebnisse von Eddy-Kovarianz-Messungen basieren auf Beobachtungen an elf Messstationen der TU Dresden und der Universität Göttingen, welche Teil des weltweiten Netzwerkes FLUXNET sind. In der Energiebilanz kommt an den betrachteten mitteleuropäischen Standorten der Strahlungsbilanz-Input bei allen Landnutzungstypen (Wald, Grasland und Landwirtschaft) vorzugsweise der Verdunstung (dem latenten Wärmestrom), weniger der Erwärmung der Luft (dem fühlbaren Wärmestrom) zugute. Die Summe der beiden turbulenten Wärmeströme ist typischerweise niedriger als die gemessene verfügbare Energie (Strahlungsbilanz minus Boden- und Bestandeswärmestrom). Diese beobachteten Schließungslücken der Energiebilanz können zur Korrektur der mittleren Wärmeflüsse verwendet werden. Daraus ergeben sich typische Verdunstungswerte von 550 mm für einen Fichtenbestand, 650 mm für Grasland und 450 mm für landwirtschaftlich genutzte Fläche. Die gleichzeitig erhobenen jährlichen Netto-CO<sub>2</sub>-Senken sind deutlich stärker landnutzungsabhängig und werden zudem durch Managementeinflüsse (Fruchtfolge, Düngung, Ernte) modifiziert. Extremereignisse stellen eine besondere Herausforderung an terrestrische Ökosysteme dar, welche die Stabilität und die Kapazität der CO<sub>2</sub>-Senken beeinflussen, dazu zählten zum Beispiel Stürme (2007) oder Hitzeperioden (2003, 2006). So wurde neben einer teils deutlichen Reduktion der Netto-CO<sub>2</sub>-Senke im Trockenjahr 2003 eine markante Verschiebung von latenten zu fühlbaren Wärmeflüssen beobachtet.

## Summary

The results of eddy covariance measurements presented in this study are based on observations at 11 sites operated by TU Dresden and University Göttingen (part of the worldwide network FLUXNET). In the energy balance the input by net radiation is particularly used for evapotranspiration (latent heat flux) and to a lesser extend for the heating of air (sensible heat flux) at all land uses at the respective Central European sites. The sum of the turbulent heat fluxes is typically lower than the measured available energy (net radiation minus soil and canopy heat fluxes). The observed gaps in the energy balance can be used to correct the mean heat fluxes. Hence typical evapotranspiration is 550 mm (spruce), 650 mm (grassland) and 450 mm (cropland), respectively. The simultaneously measured annual net CO<sub>2</sub> sinks depend more on land use and are additionally modified by the management (crop rotation, fertilization, harvest). Extreme events are a challenge for terrestrial ecosystems influencing stability and CO<sub>2</sub> sink capacity, e.g. storms (2007) and heat waves (2003, 2003). So, besides a partly strong reduction of the net CO<sub>2</sub> sink during the dry year 2003 a striking shift was observed from latent to sensible heat fluxes.

## 1 Einleitung

Natürliche und bewirtschaftete Ökosysteme beeinflussen den Impuls-, Energie- und Stoffhaushalt der Erdoberfläche. Dabei unterscheiden sich zum Beispiel landwirtschaftliche Flächen und Wälder beträchtlich, durchaus in einer ähnlichen Größenordnung wie sich die Bilanzen einer einzigen Landnutzung zwischen Winter und Sommer unterscheiden. Sie können zum Beispiel Senke oder Quelle von Treibhausgasen wie CO<sub>2</sub> sein. Kenntnisse darüber auf Basis langfristiger Direktmessungen des Treibhausgasausstau-

ches von Ökosystemen mit der Atmosphäre unterstützen die Entwicklung nachhaltiger Landnutzungen hinsichtlich einer Dämpfung des Klimawandels und einer Anpassung an den Klimawandel.

Das erste standardisierte Messnetz zur Untersuchung von CO<sub>2</sub>-, Wasser- und Energieflüssen zunächst nur über europäischen Waldbeständen (EUROFLUX) entstand 1996 (VALENTINI et al. 2000, MARTIN et al. 1998, BERNHOFER et al. 2003), wurde in der Folgezeit auf andere Landnutzungen erweitert und ist heute Teil des weltwei-

ten Netzwerkes FLUXNET (BALDOCCHI et al. 2001). Teile dieses Netzwerkes sind die Standorte der Professur Meteorologie an der TU Dresden und der Abteilung Bioklimatologie der Georg-August Universität Göttingen. Wesentliche Grundlage ist die standardisierte Nutzung des Direktmessverfahrens der Eddy-Kovarianz-Technik, welche gegenwärtig an 7 Messstationen der TU Dresden und an 4 Messstationen der Universität Göttingen betrieben wird. Diese bilden die Basis der hier vorgestellten Ergebnisse.

Analysen und Interpretationen von Eddy-Kovarianz-Messungen beziehen sich oft auf den Nettoaustausch, zum Beispiel repräsentiert die gemessene Verdunstung ET die Summe von Verlusten (die eigentliche Verdunstung) und dem Gewinn durch Tau und Reif. Korrekt müsste sie als NEE (Net Ecosystem Exchange) des Wassers bezeichnet werden. Das NEE des Kohlenstoffs (hier  $\text{CO}_2$ ) ist wieder der Netto- $\text{CO}_2$ -Fluss aller  $\text{CO}_2$ -freisetzenden und -bindenden Prozesse im beobachteten Ökosystem, welche dem Austausch mit der Atmosphäre unterliegen. In bewirtschafteten Ökosystemen müssen in der Kohlenstoffbilanzierung auch die nicht durch Atmung verursachten C-Verluste (zum Beispiel C-Export durch Ernte) sowie die nicht durch Photosynthese bewirkten C-Gewinne (zum Beispiel durch Düngung mit Stallmist) berücksichtigt werden (SCHULZE et al. 2009). Der Landnutzungseinfluss auf die Energie- Wasser- und C-Bilanz lässt sich gut anhand benachbarter Ökosysteme mit sehr ähnlichen klimatischen Verhältnissen herausarbeiten. Von den zehn hier vorgestellten Landnutzungen befinden sich drei innerhalb eines Abstandes von maximal 8 km, welche in ihrer C-Bilanz bereits verglichen wurden (PRESCHER et al. 2010).

Die Berücksichtigung weiterer Treibhausgase (Methan, Lachgas) erlaubt die Erstellung von Gesamtbilanzen an Treibhausgasen (Treibhauspotentialen) der betrachteten Landnutzung. Auf Grund der erst seit kurzem bestehenden Möglichkeit der messtechnischen Erfassung von  $\text{CH}_4$ - und  $\text{N}_2\text{O}$ -Flüssen mittels Eddy Kovarianz-Methode wird hier nur der  $\text{CO}_2$ -Austausch betrachtet.

## 2 Methode

Die Eddy-Kovarianz-(EC)-Technik ist eine direkte Messmethode zur Erfassung des turbulenten vertikalen Austauschs von Impuls, Wärme und Spurengasen zwischen der Atmosphäre (Grenzschicht) und Landoberflächen (zum Beispiel terrestrische Ökosysteme wie Wälder, Weiden oder Moore). Die hier verwendete Instrumentierung erlaubt unter anderem die Messung des fühlbaren (H) und latenten (L.E) Wärmeflusses sowie des  $\text{CO}_2$ -Flusses  $F_c$  (auf den Impulsfluss wird im Weiteren nicht eingegangen). Nach Anwendung von Korrekturen, die dem Ausschluss nicht turbulenter Phasen dienen und dem Füllen unvermeidlicher Datenlücken können Bilanzen des jeweiligen Austauschs

erstellt werden. Basis dafür sind halbstündige Flüsse, die zunächst aus den hochfrequenten Messungen der horizontalen und vertikalen Windgeschwindigkeitskomponenten, der Temperatur sowie der  $\text{CO}_2$ - und Wasserdampfkonzentration (turbulenter Fluss) berechnet werden. Diese werden üblicherweise in den Einheiten  $\text{W m}^{-2}$  (Wärmeflüsse) und  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ( $\text{CO}_2$ -Fluss) angegeben. Um Nettoflüsse zu erhalten, muss weiterhin die Speicheränderung berücksichtigt werden, die aus der zeitlichen Änderung von Temperatur sowie  $\text{CO}_2$ - und Wasserdampfkonzentration der Luft zwischen Boden und EC-Messniveau berechnet wird. Negative Werte bedeuten einen abwärtsgerichteten Fluss, welcher eine atmosphärische Senke darstellt. Die Austauschkomponenten des  $\text{CO}_2$  sind wie folgt definiert (für die Wasserdampf Flüsse gilt Analoges):

$$\text{NEE} = -\text{NEP} = F_c + S_c \quad (1)$$

mit	NEE	Net Ecosystem Exchange (Nettoaustausch),
	NEP	Net Ecosystem Productivity (Nettoökosystemproduktion),
	$F_c$	$\text{CO}_2$ -Fluss im EC-Messniveau,
	$S_c$	$\text{CO}_2$ -Speicheränderung (unterhalb des EC-Messniveaus),

$$\text{NEP} = \text{GPP} - \text{TER} \quad (2)$$

mit	GPP	Gross Primary Productivity (Bruttoprimärproduktion),
	TER	Total Ecosystem Respiration (Gesamtatmung),

$$\text{NBP} = \text{NEP} - \text{Cex} + \text{Cim} \quad (3)$$

mit	NBP	Net Biome Productivity (C-Bilanz des Standortes),
	Cex	C-Export (zum Beispiel durch Ernte),
	Cim	C-Import (zum Beispiel durch organische Düngung).

Ein positives NEE ist ein Gewinn für die Atmosphäre, also bezogen auf die Landoberfläche eine Quelle von  $\text{CO}_2$  oder Wasserdampf. Aus den beiden Wärmeflüssen (latenter Wärmefluss L.E, fühlbarer Wärmefluss H) und der verfügbaren Energie (Strahlungsbilanz abzüglich Speicheränderungen, AE) beziehungsweise dem Niederschlag P werden der Verdunstungsanteil (L.E/AE, L.E/P) und das Bowenverhältnis  $\beta$  (H/L.E) abgeleitet. Zeitlich integrierte Energieflüsse (zum Beispiel Jahreswerte) werden in  $\text{W m}^{-2}$  und häufig auch in mm Wasseräquivalent angegeben, Bilanzen des  $\text{CO}_2$ -Austauschs als C-Äquivalent in  $\text{g C m}^{-2}$ . Typischerweise wird bei Anwendung der EC-Methode eine Unterschätzung der turbulenten Wärmeflüsse (Output der Energiebilanz) festgestellt. Diese erreichen also in Summe nicht den Wert der verfügbaren Energie (Input der Energiebilanz). Diese Schließungslücke kann als Differenz zwischen In- und Outputkomponenten angegeben werden oder wie hier als Differenz des Schließungsverhältnisses S zu eins (relative Angabe bezüglich AE), wobei

$$S = \frac{L.E + H}{AE} \quad (4)$$

mit S Schließungsverhältnis,  
L.E+H Summe der Wärmeflüsse-  
(Output der Energiebilanz),  
AE verfügbare Energie (Input der  
Energiebilanz).

Für größere Integrationszeiträume (zum Beispiel Jahreswerte) kann das Schließungsverhältnis S aus Mittelwerten der Out- und Inputkomponenten der Energiebilanz gebildet werden. Auf Basis der für EC-Messwerte typischen Halbstundenwerte kann S alternativ auch aus dem Anstieg einer linearen Regression zwischen (H+L.E) und AE bestimmt werden (WILSON et al. 2002, TWINE et al. 2000). Beide Methoden zur Bestimmung von S führen zu ähnlichen Ergebnissen, wenn sie auf den gleichen Zeitraum angewandt werden. Nachdem Schließungsverhältnis beziehungsweise Schließungslücke quantifiziert wurden, kann dies zur Korrektur der Wärmeflüsse verwendet werden:

$$L.E(korr) = L.E + \frac{1}{1+\beta} (1-S) AE \quad (5)$$

$$H(korr) = \beta L.E(korr.) = H + \frac{1}{1+\beta} (1-S) AE \quad (6)$$

mit S Schließungsverhältnis,  
1-S Schließungslücke (relativ zu AE),  
AE verfügbare Energie (Strahlungsbilanz ab  
züglich Speicheränderungen),  
L.E(korr) schließungslückenkorrigierterlatenterWär-  
mefluss,  
H(korr) schließungslückenkorrigierter fühlbarer  
Wärmefluss.

Die Schließungslücke wird also mittels Bowenverhältnis  $\beta = H/L.E$  auf die beiden Wärmeflüsse aufgeteilt, um korrigierte Werte zu erhalten. Dieses Verfahren eignet sich aber nur für größere Integrationszeiträume (Jahre, Monate) und sollte nicht ohne weiteres bei großen Schließungslücken angewandt werden.

### 3 Messstandorte

Die TU Dresden (Meteorologie) betreibt gegenwärtig (2012) sieben Stationen zum Monitoring von Energie-, Wasser und Treibhausgasflüssen unterschiedlicher Landnutzungen, darunter die längste Reihe Deutschlands zum CO<sub>2</sub>-Austausch mit der Atmosphäre (Ankerstation Tharandter Wald, ASTW, seit 1996, GRÜNWALD und BERNHOFER 2007, Abb. 7-1). Weitere Stationen befinden sich auf Grasland (seit 2002), einer landwirtschaftlich genutzten Fläche (seit 2005) und zwei Moorstandorten (seit 2009).

Der Altlichtenbestand im Tharandter Wald (ASTW, 50°57'49"N, 13°34'01"E, 380 m NN) ist 125 Jahre alt und

hat eine mittlere Höhe von 30 m. Im Einflussbereich der Messungen befinden sich 87 % Nadelwald (72 % Gemeine Fichte, *Picea abies* (L.) H.Karst.) und 13 % Lärchen beziehungsweise Laubwald. Dieser Standort wird seit 1811 bewirtschaftet (unter anderem Pflanzungen, Auflichtungen, Kalkungen). Die beiden letzten größeren Nutzungen erfolgten 2002 (Entnahme von 60 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) und 2011 (53 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>). Die Grasstation Grillenburg (GRI, 50°57'04"N, 13°30'50"E, 380 m NN) ist seit 1987 ungedüngt und wird extensiv genutzt (1 bis 3 Mahdtermine pro Jahr, gelegentliche Beweidung durch Kühe und Schafe im Herbst). Die Station Klingenberg (KLI, 50°53'34"N, 13°31'21"E, 478 m NN) befindet sich auf einem Acker mit der Fruchtfolge Wintergerste, Raps, Winterweizen, Mais, Sommergerste. Bewirtschaftungsmaßnahmen umfassen neben Aussaat, Ernte und Düngungen verschiedene Pflanzenschutzbehandlungen und eine bodenschonende Bearbeitung (maximal 12 cm tief). Eine weitere Messstation befindet sich in den Hochlagen des Osterzgebirges bei Oberbärenburg (OBB, 50°47'01"N, 13°43'11"E, 735 m NN, seit 2008 in Betrieb). Der etwa 60 Jahre alte Fichtenbestand weist eine mittlere Höhe von 15 m auf und wurde seit Beginn der Messungen nicht bewirtschaftet. Zwei weitere Messstandorte auf Feuchttflächen mit organischen Böden befinden sich außerhalb Sachsens bei Anklam und im Spreewald. Das Niedermoor im Peenetal nordöstlich von Anklam (ANK, 53°51'58"N, 13°41'00"E, -1 m NN, seit 2009) weist eine unregelmäßige Bestandesstruktur auf, die hauptsächlich aus Grauweiden (etwa 5 m hoch), Schilf und Seggen besteht. Die Spreewälder Station befindet sich südöstlich von Lübben im Hochwald (SPR, 51°53'32"N, 14°02'01"E, 61 m NN, seit 2010), welcher überwiegend aus bis zu 30 m

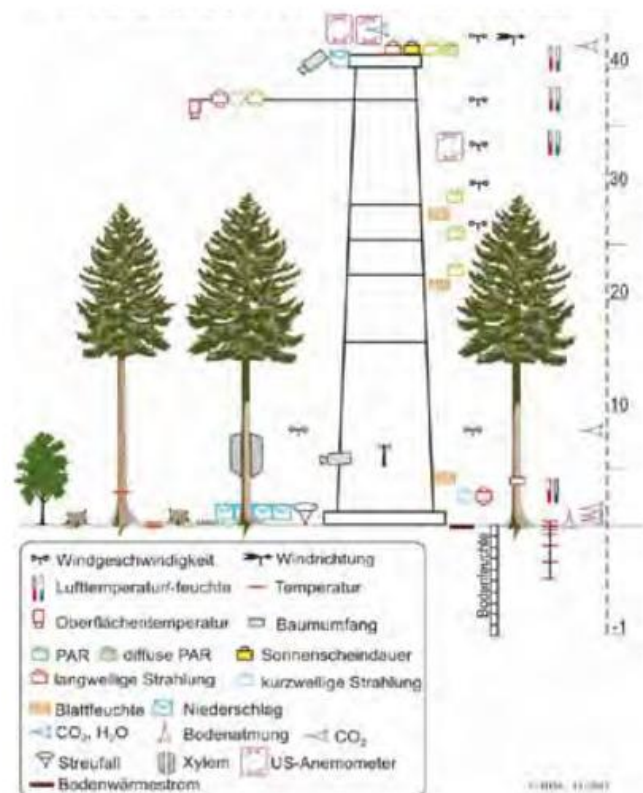


Abb. 7-1: Ökomessfeld der Ankerstation Tharandter Wald.

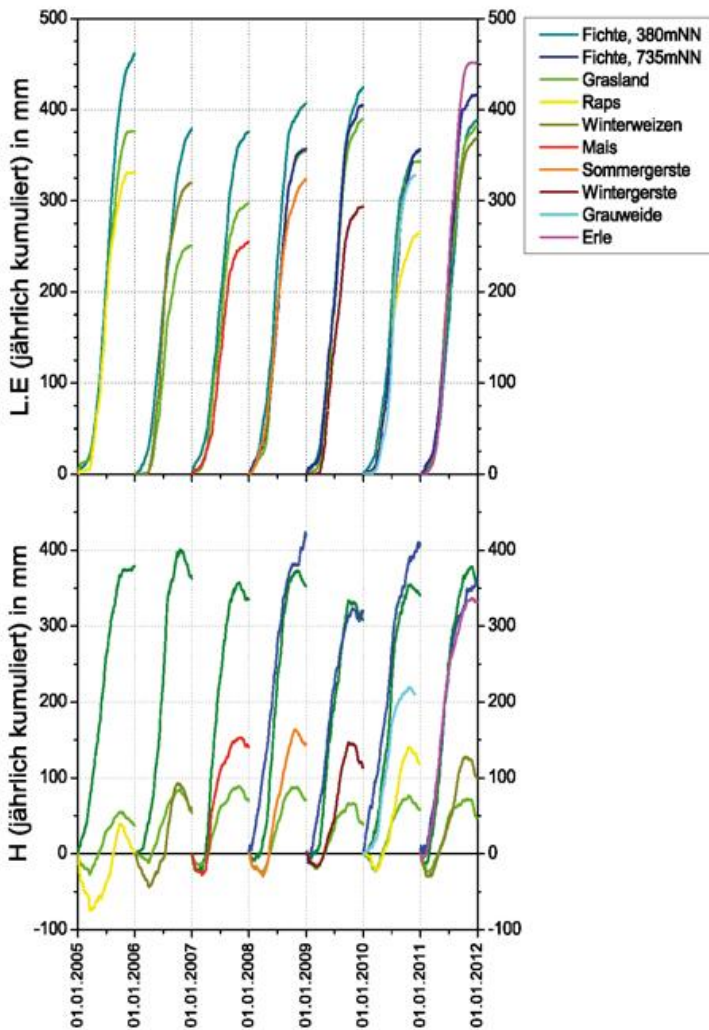


Abb. 7-2: Jährlich kumulierte Wasseräquivalente des latenten Wärmeflusses L.E (oben, nicht schließungslückenkorrigiert, siehe Text) und des fühlbaren Wärmeflusses H (unten, nicht schließungslückenkorrigiert, siehe Text) verschiedener Landnutzungen im Zeitraum 2005-2011.

hohen Schwarzerlen besteht. Nach einer Auflichtung 2009 wird dieser Bestand derzeit nicht mehr bewirtschaftet.

Die Universität Göttingen (Abteilung Bioklimatologie) betreibt momentan vier Messstationen, davon drei über Wäldern in Deutschland (Hainich, Leinefelde und Solling) und einen über Regenwald in Sulawesi/Indonesien. Der hier vorgestellte unbewirtschaftete alte Buchenmischwald im Nationalpark Hainich (51°04'46"N, 10°27'08"O, 440 mNN) hat eine mittlere Höhe von etwa 34 m und besteht zu 65 % aus Buche (*Fagus sylvatica* L.), zu 25 % auf Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und zu 7 % aus Ahorn (*Acer pseudoplatanus* L. und *A. plantanoides* L.) mit einigen Hainbuchen (*Carpinus betulus* L.), Ulmen (*Ulmus glabra* Huds.) und anderen Arten. Das Gebiet war seit Mitte der 50er Jahre Militärgelände und deswegen aus der systematischen Nutzung genommen. Somit konnte sich ein artenreicher, unterschiedlich alter (älteste Bäume bis 250 Jahre) Buchenmischwald mit hohem Totholzanteil entwickeln. An dem Standort finden seit Januar 2000 kontinuierlich EC-Messungen statt (KNOHL et al. 2003).

Alle Stationen sind mit Messgeräten ausgestattet, die die Nutzung der EC-Technik erlauben. Dies sind Ultraschalla-

nemometer hauptsächlich des Typs GILL-R3 (Gill Instruments, Lymington, U.K.) zur Messung der drei Windgeschwindigkeitskomponenten  $u$ ,  $v$ ,  $w$  sowie der Temperatur und geschlossene Gasanalysatoren LI-7000 beziehungsweise LI-6262 oder halboffene Gasanalysatoren LI-7200 für die Messung der  $\text{CO}_2$ - und Wasserdampfkonzentration, denen die zu messende Luft mittels Pumpen zugeführt wird. Die Geräte liefern die zur Anwendung der EC-Technik erforderliche Messfrequenz von 20-25 Hz. Daneben sind alle Stationen mit Messungen der Strahlungskomponenten (inklusive photosynthetisch aktive Strahlung), Luftfeuchte und -temperatur, Niederschlag sowie Boden- und Bestandesmessungen ausgestattet. Weitere Details zu den Messungen finden sich unter anderem in BERNHOFER et al. (2011).

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Verdunstung und Wärmebilanz

Der latente Wärmefluss beziehungsweise dessen Wasseräquivalent, die Verdunstung, zeigt eine relativ geringe Variabilität sowohl der Jahreswerte als auch zwischen den verschiedenen Standorten. Die Wasseräquivalente des direkt aus EC-Messungen bestimmten latenten Wärmeflusses sind wegen der beobachteten Schließungslücke in der Energiebilanz (siehe unten) für einen Vergleich mit dem Energie- beziehungsweise Wasserangebot ungeeignet. Diese noch nicht um den Einfluss der Schließungslücke korrigierten Werte der Waldstandorte liegen bei etwa 360-520 mm, für Grasland und landwirtschaftliche Nutzung bei etwa 250-390 mm. Die fühlbaren Wärmeflüsse (zur besseren Vergleichbarkeit im Folgenden auch als Wasseräquivalent in mm angegeben) variieren dagegen stärker standortabhängig und sind teils deutlich kleiner als die Verdunstung. Die Waldstandorte liegen bei 280-490 mm, die kurzen Bestände bei 0-200 mm (ebenfalls ohne Schließungslückenkorrektur). Abbildung 7-2 zeigt die Wasseräquivalente des latenten und fühlbaren Wärmeflusses ausschnittsweise für den Zeitraum 2005-2011.

Im Allgemeinen überwiegt der latente den fühlbaren Wärmefluss, insbesondere über Grasland und Acker. Ausdruck findet dies im Bowenverhältnis ( $H/L.E$ ), welches zwischen 0,5 und 0,8 (Wald) beziehungsweise zwischen 0 und 0,5 (Grasland, Acker) schwankt. Eine Ausnahme bildet das Trockenjahr 2003 (siehe auch Kapitel 4.2). An der Ankerstation Tharandter Wald (Fichte, 380 m NN) wurde in diesem Jahr nicht nur eine der niedrigsten jährlichen Verdunstungsraten (380 mm), sondern auch der mit Abstand höchste fühlbare Wärmefluss (490 mm) gemessen, was zu einem außergewöhnlich hohen Bowenverhältnis von 1,3 führte.

Der latente und fühlbare Wärmefluss sind Komponenten der Energiebilanz. Wie erwähnt, beobachtet man häufig eine Schließungslücke (die Summe der Wärmeflüsse ist geringer als die verfügbare Energie). Diese resultiert etwa aus einer unzureichenden Korrektur der turbulenten Ströme, aus räum-

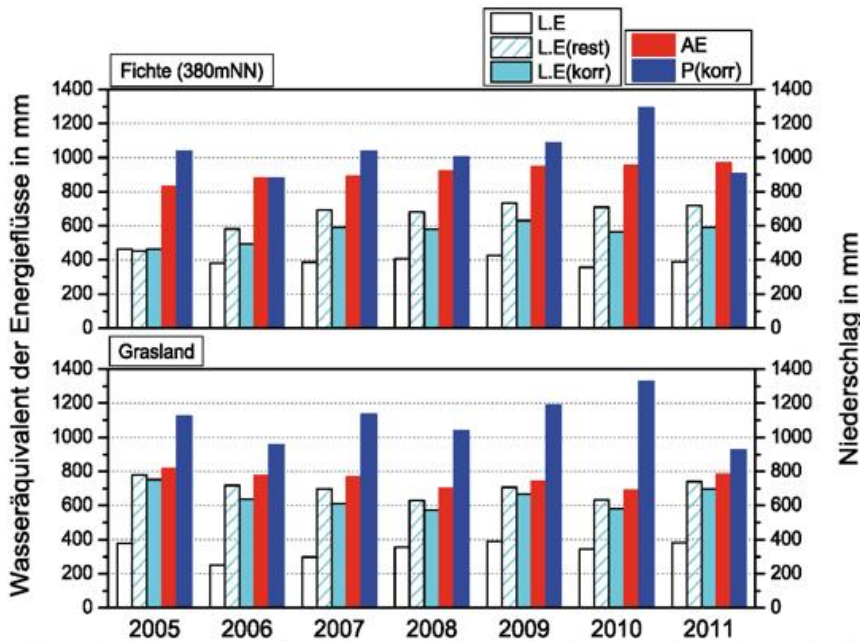


Abb. 7-3: Jahressummen des Wasseräquivalentes des latenten Wärmefflusses (L.E), der Restgliedverdunstung (L.E(rest)), der schließungslückenkorrigierten Verdunstung (L.E(korr)), des Wasseräquivalentes der verfügbaren Energie (AE) und des korrigierten Niederschlages für Fichte (ASTW) und Grasland 2005-2011.

lichen Inhomogenitäten am Messstandort, aus unterschiedlichen Quellflächen der gemessenen Strahlungs- und Wärmefflüsse, sowie aus organisierten Strömungen, welche die räumliche Heterogenität verursacht (FOKEN 2008, PANIN und BERNHOFER 2008). Diese Effekte führen meist zu einer systematischen Unterschätzung der Wärmefflüsse bezüglich einer als korrekt angenommenen Strahlungsmessung. Die Schließungslücke beträgt beispielsweise für den Fichtenstandort ASTW -1 % (Überschließung) bis 37 % der verfügbaren Energie, für die landwirtschaftliche Nutzung 26-45 % und für das Grasland 38-60 %. Da diese Lücke bekannt ist, kann sie mit Hilfe des Bowenverhältnisses und der verfügbaren Energie zur Korrektur der Wärmefflüsse (auf Monats- und Jahresbasis) verwendet werden. Die entsprechend korrigierten jährlichen Verdunstungswerte können der verfügbaren Energie und dem korrigierten Niederschlag gegenübergestellt werden. Abbildung 7-3 zeigt dies beispielhaft für den Fichtenbestand (untere Lage) und das Grasland. Der direkt aus den EC-Messungen bestimmte latente Wärmeffluss L.E unterschätzt die Verdunstung insbesondere am Grasslandort wegen der großen Schließungslücke. Dagegen stellt die Restgliedverdunstung (Differenz aus verfügbarer Energie und fühlbarem Wärmeffluss, L.E(rest)) tendenziell eine Obergrenze der tatsächlichen Verdunstung dar, weil die gesamte Schließungslücke der Verdunstung zugeschlagen wird. Das hier vorgestellte Verfahren der Schließungslückenkorrektur ist ein realistischer Ansatz, der durch Bodenfeuchtemessungen und Wasserhaushaltsbetrachtungen gestützt wird.

Bei deutlich geringerer Strahlungsbilanz des Graslandes durch die höhere Albedo haben beide Standorte ein ungefähr gleich großes Niederschlagsangebot. Die korrigierte jährliche Verdunstung im Zeitraum 2005-2011 liegt für das Grasland im Allgemeinen zwischen etwa 600 mm und 700 mm und ist damit größer als die korrigierte Verdunstung

des Fichtenbestandes mit etwa 500-600 mm (die landwirtschaftlich genutzte Fläche verdunstet korrigiert jährlich etwa 400-500 mm). Wegen der geringen Entfernung beider Standorte (4 km) und gleicher Höhenlage (380 m NN) können die Werte gut direkt miteinander verglichen werden, vor allem aber ihr Anteil im Energie- und Wasserhaushalt. So verdunstet der Fichtenbestand nur etwa die Hälfte der verfügbaren Energie (61 %) und des Niederschlages (54 %), während diese Werte beim Grasland 84 % beziehungsweise 58 % betragen (landwirtschaftlich genutzte Fläche 73% beziehungsweise 46 %). Ohne Schließungslückenkorrektur beträgt die Verdunstung des Graslandes nur die für diesen Standort weniger realistischen 31 % des korrigierten Niederschlages.

Bei Nutzung von EC-Messwerten der Verdunstung als Teil der Wasserbilanz ist also die Schließungslücke der Energiebilanz unbedingt zu beachten. Meistens werden

von FLUXNET-Stationen latente Wärmefflüsse zur Verfügung gestellt, die nicht schließungslückenkorrigiert sind und je nach Anwendung nicht immer korrigiert werden. Insbesondere bei hoher zeitlicher Auflösung von zum Beispiel Stundenwerten, wie sie zur Analyse von pflanzenphysiologischen Reaktionen im Tagesgang notwendig sind, gibt es noch kein allgemein anerkanntes Verfahren zur Korrektur der Schließungslücke. Hier werden daher meist unkorrigierte Werte verwendet. Das ist bei der Interpretation der Daten zu berücksichtigen.

#### 4.2 Einfluss von Extremereignissen am Beispiel des Trockenjahres 2003

Aktuelle meteorologische Beobachtungen weisen darauf hin, dass sich die Häufigkeit von klimatischen Extremereignissen, wie zum Beispiel Hitzewellen, in Zentraleuropa erhöht hat (DELLA-MARTA et al. 2007). So war der Sommer 2003 einer der heißesten Sommer in West- und Mitteleuropa seit mehr als 500 Jahren (LUTERBACHER et al. 2004) mit großen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, terrestrische Ökosysteme und Hydrologie (CIAIS et al. 2005). Laut Klimamodellen werden solche extremen Ereignisse in Zukunft in Häufigkeit und Intensität zunehmen (MEEHL und TEBALDI, 2004). Insofern könnte der Sommer 2003 als Indikator dafür dienen, wie sich das zukünftige Klima entwickeln wird und wie terrestrische Ökosysteme darauf reagieren (BENISTON, 2004). Wie an anderen EC-Standorten in Europa führte die lang anhaltende atmosphärische Trockenheit im Sommer 2003 auch im Buchenmischwald Hainich, einer EC-Station der Universität Göttingen, zu einer Austrocknung des Bodens und zu einer physiologischen Reaktion der Vegetation. So wurde dort im Juli 2003 eine starke Abnahme der Netto-Ökosystem-Produktivität (NEP) beobachtet. Im August lag die Netto-CO<sub>2</sub> Aufnahme sogar nur bei

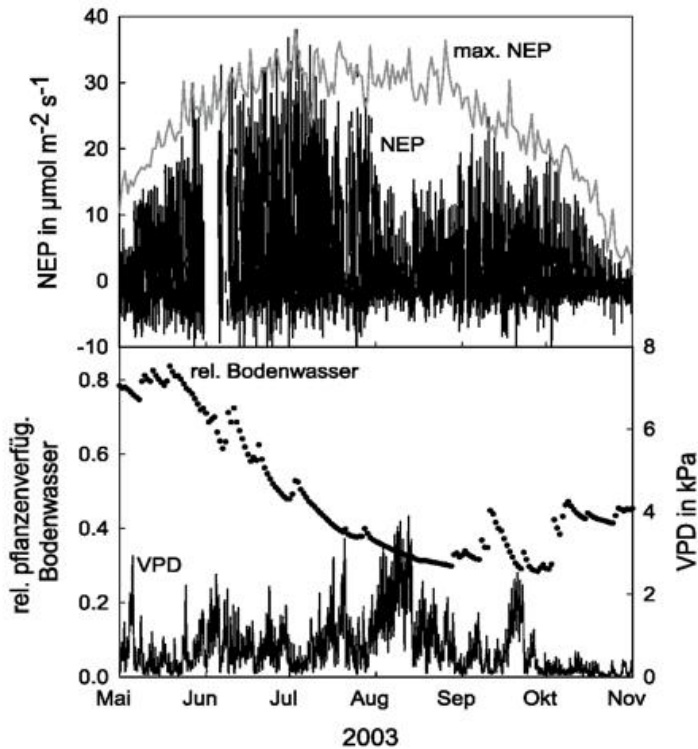


Abb. 7-4: Aktuelle und maximale Netto-Ökosystem-Produktivität (oben, NEP) und relatives pflanzenverfügbares Bodenwasser sowie Wasserdampfdefizit (unten, VPD) während des Sommers 2003 am Standort Hainich.

0 bis  $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  statt der für diese Jahreszeit typischen Werte um die  $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Abb. 7-4, oben). Die starke Reduktion der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme ging einher mit einem sehr niedrigen relativen pflanzenverfügbaren Bodenwasser um 0,4 und hohen Wasserdampfdefiziten von bis zu 4 kPa (Abb. 7-4, unten). REICHSTEIN et al. (2006) argumentieren, dass die verringerte  $\text{CO}_2$ -Aufnahme nicht durch Hitzestress, sondern durch Wasserstress im Boden verursacht wurde. Diese Beobachtung deckt sich mit Laborexperimenten, die zeigen, dass die stomatare Leitfähigkeit ab etwa 0,4 relativer Bodenfeuchte stark sinkt (GOLLAN et al. 1986) und anschließend zu einer Reduktion der Photosynthese-Kapazität führt (FLEXAS et al., 2006).

Wenn Pflanzen ihre Stomata schließen, wird nicht nur weniger  $\text{CO}_2$  aufgenommen, sondern auch entsprechend weniger Wasserdampf als Transpiration an die Atmosphäre abgegeben. Da die kühlende Wirkung der Transpiration reduziert wird, kommt es zu einer Erwärmung der Blätter und entsprechend zu einer erhöhten Produktion von fühlbarer Wärme. Das Bowen-Verhältnis, das Verhältnis von fühlbarem und latentem Wärmefluss, zeigt in typischen Jahren einen U-förmigen Verlauf im Jahresgang mit hohen Werten vor und während Blattaustrieb sowie im Herbst ( $H > \text{L.E.}$ , siehe März/April und Oktober in Abb. 7-5) und Werten um eins im Sommer ( $H \approx \text{L.E.}$ ), wenn die Blätter voll entwickelt sind. Im Sommer 2003 hingegen wurde am Standort Hainich eine deutliche Verlagerung der Energie von latenter Wärme zu fühlbarer Wärme beobachtet (siehe August und September in Abb. 7-5). Aufgrund der stomatären Schließung im Sommer 2003 ist das Bowen-Verhältnis deutlich

angestiegen (von etwa eins auf fast vier) und zeigte somit ein Verhalten wie es sonst in mediterranen Ökosystemen beobachtet wird.

Großräumige Extremereignisse wie das Jahr 2003 können zu bedeutenden positiven Wechselwirkungen zwischen Biosphäre und Atmosphäre führen. So wurde im Sommer 2003 auf zentraleuropäischer Ebene etwa so viel  $\text{CO}_2$  durch die Vegetation in die Atmosphäre abgegeben, wie ansonsten in vier Jahren durch die Vegetation gebunden wird (CIAIS et al. 2005). An vielen zentraleuropäischen EC-Standorten fielen NEE, GPP und TER um 40 bis 60 % (GRANIER et al. 2007). Zusätzlich führte die Verschiebung von latenten zu fühlbaren Wärmeflüssen zu einer Erwärmung der Atmosphäre und somit zu weiterer Austrocknung durch geringere Niederschläge und niedrige Bodenfeuchte, also zu einer positiven Bodenfeuchte-Atmosphäre-Rückkopplung. (FISCHER et al. 2007, TEULING et al. 2010).

### 4.3 C-Bilanzen

Alle Standorte sind mehr oder weniger starke atmosphärische Netto- $\text{CO}_2$ -Senken. Die Beträge des NEP zeigen große standortabhängige und zwischenjährige Differenzen. Die Jahresbilanzen des NEP der hier untersuchten hohen Waldbestände liegen zwischen  $270 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  (Fichte, 735 m NN, 2009) und  $700 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  (Fichte, 380 m NN, 1999). Demgegenüber zeigen Grasland ( $60\text{-}180 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) und landwirtschaftlich genutzte Fläche ( $30\text{-}340 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) teilweise deutlich geringere Netto- $\text{CO}_2$ -Senken (Abb. 7-6). So beträgt das NEP des Graslandes nur etwa 10 bis 40 % des Fichtenbestandes (ASTW), die landwirtschaftlichen Nutzungen erreichen im Allgemeinen nur 5 bis 20 % (Ausnahme 2011).

Die betrachteten Ökosysteme unterliegen, mit Ausnahme des Hainich und der Feuchtstandorte, typischen Nutzungseinflüssen, die Auswirkungen auf die C-Bilanz haben. Der Altlichtenbestand im Tharandter Wald wird regelmäßig aufgelichtet und allmählich umgebaut (Pflanzungen unter anderem von Buchen). Seit Beginn der EC-Messungen gab es zwei größere Entnahmen von  $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (2002) beziehungsweise  $53 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (2011). Diese entsprechen einem C-Export von 1040 beziehungsweise  $920 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , welcher bilanzmäßig aber nicht vollständig als C-Quelle dem gleichen Jahr zugeordnet werden kann, da je nach Holznutzung (zum Beispiel Bauholz, Verarbeitung zu Pellets) eine längerfristige C-Fixierung vorliegen kann. Weiterhin bewirkte die Aufflichtung 2002 in Kombination mit dem Trockenjahr 2003 eine Reduzierung der Netto- $\text{CO}_2$ -Senke um  $110 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  (Differenz der Mittelwerte 1997-2001 und 2002-2007). Dieser Effekt hielt 6 Jahre an. Seit 2008 wurde das Niveau vor der Aufflichtung 2002 fast wieder erreicht.

Die Nettoprimärproduktion (NEP) des Fichtenbestandes in den Hochlagen des Osterzgebirges beträgt im Mittel der Jahre 2008-2011 54 % des Bestandes in der unteren Lage. Dies resultiert aus einer 17 % niedrigeren Bruttoprimärpro-

duktion bei fast gleich großer Gesamtatmung (94 %). Da die Beträge von Bruttoprimärproduktion (GPP) und Gesamtatmung (TER) wesentlich größer sind als das NEP, können kleine relative Änderungen bei diesen Komponenten generell große Auswirkung auf die Netto-CO<sub>2</sub>-Senke haben. Im genannten Zeitraum lag das GPP im Mittel bei 1740 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> (Hochlagen, OBB) beziehungsweise 2110 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> (untere Lagen, ASTW), das TER betrug 1410 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> (OBB) beziehungsweise 1500 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> (ASTW).

Das extensiv genutzte Grasland und die landwirtschaftliche Nutzfläche unterliegen jährlichen Nutzungseinflüssen. Das ungedüngte Grasland wird bis zu dreimal pro Jahr zur Futtergewinnung gemäht und gelegentlich im Herbst durch Kühe oder Schafe beweidet. Die durch Mahd exportierte Biomasse entspricht einem C-Äquivalent von 30-110 g C m<sup>-2</sup> je Schnitt beziehungsweise 90-160 g C m<sup>-2</sup> pro Jahr. Darüber hinaus wird das Grasland nach einem solchen Eingriff für 1 bis 2 Wochen zur Netto-CO<sub>2</sub>-Quelle. Ohne Berücksichtigung der exportierten Biomasse (NEP) war das Grasland im Mittel der Jahre 2005-2011 eine Netto-CO<sub>2</sub>-Senke von 150 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> (Abb. 7-6). Die Berücksichtigung des Biomassenexports in der C-Bilanz (Net Biome Productivity, NBP) bewirkt, dass das Grasland nur noch eine verschwindend kleine CO<sub>2</sub>-Senke von 5 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> darstellt (Abb. 7-6). Es ist somit bezüglich seiner Treibhausgaswirkung (ohne Berücksichtigung anderer Treibhausgase) neutral.

Auf dem organisch und mineralisch gedüngten Acker in Klingenberg erfolgte eine Ernte pro Jahr (ohne Zwischenfrucht). Auf Grund der unterschiedlichen Kulturen variierten die durch Ernte bedingten C-Exporte stark (mit Ausnahme des Raps wurde Korn und Stroh exportiert). Dieser reichte von 210 g C m<sup>-2</sup> (Raps, 2010, und Sommergerste, 2008) bis 520 g C m<sup>-2</sup> (Mais, 2007). Innerhalb des Betrachtungszeitraumes 2005-2011 erfolgten organische Düngungen 2006 und 2009 mit C-Importen von 470 g C m<sup>-2</sup> und 530 g C m<sup>-2</sup>. Bezüglich des NEP war die landwirtschaftliche Nutzfläche eine moderate CO<sub>2</sub>-Senke von durchschnittlich 55 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> (2005-2011). Nach Einbeziehung von C-Ex- und -Importen wird dieses intensiv genutzte Ökosystem zu einer CO<sub>2</sub>-Quelle von im Mittel 130 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>. Während dieses (willkürlich gewählten) Zeitraumes werden also total etwa 800 g C m<sup>-2</sup> freigesetzt. Allerdings fanden kurz vorher (7.8.2004) und nachher (25.3.2012) organische Düngungen mit einem C-Import von 680 g C m<sup>-2</sup> beziehungsweise 530 g C m<sup>-2</sup> statt. Bei Erweiterung des Bilanzzeitraumes mit der Einbeziehung der organischen Düngungen und Ernten 2004 und 2012 ist eine leichte Abschwächung der mittleren C-Freisetzung des Ackers zu erwarten. Wegen der größeren Entnahme und wahrscheinlich auch der Bodenbearbeitung muss also bei der landwirtschaftlichen Fläche in Klingenberg die Kohlenstoffbilanz des Bodens durch höhere organische Düngung ausgeglichen werden (PRESCHER et al. 2010).

Interessant ist eine Betrachtung des Verhältnisses von langfristige zu kurzfristige gespeichertem Kohlenstoff (NEP/GPP), also des Anteils des assimilierten CO<sub>2</sub>, welcher nach

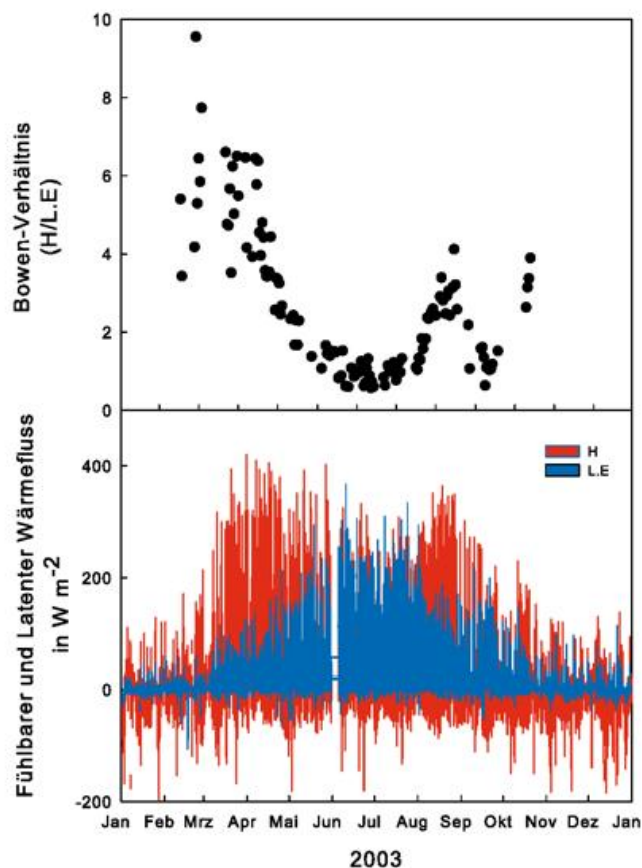


Abb. 7-5: Zeitlicher Verlauf des Bowen-Verhältnisses (oben, Tagesmittelwerte) und der latenten (L.E.) und fühlbaren (H) Wärmeflüsse (unten, Halbstundenwerte, ohne Schließungslückenkorrektur) im Sommer 2003 am Standort Hainich.

Abzug autotropher und heterotropher Atmungskomponenten im Ökosystem gespeichert wird. Bewirtschaftete Waldbestände sind diesbezüglich in Jahren ohne Eingriff wesentlich effektiver als Gras oder Acker (Abb. 7-8). Eine Aufflichtung (ASTW 2002) führt aber auch beim Wald zu einer vorübergehenden Abnahme von NEP/GPP. Hohe Waldbestände unterer Lagen speichern 25 bis 35 % der Bruttoprimärproduktion, Grasland und Acker dagegen im Allgemeinen nur 0 bis 15 %. Die auf Grundlage der EC-Messungen mögliche Aufteilung des NEP in TER und GPP lässt aber offen, ob der atmosphärische Kohlenstoff in der oberirdischen Biomasse festgelegt wird oder zu einer Erhöhung des Bodenkohlenstoffs führt. Die Dauer der Entlastung der Atmosphäre hängt von der Nutzung des Produktes (etwa als Bauholz oder als Brennholz) beziehungsweise vom Abbau im Boden ab.

### 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Verdunstung (latenter Wärmefluss) zeigt geringere Unterschiede zwischen den Landnutzungstypen und den Standorten, aber auch eine geringere Variabilität der Jahreswerte als der fühlbare Wärmefluss und der CO<sub>2</sub>-Fluss. Sie ist insbesondere über kurzen Beständen (zum Beispiel Grasland) die neben der Strahlungsbilanz dominierende Komponente der Energiebilanz (Ausnahme Trockenjahr 2003). Die bei EC-Messungen typischerweise feststellbare Schließungslücke

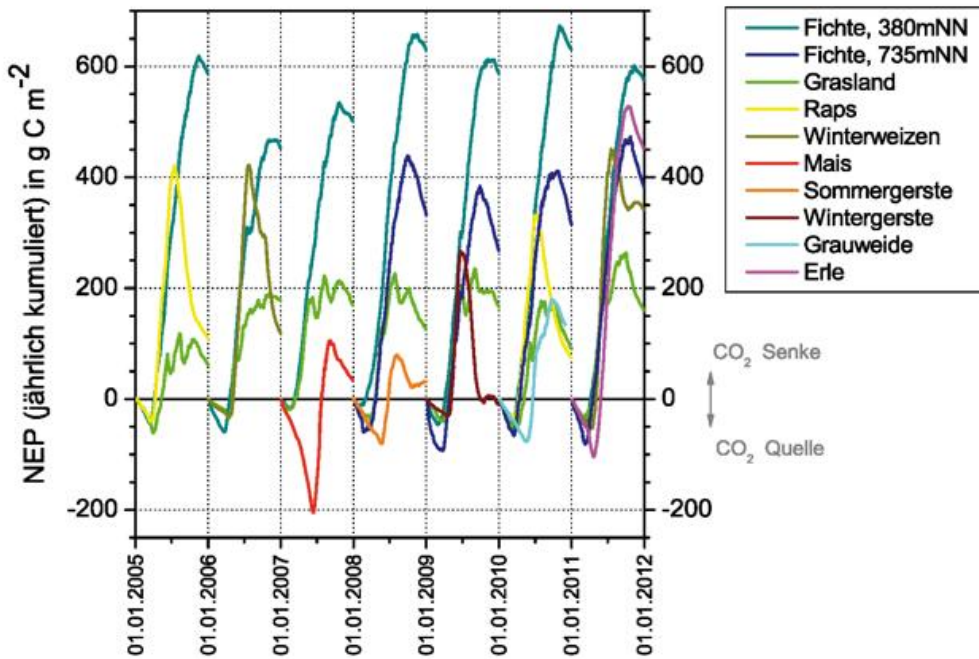


Abb. 7-6: Jährlich kumulierte Tageswerte des NEP in  $g\ C\ m^{-2}$  verschiedener Landnutzungen im Zeitraum 2005-2011.

eine moderate C-Quelle von etwa  $120\ g\ C\ m^{-2}\ a^{-1}$  auf. Das ungedüngte, aber genutzte Grasland (Mahd, Beweidung) ist dagegen klimaneutral mit einer fast ausgeglichenen C-Bilanz ( $C$ -Senke von  $5\ g\ C\ m^{-2}\ a^{-1}$ ). Die Waldstandorte mit hohen und alten Beständen zeigen ohne Berücksichtigung der Nutzung eine deutliche  $C$ -Senke von bis zu  $700\ g\ C\ m^{-2}\ a^{-1}$ . Durch Aufflichtungen im Rahmen von Waldumbaumaßnahmen können in Einzeljahren  $C$ -Exporte in der Größenordnung von  $1000\ g\ C\ m^{-2}\ a^{-1}$  zustande kommen.

Eine korrekte  $C$ -Bilanzierung der Waldbestände erfordert aber die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus des Bestandes:

(Summe aus latentem und fühlbarem Wärmefluss erreicht nicht die zur Verfügung stehende Energie) kann zur Korrektur der beiden Wärmeflüsse und damit auch der Verdunstung herangezogen werden. Die entsprechend korrigierten Jahreswerte der Verdunstung betragen im Raum Dresden für das Grasland etwa  $650\ mm$ , für einen Fichtenbestand im Tharandter Wald etwa  $550\ mm$  und für einen landwirtschaftlich genutzten Standort etwa  $400$  bis  $500\ mm$ , was bezüglich des korrigierten Niederschlags einem durchschnittlichen Anteil von  $58\%$ ,  $54\%$  beziehungsweise  $46\%$  entspricht. Ähnliche Werte sind für weite Teile Deutschlands mit einem vergleichbaren Wasserangebot bei ähnlichen Bodenbedingungen zu erwarten.

Begründung, Bewirtschaftung, Ernte und mögliche Störungen durch Sturm oder Waldbrand sowie die Kenntnis der Holznutzung, da je nach Weiterverarbeitung nicht der gesamte im Holz gebundene Kohlenstoff im Jahr der Aufflichtung klimarelevant freigesetzt wird. Ähnlich müssen bei landwirtschaftlichen Flächen komplette Fruchtfolgen aber auch die Düngung und sporadische Extremereignisse in die Bilanzierung einbezogen werden. Langfristmessungen sind dafür eine wesentliche Voraussetzung.

In dieser auf EC-Langfristmessungen basierenden Untersuchung wird nur der Austausch des wichtigsten Treibhaus-

Terrestrische Ökosysteme können auf verschiedenen Zeitskalen Senken oder Quellen von Treibhausgasen sein. Wesentlichen Einfluss auf den Austausch von Treibhausgasen haben Witterung und Klima sowie die Landnutzung des Standortes, modifiziert durch Nutzungseinflüsse wie forstliche Maßnahmen, Ernte oder Düngung, also der Bewirtschaftung oder dem Management. Von den hier vorgestellten Landnutzungen weist die Landwirtschaft hinsichtlich der NBP ( $C$ -Bilanz einschließlich der nutzungsbedingten  $C$ -Exporte und -Importe)

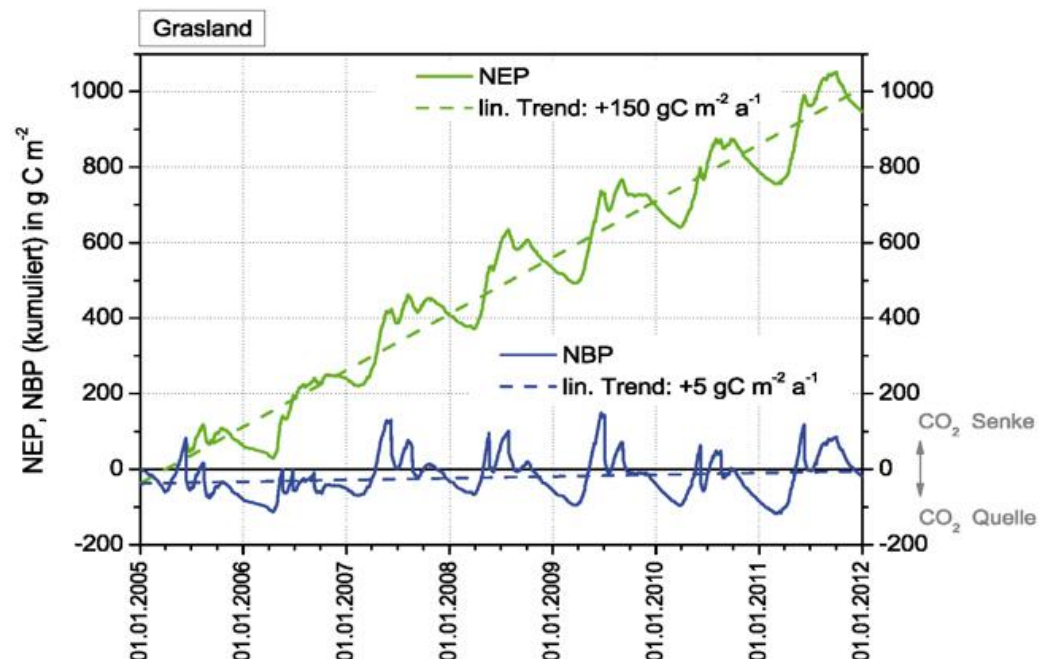


Abb. 7-7: Kumulative Darstellung des NEP und NBP des Graslandes sowie deren lineare Trends für den Zeitraum 2005-2011 (senkrechte Abnahme im Verlauf des kumulativen NBP kennzeichnet den  $C$ -Export zum Mahdtermin).

gases CO<sub>2</sub> betrachtet. Für Fragen des Klimaschutzes ist aber nicht ein einzelnes Treibhausgas von Interesse, sondern das gesamte Treibhauspotential von unterschiedlichen Landoberflächen inklusive Methan und Lachgas. Bei Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Äquivalente anderer Treibhausgase, der Änderung des im Boden gebundenen Kohlenstoffs, von Störungen wie Windbruch und Waldbrand, des Verlustes von gelöstem Kohlenstoff, schließlich des Ernteeingriffs selbst sowie des zur Bewirtschaftung verbrauchten Treibstoffs kann eine komplette Treibhausgasbilanz aufgestellt werden. Es ist zu erwarten, dass gerade bei der landwirtschaftlichen Fläche Managementeffekte (zum Beispiel Düngung) einen starken Einfluss auf die Klimawirkung haben und die Klimawirkung daher gesteuert werden kann. Sie sind daher beim Klimaschutz genauso wichtig wie zum Beispiel die Waldflächen.

Großräumige Extremereignisse wie das Trockenjahr 2003 können zu bedeutenden positiven Wechselwirkungen zwischen Biosphäre und Atmosphäre führen. An vielen zentraleuropäischen EC-Standorten fielen Bruttoprimärproduktion, Ökosystematmung und daraus resultierend der Netto-CO<sub>2</sub>-Austausch um 40-60 %. Zusätzlich führte die Verschiebung von latenten zu fühlbaren Wärmeflüssen zu einer ungewöhnlich starken Erwärmung der Atmosphäre. Da laut Klimamodellen solche extremen Ereignisse in Zukunft in Häufigkeit und Intensität zunehmen könnten, ist es wichtig aus Freilandbeobachtungen zu lernen, wie terrestrische Ökosysteme auf solche Extreme reagieren. Dafür liefern die langfristigen Monitoring-Programme, wie ICOS-D (deutscher Beitrag zum „Integrated Carbon Observation System“), in dem die deutschen Aktivitäten ab 2012 gebündelt werden, die notwendigen Daten.

**Danksagung**

Die langfristigen EC-Messungen wären ohne die Förderung insbesondere der EU im Rahmen diverser Projekte (unter anderem EUROFLUX, CARBOEUROPE-IP) nicht möglich gewesen. Die Umsetzung und Betreuung dieses Messprogramms mit außerordentlich wenigen Datenlücken ist auch das Verdienst insbesondere der technischen Mitarbeiter (Professur Meteorologie der TU Dresden, Abteilung Bioklimatologie der Universität Göttingen und Abteilung Freiland des Max-Planck Institutes für Biogeochemie in Jena). Ihr Einsatz oft auch im Hintergrund kann nicht hoch genug geschätzt werden. Die TU Dresden dankt der sächsischen Forstverwaltung und der Colmnitzer Agrargenossenschaft, die Abteilung Bioklimatologie der Verwaltung des Nationalparks Hainich für die unkomplizierte Zusammenarbeit und hilfreiche Unterstützung.

**Literatur**

BENISTON, M., 2004: The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on swiss

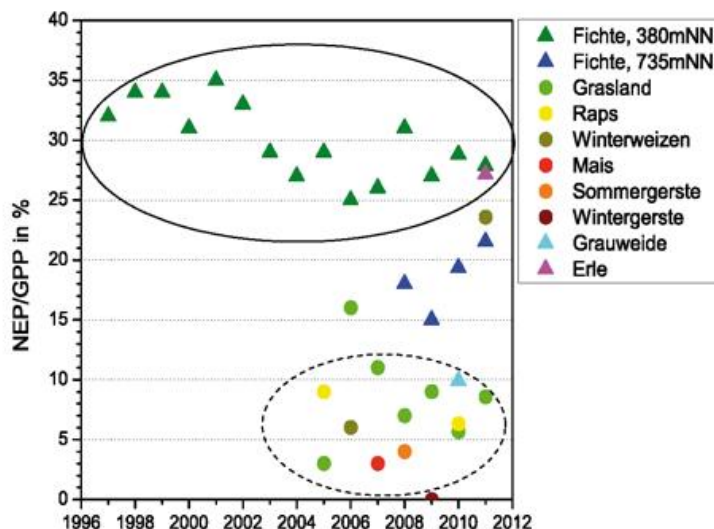


Abb. 7-8: Verhältnisse der Jahreswerte von NEP und GPP 1997-2011, markiert sind typische Werte hoher Waldbestände der unteren Lagen (durchgezogene Linie) sowie von Grasland/landwirtschaftlicher Nutzung (gestrichelte Linie).

climatological data and model simulations. *Geophysical Research Letters* **31**, 2, L02202.

BERNHOFER, C., AUBINET, M., CLEMENT, R., GRELLE, A., GRÜNWARD, T., IBROM, A., JARVIS, P., REBMANN, C., SCHULZE, E.-D. AND J. D. TENHUNEN, 2003: Spruce forests (Norway and Sitka spruce, including Douglas fir): Carbon and water fluxes and balances, ecological and ecophysiological determinants. In: *Ecological Studies* **163**, Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests (R. Valentini ed.), 99-123.

BERNHOFER, C., SPANK, U., CLAUSNITZER, F., KÖSTNER, B., GRÜNWARD, T., EICHELHANN, U., MENZER, A., FEGER, K.-H., SCHWÄRZEL, K., 2011: Mikrometeorologische, pflanzenökologische und bodenphysiologische Messungen in Fichten- und Buchenbeständen im Tharandter Wald. *Waldökologie, Landesforschung und Naturschutz* **12**, 17-28.

CIAIS P., VIOVY N., REICHSTEIN M., GRANIER A., et al., 2005: Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* **437**, 529-533.

DELLA-MARTA, P.M., HAYLOCK, M.R., LUTERBACHER, J., WANNER, H., 2007: Doubled length of western european summer heat waves since 1880. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* **112**, D15.

FISCHER, E.M., SENEVIRATNE, S.I., LUTHI, D., SCHAR, C., 2007: Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves. *Geophysical Research Letters* **34**, 6, L06707.

FLEXAS, J., RIBAS-CARBO, M., BOTA, J., GALMES, J., HENKLE, M., MARTINEZ-CANELLAS, S., MEDRANO, H., 2006: Decreased rubisco activity during water stress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO<sub>2</sub> concentration. *New Phytologist* **172**, 1, 73-82.

- FOKEN, T., 2008: The energy balance closure problem: an overview. *Ecological Applications* **18**, 6, 1351–1367.
- GOLLAN, T., PASSIOURA, J.B., MUNNS, R., 1986: Soil-water status affects the stomatal conductance of fully turgid wheat and sunflower leaves. *Australian Journal of Plant Physiology* **13**, 4, 459-464.
- GRANIER A. M., REICHSTEIN, N., BREDA, I.A., et al., 2007: Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology* **143**, 123-145.
- GRÜNWALD, T., BERNHOFER, CH., 2007: A decade of carbon, water and energy flux measurements of an old spruce forest at the Anchor Station Tharandt. *Tellus* **59B**, 387-396.
- KNOHL, A., SCHULZE, E.D., KOLLE, O., BUCHMANN, N., 2003: Large carbon uptake by an unmanaged 250-year-old deciduous forest in Central Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* **118**, 3-4, 151-167.
- LUTERBACHER, J., DIETRICH, D., XOPLAKI, E., GROSJEAN, M., WANNER, H., 2004: European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science* **303**, 5663, 1499-1503.
- MARTIN, PH.H., VALENTINI, R., JAQUES, M., et al., 1998: New Estimate of the Carbon Sink Strength of EU Forests integrating Flux Measurements, Field Surveys and Space Observations: 0,17-0,35 Gt. *Ambio* **27**, 582-584.
- MEEHL, G.A., TEBALDI, C., 2004: More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science* **305**, 5686, 994-997.
- PANIN, G.N., BERNHOFER, CH., 2008: Parametrization of Turbulent Flux over Inhomogeneous Landscapes. *Atmospheric and Oceanic Physics* **44**, 701-716.
- PRESCHER, A.-K., GRÜNWALD, T., BERNHOFER, C., 2010: Land use regulates carbon budgets in eastern Germany: from NEE to NBP. *Agricultural and Forest Meteorology* **150**, 1016-1025.
- REICHSTEIN, M., CIAIS, P., PAPAIE, D., et al., 2006: Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly: a joint flux tower, remote sensing and modelling analysis. *Global Change Biology* **12**, 1-18.
- SCHULZE, E.-D., LUYSSAERT, S., CIAIS, P., et al., 2009: Importance of methane and nitrous oxide for Europe's terrestrial greenhouse-gas balance. *Nature Geoscience* **2**, 842-850.
- TEULING, A.J., SENEVIRATNE, S.I., STÖCKLI, R., et al., 2010: Contrasting response of European forest and grassland energy exchange to heatwaves. *Nature Geoscience* **3**, 722-727.
- TWINE, T. E., KUSTAS, W. P., NORMAN, J. M., COOK, D. R., HOUSER, P. R., MEYERS, T. P., PRUEGER, J. H., STARKS, P. J., WESLEY, M. L., 2000: Correcting Eddy-Covariance Flux Underestimates over a Grassland. *Agricultural and Forest Meteorology* **103**, 279-300.
- VALENTINI, R., MATTEUCCI, G., DOLMAN, A. J., et al., 2000: Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* **404**, 861-865.
- WILSON k.B., GOLDSTEIN, A., FALGE, E., AUBINET, et al., 2002: Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology* **113**, 223-243.

V. GOLDBERG, H. MAYER, D. SCHINDLER, D. SÖHL, C. BERNHOFER

# 8 Entwicklungen in der Forstlichen Meteorologie

## Progress in Forest Meteorology

### Zusammenfassung

Die Forstmeteorologie ist ein sehr traditionsreiches Fachgebiet. Forstmeteorologische Fragestellungen werden, zum Beispiel begleitend zur Entwicklung der planmäßigen Waldbewirtschaftung, bereits seit mehr als 150 Jahren untersucht. Die Bedeutung der forstlichen Meteorologie ergibt sich bereits aus dem Fakt, dass Wälder mit einem Anteil von etwa 30 % Anteil eine der dominantesten Landoberflächeneigenschaft der Erde sind. Aber die Waldflächen verringern sich kontinuierlich, verursacht durch wachsenden Bevölkerungsdruck, ökonomische Interessen (Landwirtschaft, Biotreibstoffe, Bergbau), Luftverschmutzung und dem Wandel von Klima und Wasserhaushalt. Damit ergeben sich heute, neben der Beschreibung „klassischer“ Instrumente der Forstmeteorologie wie zum Beispiel der Erfassung des Bestandesklimas mit modernen Methoden, neue Themenbereiche wie die Quantifizierung von Wechselwirkungen des Waldes mit der Atmosphäre in einer anthropogen veränderten Landschaft auf unterschiedlichen Skalen. Die meteorologischen Aspekte der klassischen „Wohlfahrtswirkungen des Waldes“ finden sich unter dem modernen Begriff der Ökosystemdienstleistungen wieder oder als Waldfunktionen (Nutzung, Schutz und Erholung).

### Summary

Forest meteorology is a very traditional scientific subject. Questions of forest meteorology have been investigated, for example, since 150 years, mostly as „accompanying part“ of a systematic forest management. Importance of forest meteorology is due to the fact that about 30 percent of Earth's surface is covered by forests making this land use to one of the most dominant land surface characteristics of the Earth. But forest areas decrease continuously caused by growing population pressure, economic interests (e.g., food production, bio fuels, mining), air pollution and change of climate and water budget. Therewith, besides „classical“ instruments of forest meteorology like measurement of stand climate with new methods, new areas has been established, as for example the quantification of interactions between forests and the atmosphere in a human-induced changing landscape on different spatiotemporal scales. Meteorological aspects of the classical „welfare effects of the forest“ can be found in the modern term of ecosystem services or as forest functions (use, protection and recreation).

## 1 Einleitung

### 1.1 Bedeutung des Waldes als Landoberflächentyp

Wald stellt im globalen Maßstab mit derzeit etwa 30 % eine der bedeutendsten Landbedeckungen dar (FAO 2010). Gleichzeitig sind Wälder auch der Landoberflächentyp, der historisch am stärksten anthropogen reduziert wurde. Während große Areale in Russland und Kanada sowie im Amazonas- und Kongobecken noch von Primärwäldern bedeckt sind, gibt es in Mittel- und Westeuropa fast ausschließlich forstwirtschaftlich genutzte Waldflächen.

Von den ursprünglich auf etwa 66 Millionen km<sup>2</sup> vorhandenen Waldflächen wurden durch menschliche Eingriffe etwa 39 % vernichtet. Die verbliebenen etwa 40 Millio-

nen km<sup>2</sup> teilen sich auf in 36 % Primärwälder, 57 % naturnahe Sekundärwälder und 7 % Forsten (FAO 2010 und 2011). Die Änderung der globalen Waldbedeckung in der Zukunft hängt sowohl von der klimatischen als auch der sozioökonomischen Entwicklung ab.

In der modernen Industriegesellschaft dient Wald vor allem als Holzlieferant für die Anwendung in der Papier-, Zellstoff-, Bau- und Möbelindustrie, sowie als Energieträger. In Entwicklungsländern ist Wald primär Lieferant für Brenn- und Bauholz. In den letzten Jahrzehnten hat die Schutz- und Sozialfunktion des Waldes zunehmend an Bedeutung gewonnen. Waldgebiete dienen in Ballungsräumen als Naherholungsgebiete sowie stadtklimatisch als Kalt- beziehungsweise Frischluftquellen. In Hochgebirgen haben Wälder zusätzlich eine wichtige Schutzfunktion vor Lawinen, Muren und Erosion.

## 1.2 Bedeutung der Forstmeteorologie als Teilgebiet der Biometeorologie

Die Forstliche Meteorologie zählt neben Agrar- und Human-Biometeorologie zur Biometeorologie und beschäftigt sich mit den Wechselwirkungen forstlicher Systeme zur atmosphärischen Umgebung. Die Bäume als „Einzelelemente“ der Waldsysteme fungieren als effektive „Schnittstellen“ für den Austausch von Energie und Spurenstoffen zwischen Boden und Atmosphäre (siehe Beitrag 7 in diesem Heft), so dass neben den Wetter-, Witterungs- und Klimabedingungen die Bodeneigenschaften eines Standortes (Wasserhaushalt, Nährstoffangebot) entscheidenden Einfluss auf Wachstum und Stabilität eines Waldökosystems nehmen.

Neben ihrem traditionellen Tätigkeitsfeld - der Analyse und Aufarbeitung von Wetter- und Klimadaten als wesentlicher Voraussetzung für einen standortgerechten Waldbau (siehe Kapitel 2) - beschäftigt sich die moderne Forstmeteorologie schwerpunktmäßig mit folgenden Aufgabenfeldern:

- Analyse von Naturgefahren für Wälder, hervorgerufen durch wetterbedingte Extreme:
  - direkte Wirkung: Sturm, Frost, Dürre, Waldbrand, Schnee/Eis, Hochwasser (siehe Beitrag 10 in diesem Heft)
  - indirekte Wirkung: Immission von Luftschadstoffen (zum Beispiel Schwefeloxide, Ozon), Wild- und Insektenkalamitäten
- Wohlfahrtswirkung des Waldes (Wechselwirkung des Waldes mit der Umwelt des Menschen)
- Quantifizierung der Randbedingungen für die Funktion der Waldsysteme
  - als Hochwasser- (siehe Beitrag 9 in diesem Heft) und Immissionsschutz
  - für Kur- und Erholungsklima, insbesondere auch in urbanen Räumen
  - als Stabilisierungsfaktor von Stoffkreisläufen (Kohlenstoff, Stickstoff)

## 2 Klassische Forstmeteorologie

### 2.1 Problemstellung

Unter Bezug auf die Wechselwirkungen zwischen atmosphärischer Umwelt und den räumlichen Einheiten „Einzelbaum“ (Abb. 8-1), „Bestand“ (Abb. 8-2) und „Wald als Landnutzung“ (Abb. 8-3) beschäftigt sich die klassische Forstmeteorologie hauptsächlich mit den dafür relevanten, atmosphärischen Prozessen und daraus resultierenden Zuständen, und zwar sowohl am Standort als auch im Lebensraum von einzelnen Bäumen und Waldbeständen. Traditionelle Beispiele dafür sind (i) das Waldklima, (ii) die Strahlungs-, Wärme-, Wasser-, Impuls- und Stoffbilanz von Wäldern, (iii) das Klima am Waldstandort, (iv) die Rückwirkungen des Waldklimas auf das Klima größerer Regionen, in die Wälder



Abb. 8-1: Einzelbaum im südlichen Schwarzwald bei Freiamt.



Abb. 8-2: Waldkiefernbestand (*Pinus sylvestris* L.) im Bereich der Forstmeteorologischen Messstelle Hartheim des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg in der südlichen Oberrheinebene.



Abb. 8-3: Beispiel für Wald als Landnutzung im komplexen Gelände bei Möhringen (Schwäbische Alb).

eingebettet sind, (v) die Zusammenhänge zwischen atmosphärischer Umgebung und der Entwicklung von Forstpflanzen sowie (vi) atmosphärische Gefahren für Wälder, die durch Wetter, Witterung und Klima sowie Luftbelastungen verursacht sein können (unter anderem GEIGER 1961, BAUMGARTNER 1967a, b, MITSCHERLICH 1981, FLEMMING 1994). In jüngerer Zeit kommen weitere Bereiche hinzu, wie „Urban Fore-

stry“, die atmosphärischen Auswirkungen von großflächigen Entwaldungen und die forstlich relevante Kennzeichnung des Klimawandels hinsichtlich der Konsequenzen für das Waldwachstum und die Baumartenzusammensetzung.

Da es sich bei Bäumen und Waldbeständen um relativ langlebige und dynamische Objekte handelt, sind für forstmeteorologische Fragestellungen nicht nur Baum- und Bestandesart von Bedeutung. Es muss auch die Wuchsdynamik von Beständen berücksichtigt werden. Sie lässt sich über die zeitliche Entwicklung von mittlerer Bestandeshöhe und Bestandesdichte quantifizieren (Abb. 8-4). Zwei Kenngrößen aus dem Ansatz für das vertikale Windprofil über Wäldern, die Rauigkeitslänge und Nullpunktverschiebung, zeigen zum Beispiel eine deutliche Abhängigkeit von der Bestandeshöhe (Abb. 8-5).

Aufgrund der vielfältigen Funktionen von Einzelbaum, Bestand und Wald sowie damit zusammenhängender Herausforderungen ist der Stellenwert der klassischen Forstmeteorologie auf seinem hohen Niveau verblieben. Ausschlaggebend ist dafür unter anderem auch, dass es viele, fast schon als traditionell zu bezeichnende Fragestellungen (unter anderem MAYER 1982) gibt, für die immer noch belastbare Resultate in Form von Funktionen und Zahlen fehlen. Beispielhaft seien hier forstmeteorologische Variable, die das Bestandesklima kennzeichnen, in Abhängigkeit von Baumart, Bestandesdichte, Überschirmungsgrad und Geländeeigenschaften genannt.

### 2.2 Untersuchungsmethoden

Vor dem Hintergrund unterschiedlicher zeitlicher Skalen sowie der drei räumlichen Einheiten „Einzelbaum“, „Bestand“ und „Wald als Landnutzung“ sind die Ansätze in Untersuchungen in der klassischen Forstmeteorologie recht variabel. Da in den letzten Jahren eine prozessbezogene Betrachtungsweise immer stärker in den Vordergrund gerückt ist, müssen sich die einzusetzenden Methoden daran orientieren, damit wirkungsbezogene Ergebnisse in quantitativer Form erzielt werden. Ideal dafür ist ein aufeinander abgestimmtes Untersuchungsdesign, das aus experimentellen Verfahren in und über Wäldern, Modellierungen und numerischen Simulationen, statistischen Analysen sowie Biomonitoring (zum Beispiel Beobachtungen zum Eintrittstermin von phänologischen Phasen von Waldbäumen) besteht.

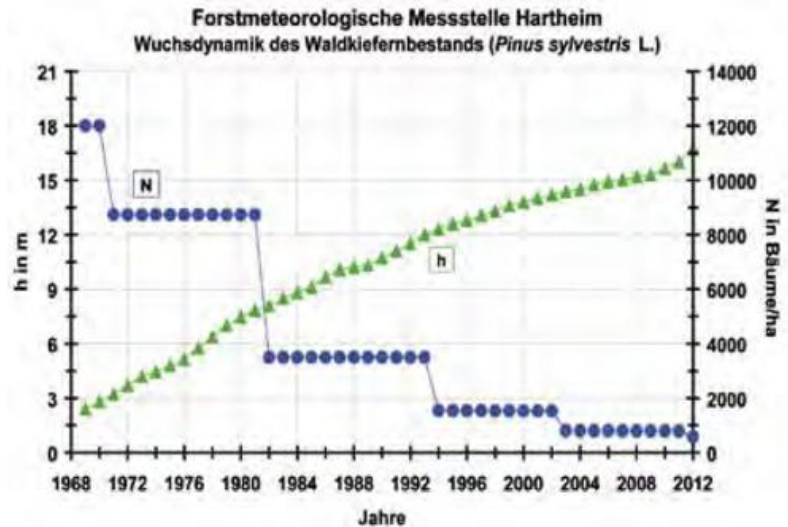


Abb. 8-4: Zeitliche Entwicklung von mittlerer Bestandeshöhe h und Bestandesdichte N des Waldkiefernbestands an der Forstmeteorologischen Messstelle Hartheim.

Aus der alleinigen Erfassung von einzelnen Klimaelementen wie Lufttemperatur oder Niederschlag lassen sich die vielfältigen Anforderungen an forstmeteorologische Daten nicht ausreichend erfüllen (unter anderem AMARO et al. 2002, VALENTINI 2003, LANDSBERG und SANDS 2011, BERNHOFER et al. 2011). So sind neben Transportprozessen die lokalen Strahlungs- und Wärmeflussdichten für die Analyse der thermischen Bedingungen in und über Wäldern entscheidend. Die in Zusammenhang mit der Photosynthese früher verwendete Größe „Licht“ ist inzwischen weitgehend durch die wirkungsbezogene photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) abgelöst worden. Die Quantifizierung der forstlich relevanten Wasserflüsse setzt Informationen über Freilandniederschlag, Bestandesniederschlag und Bodenfeuchte voraus. Zum Verständnis der stationären und dynamischen Wechselwirkungen zwischen der Strömung und Bäumen beziehungsweise Wäldern sind Angaben zur Windgeschwindigkeit in verschiedener räumlicher und zeitlicher Auflösung erforderlich.

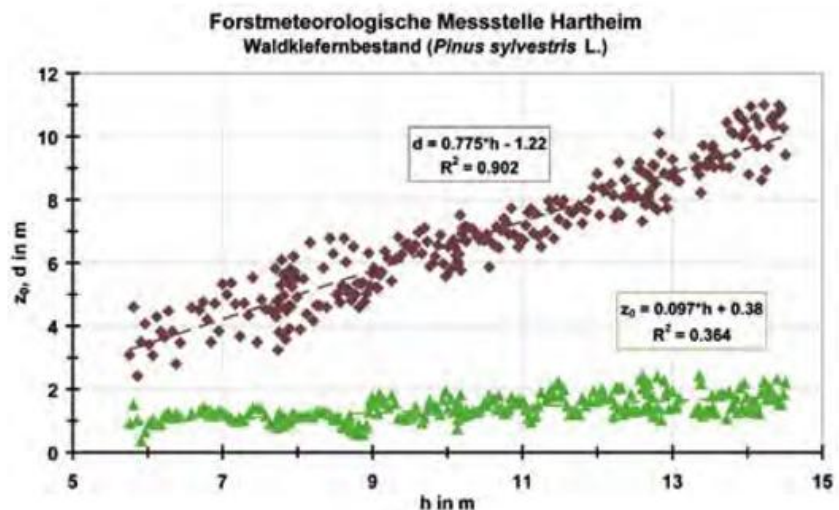


Abb. 8-5: Rauigkeitslänge  $z_0$  und Nullpunktverschiebung d in Abhängigkeit von der Bestandeshöhe h für den Waldkiefernbestand an der Forstmeteorologischen Messstelle Hartheim (nach IMBERY 2005).



Abb. 8-6: Regenrinnen an der Forstmeteorologischen Messstelle Hartheim zur Erfassung des bestandesrepräsentativen Kronendurchlasses unter einem aufgelockerten Kronenschirm.



Abb. 8-7: Forstmeteorologische Bodenstation in einem Buchenbestand bei Möhringen.



Abb. 8-8: Messturm auf der Forstmeteorologischen Messstelle Hartheim.

Bei experimentellen Untersuchungen in der klassischen Forstmeteorologie auf der räumlichen Skala „Bestand“ besteht das Problem, trotz der kleinräumigen Variabilität von forstmeteorologischen Variablen unter dem Kronenschirm – verursacht durch Kronenschirmdichte und Kronenschlussgrad – Ergebnisse zu erzielen, die für den Bestand repräsentativ sind. Diese Problematik bezieht sich insbesondere auf (i) kurzweilige Strahlungsflussdichten aus dem oberen Halbraum (direkte Sonnenstrahlung, PAR), (ii) Oberflächentemperatur, (iii) Windgeschwindigkeit und (iv) Kronendurchlass. Die Zielsetzung von repräsentativen Resultaten für Waldbestände hat zur Folge, dass kurzfristige Messkampagnen wenig zielführend sind und daher längerfristige Messungen durchgeführt werden sollten. Dafür lassen sich verschiedene Verfahren anwenden: (i) systematische Verteilung von mehreren, kontinuierlich operierenden Messwertgebern ortsfest im Bestand (Abb. 8-6), (ii) mobile Messplattformen, die in geeigneter Weise durch den Bestand fahren, (iii) ortsfeste forstmeteorologische Basisstation (Abb. 8-7) und ergänzende temporäre Messungen von ausgewählten forstmeteorologischen Variablen in einem engmaschigen Gitternetz im Bestand.

Die Durchführung von messtechnischen Verfahren in Wäldern ist wegen der dreidimensionalen Struktur von Wäldern und der Wuchsdynamik während ihrer Umtriebszeit vergleichsweise aufwändig. Um der dreidimensionalen Struktur Rechnung zu tragen, sind experimentelle Untersuchungen nicht nur in der oberflächennahen Bodenschicht und bodennahen Luftschicht, sondern auch in mehreren Höhen im Stammraum und Kronenraum sowie über dem Wald erforderlich. Dafür eignen sich meteorologische Messtürme, wie an der Forstmeteorologischen Messstelle Hartheim in der südlichen Oberrheinebene (Abb. 8-8). Damit lassen sich nicht nur die forstmeteorologischen Bedingungen über einem Bestand (Abb. 8-9) – als Referenz für die forstmeteorologischen Bedingungen im und unter dem Kronenschirm – erfassen, sondern sie eignen sich auch als Plattform für Messsysteme zur Bestimmung von turbulenten Flussdichten über dem Bestand. Für Vergleiche von Ergebnissen, die für verschiedene Bestände über forstmeteorologische Messtürme ermittelt wurden, ist es notwendig, die relative Höhe  $z/h$  ( $z$  Messhöhe über dem Waldboden,  $h$  Bestandeshöhe) als Vertikalkoordinate zu verwenden. Besteht aus verschiedenen Gründen keine Möglichkeit, forstmeteorologische Messtürme zu errichten, werden die forstmeteorologischen Bedingungen über dem Wald – sofern es möglich ist – über geeignete Messungen auf einer nahen Freifläche approximiert. Diese Variante wird oft bei Waldklimastationen (Abb. 8-10) angewendet, um Hinweise auf Globalstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchte und Niederschlag über dem Wald zu erhalten.

Da aus verschiedenen Gründen die Einrichtung von gesonderten forstmeteorologischen Messstellen nicht immer möglich war, versuchten Forstwissenschaft und Forstwirt-



Abb. 8-9: Messwertgeber für die kurzwelligen (rechts hinten) und die langwelligen Strahlungsflussdichten (links hinten) aus der oberen und unteren Hemisphäre über einem Buchenbestand bei Möhringen sowie für die UV-A/B-Strahlung (links vorne) und PAR (rechts vorne) aus der oberen Hemisphäre.



Abb. 8-10: Freifläche der Waldklimastation Kreuth in den Alpen, betrieben von der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF (Foto: RASPE 2001).

schaft, dieses Defizit durch die Verwendung von meteorologischen Daten von permanenten Stationen der nationalen Wetterdienste zu beheben. Der Ansatz stellt allerdings nur eine grobe Approximation dar, weil diese Stationen, die primär nicht für forstliche Zwecke eingerichtet wurden, häufig in Siedlungsnähe, das heißt außerhalb von Waldstandorten, liegen. Die Übertragbarkeit der dort gemessenen meteorologischen Daten auf Waldstandorte stellt insbesondere im komplexen Gelände ein Problem dar, das vor allem für den Freilandniederschlag noch nicht zufriedenstellend gelöst ist. Auch werden an den Stationen der Wetterdienste nicht alle Variablen erfasst, die forstmeteorologisch von Interesse sind, wie etwa PAR, Bodenfeuchte oder Bestandesniederschlag.

Diese Problematik wurde insbesondere in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts offensichtlich, als im Rahmen von Untersuchungen zum Komplex der neuartigen Waldschäden die zeitliche Entwicklung der

atmosphärischen Randbedingungen für Wälder möglichst standortspezifisch analysiert werden sollte. Der damals erkannte Mangel an geeigneten forstmeteorologischen Daten hat in manchen Bundesländern Deutschlands dazu geführt, dass von den landesspezifischen Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalten eigene Waldklimastationen eingerichtet wurden. So betreibt die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft auf Beschluss des Bayerischen Landtags seit 1989/1991 das Messnetz der Bayerischen Waldklimastationen. Es umfasst derzeit 16 vollständige Stationen und zwei meteorologische Stationen an Waldstandorten, die über das gesamte Bundesland Bayern verteilt sind. Die Waldklimastationen sind in ein internationales Netz von Dauerbeobachtungsflächen eingebunden, das vom Nordkap bis zu den Kanaren reicht. Sie dienen der intensiven Überwachung von Umweltbelastungen und ihrer Wirkung auf Wälder (Level II-Flächen). An den Waldklimastationen werden langfristig neben forstmeteorologischen Variablen noch weitere, forstlich relevante Größen (zum Beispiel Stoffeinträge aus der Atmosphäre oder Stoffkonzentrationen der Bodenlösung der Humusaufgabe) und forstliche Reaktionen wie Eintrittstermin von Phänophasen, Wachstum der Bäume oder Kronenzustand erhoben.

Zur Beschreibung von Prozessen und daraus resultierenden Zuständen, die auf Wälder bezogen sind, existieren verschiedene Modelle in unterschiedlicher Raum- und Zeitskala. Beispielhaft seien hier das hoch auflösende Boden-Vegetation-Atmosphären-Modell HIRVAC (GOLDBERG und BERNHOFER 2001) sowie die forsthydrologischen Modelle BROOK90 (FEDERER et al. 2003) und DNDC (LI et al. 1992) erwähnt. Über BROOK90 und DNDC lassen sich die Komponenten der Wasserbilanz von Wäldern nicht nur in homogenem, sondern auch komplexem Gelände simulieren (HOLST et al. 2010, SCHWÄRZEL et al. 2011). Der daraus berechenbare Transpirationsindex stellt ein geeignetes Maß

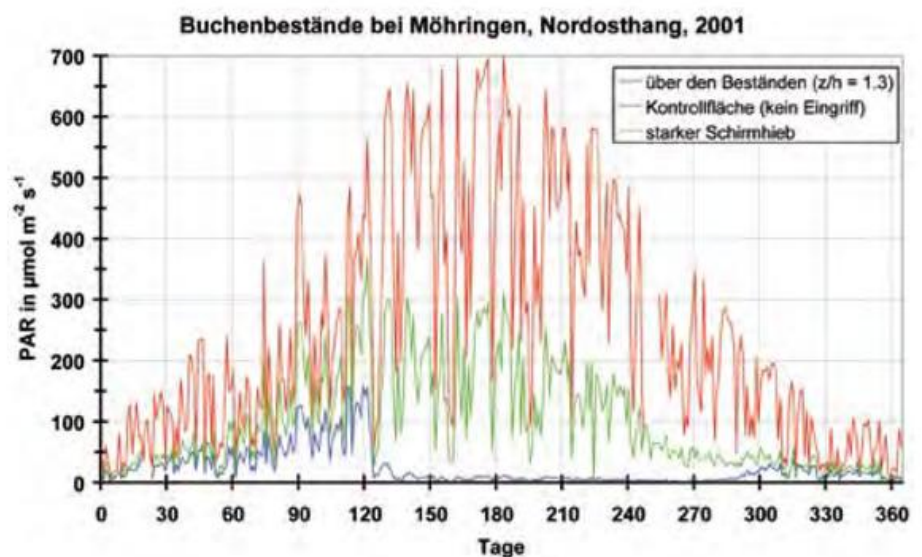


Abb. 8-11: Tagesmittelwerte der photosynthetisch aktiven Strahlung PAR in 1,5 m Höhe über Grund in Buchenbeständen und darüber auf einem Nordosthang bei Möhringen im Jahr 2001 (nach MAYER et al. 2002).

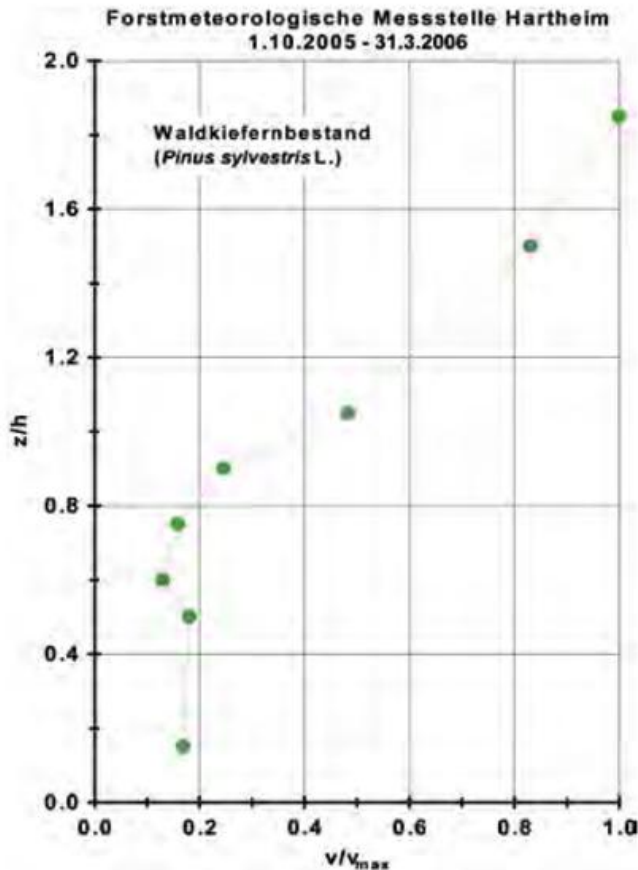


Abb. 8-13: Mittleres vertikales Profil der normierten Windgeschwindigkeit  $v/v_{max}$  ( $v_{max}$ : Windgeschwindigkeit in der relativen Höhe  $z/h = 1,85$ ) in und über dem Waldkiefernbestand an der Forstmeteorologischen Messstelle Hartheim (nach SCHINDLER 2008); Grundlage: kontinuierliche Messungen der Komponenten des dreidimensionalen Windvektors über Ultraschallanemometer in verschiedenen Höhen.

für die Quantifizierung von forstlich relevanter Wasserknappheit dar (WELLPOTT et al. 2005).

### 2.3 Ergebnisse

Verfügbare Ergebnisse zur klassischen Forstmeteorologie beziehen sich weitgehend auf Phänomene von Bestandes- und Standortsklima, die bodennahe Luftschicht bei pflanzenbedecktem Boden sowie den Einfluss der Geländegestaltung auf das Mikroklima. Sie basieren meistens auf experimentellen Untersuchungen und sind in der älteren Literatur (unter anderem GEIGER 1961, BAUMGARTNER 1967a, b, MITSCHERLICH 1981) detailliert beschrieben. Darüber hinaus eignen sich Messwerte von forstmeteorologischen Variablen in besonderer Weise für die notwendige Validierung von Resultaten aus Simulationsberechnungen.

Veränderungen in der Kronenschirmdichte, die sich über den Pflanzenflächenindex

PAI beziehungsweise Blattflächenindex LAI quantifizieren lassen, spiegeln sich im Bestandesklima wider. Extremwerte (zum Beispiel Tagesmaxima und -minima) der Lufttemperatur unter dem Kronenschirm reagieren deutlich stärker als ihre Mittelwerte auf PAI- beziehungsweise LAI-Variationen. Die Verfügbarkeit von PAR ist für Baumwachstum einschließlich der Entwicklung des Unterwuchses in Beständen entscheidend. Am Beispiel des Jahresgangs von PAR in Buchenbeständen in komplexen Gelände (Abb. 8-11) lässt sich erkennen, dass das über den Beständen vorhandene PAR-Angebot in der laubfreien Phase selbst bei einem starken Schirmhieb ( $PAI = 0,6$ ) nicht komplett den Waldboden erreicht. Für die unbehandelte Kontrollfläche reduziert sich PAR in der laubfreien Phase ( $PAI = 1,1$ ) erheblich nach dem Einsetzen der Blatentfaltung ( $PAI = 5,2$ ) und steigt erst nach dem Blattfall im Herbst wieder leicht an. Gemittelt über das Jahr 2001 betrug PAR über den Buchenbeständen  $243 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Davon erreichten den Waldboden bei der starken Schirmhiebfläche 40 % und bei der Kontrollfläche nur 9 %. Der Einfluss der über PAI angegebenen Kronenschirmdichte auf PAR zeigt sich deutlich bei der Interzeption von PAR im Kronenschirm (iPAR) und Transmission von PAR durch den Kronenschirm (tPAR). Auf der Grundlage von PAR-Messwerten für verschiedene Buchenbestände bei Möhringen steigt iPAR exponentiell mit größerem PAI an, während tPAR – ebenfalls exponentiell – abnimmt (Abb. 8-12). Der Quotient aus  $PAR/G$  ( $G$  Globalstrahlung) verringert sich dagegen linear mit ansteigendem PAR. Über den Buchenbeständen, das heißt  $PAI = 0$ , kommt  $PAR/G$  an diesem Standort nahe an den aus der Literatur bekannten Mittelwert von 2 (unter anderem in MAYER et al. 2002) heran.

Die Vertikalverteilung der Windgeschwindigkeit über Wäldern lässt sich über den bekannten Ansatz für das logarithmische Windprofil beschreiben. Innerhalb von Wäldern hängt die Form des Vertikalprofils der Wind-

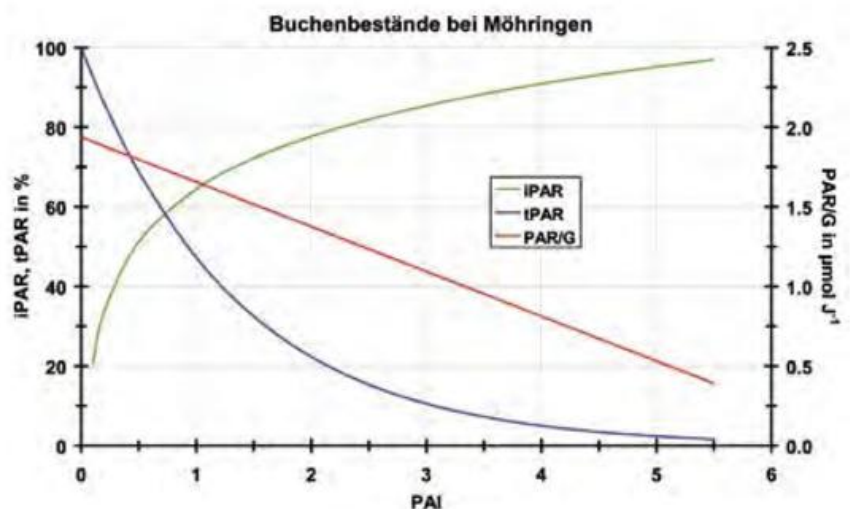


Abb. 8-12: Mittelwerte von Interzeption (iPAR) und Transmission (tPAR) der photosynthetisch aktiven Strahlung PAR sowie des Quotienten  $PAR/G$  ( $G$  = Globalstrahlung) in Abhängigkeit vom Pflanzenflächenindex PAI für Buchenbestände bei Möhringen im Zeitraum 2001 bis 2007.

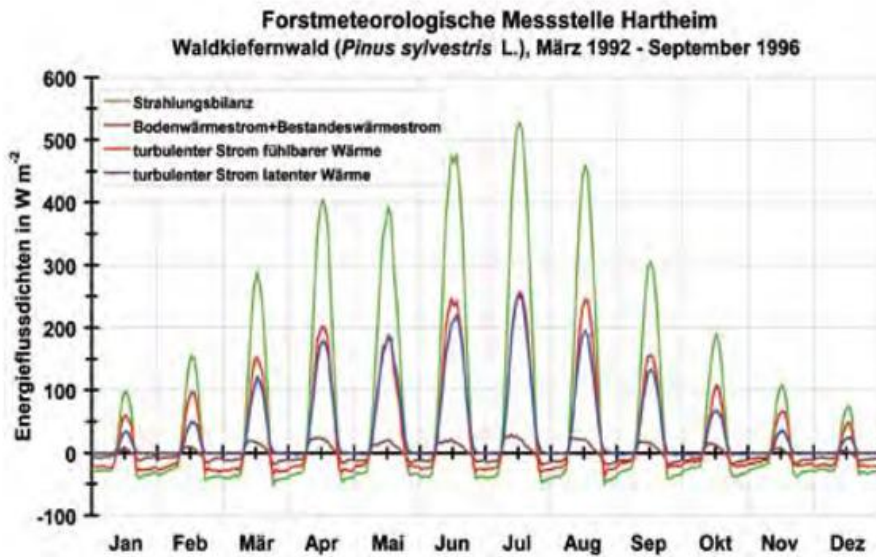


Abb. 8-14: Mittlere monatliche Tagesgänge der Energieflussdichten des Waldkiefernbestandes an der Forstmeteorologischen Messstelle Hartheim (nach ROST und MAYER 2006).

geschwindigkeit von baumspezifischen Kennzeichen wie Höhe des Kronenansatzes oder Ausbildung der Kronen ab. Das erklärt die Form des mittleren vertikalen Windprofils für den Waldkiefernbestand, insbesondere im Bereich seines Kronenschirms, an der Forstmeteorologischen Messstelle Hartheim (Abb. 8-13).

Viele forstmeteorologische Erscheinungen lassen sich über die Energie-, Wasser-, Impuls- und Stoffbilanz von Wäldern erklären. Darin spiegeln sich auch Standortseigenschaften wider. Am Beispiel der in der Abb. 8-14 enthaltenen mittleren Tagesgänge der Energieflussdichten eines Waldkiefernbestandes in der südlichen Oberrheinebene lässt sich erkennen, dass an seinem Standort die Wasserverfügbarkeit limitiert ist, während genügend Energie in Form der Strahlungsbilanz  $Q^*$  vorhanden ist. Daher weist dieser Waldbestand ein Bowen-Verhältnis auf, das über dem Wert von 0,5 liegt, der oft als typisch für Wälder angesehen wird (unter anderem in BAUMGARTNER 1967a, b).

Flächennutzungsänderungen, die Wälder tangieren, haben Konsequenzen, deren Dimension sich nach der Größe der betroffenen Waldflächen richtet. Diese reicht von der Fläche der tropischen Regenwälder bis hin zu einzelnen Waldbeständen. ROST und MAYER (2006) zeigten für die südliche Oberrheinebene, dass dort der Übergang von einer Waldkiefernfläche zu einer Graslandfläche, das heißt von einer grünen Landnutzung zu einer anderen grünen Landnutzung, zu einer Reduzierung der kurzwelligen Strahlungsbilanz (im Jahresmittel um 14 %) führt, weil die Oberflächenalbedo von Grasland etwa doppelt so groß wie diejenige des Waldkiefernbestands ist. Bei der langwelligen Strahlung aus dem unteren Halbraum unterscheiden sich die beiden

Landnutzungen kaum. Darum ergibt sich im Jahresmittel eine nur um 1,4 % höhere langwellige Strahlungsbilanz für Grasland. Die gesamte mittlere Strahlungsbilanz  $Q^*$  (Abb. 8-15) ist für Grasland von Februar bis November immer kleiner als für den Waldkiefernbestand. Im Jahresmittel erreicht  $Q^*$  für Grasland nur 77 % von  $Q^*$  für den Waldkiefernbestand. Dadurch wird die Aussage von BAUMGARTNER (1967a, b) bestätigt, dass Wälder die energetisch aktivsten Landnutzungen sind.

Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen zur Energie- und Wasserbilanz von Wäldern werden immer mehr durch Simulationen ergänzt, die auf prozessbasierten Modellen

beruhen. Selbst in komplexem Gelände und unter nicht einfachen Bodenbedingungen lassen sich inzwischen längerfristige Verläufe von Variablen wie der volumetrischen Bodenfeuchte SWC simulieren, die für die Wasserverfügbarkeit von Beständen eine höhere Relevanz als der Freilandniederschlag hat. Die Ergebnisse in der Abb. 8-16, die sich auf SWC-Tagesmittelwerte beziehen, zeigen eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Messwerten und Simulationsergebnissen aus der Anwendung der Modelle BROOK90 und DNDC. Dabei sind die leicht unterschiedlichen Referenziefen zu berücksichtigen. Für den trockenen Sommer 2003 ist sogar eine relativ gute Übereinstimmung von gemessenen und simulierten SWC-Werten festzustellen.

### 3 Wechselwirkungen zwischen Wald und Atmosphäre

Wälder und Forsten stellen besonders in den agrarisch geprägten Kulturlandschaften Europas aufgrund ihrer



Abb. 8-15: Monatsmittelwerte der Strahlungsbilanz  $Q^*$  eines Waldkiefernbestands und einer nahen Graslandfläche in der südlichen Oberrheinebene (nach ROST und MAYER 2006).

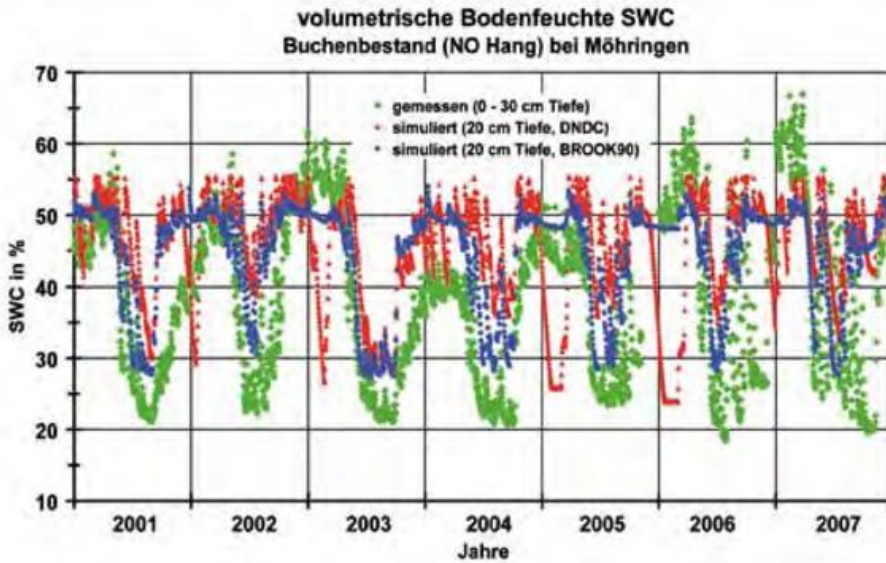


Abb. 8-16: Tagesmittelwerte der volumetrischen Bodenfeuchte SWC für einen Buchenbestand auf einem NO-Hang bei Möhringen im Zeitraum 2001 bis 2007, ermittelt über Messungen und Simulationen mit zwei Modellen (nach HOLST et al. 2010).

großen Rauigkeit und großen räumlichen Variabilität eine entscheidende Landoberflächenheterogenität dar. Der häufige Wechsel zwischen hohen (Wald) und niedrigen Hindernissen (Grasland, Acker- und Wasserflächen) sorgt für eine Erhöhung der effektiven Rauigkeit der Landschaft, eine starke Modifikation des Strömungsfeldes (QUECK et al. 2012) und eine verstärkte aerodynamische Kopplung mit der Atmosphäre (GOLDBERG und BERNHOFER 2001). Gleichzeitig variiert das kurzweilige Reflexionsvermögen (Albedo) von Waldflächen in Abhängigkeit von der Jahreszeit sowie von der Struktur und Zusammensetzung des Waldes. Dies führt durch Rückkopplung von Albedo und Strahlungsbilanz zur Energiebilanz zu thermischen Wechselwirkungen, bis hin zur Veränderung der Verdunstung und des regionalen Wasserkreislaufs. Des Weiteren sind Wälder, deutlich mehr beispielsweise als Grasland, in der Lage, die Verdunstung pflanzenphysiologisch zu regulieren und damit zusätzlich zu den atmosphärischen Verdunstungsfaktoren (Strahlung, Wind und Sättigungsdefizit) Einfluss auf den Energie- und Stoffhaushalt zu nehmen.

Damit greifen die Wechselwirkungen zwischen Waldflächen und der Atmosphäre auch in die für die Waldfunktionen wesentlichen Kreisläufe auf unterschiedlichen Skalen ein.

Die Interaktion von Waldflächen und der Atmosphäre im regionalen Skalenbereich basiert sowohl auf aerodynamischem (zum Beispiel Rauigkeitsübergänge) als auch thermischem Antrieb.

Rasch aufeinander folgende große Rauigkeitssprünge am Übergang von Wald zu aerodynamisch glatten Unterlagen resul-

tieren in einer deutlichen Zunahme der Heterogenität und einer Erhöhung der Rauigkeit der Landschaft. Nach HASAGER et al. (2002) wird beispielsweise die effektive Rauigkeit  $\langle z_0 \rangle$  einer Landschaft mit einer Abfolge von Gehölzschutzstreifen folgendermaßen beschrieben:

$$\langle z_0 \rangle = \frac{h}{e \left( 1,6 \frac{\kappa^2 D}{hc_D} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (1)$$

mit  $h$  als Hindernishöhe,  $\kappa$  als von Karmán-Konstante,  $D$  als Hindernisabstand und  $c_D$  als Formwiderstand der Rauigkeitselemente des Hindernisses. Die Abb. 8-17 verdeutlicht den großen Einfluss einer

strukturierten Landschaft mit häufigem Wechsel von Rauigkeitssprüngen auf die Zunahme der totalen aerodynamischen Rauigkeit. Bei Höhen der Waldstreifen nahe 20 m liegt die zusätzliche Rauigkeitslänge auch bei großen Hindernisabständen im Bereich der typischen Rauigkeitslänge einer homogenen Waldfläche ( $\approx 0,1 h$ ). Aber auch bei kleinen Hindernishöhen ist die Rauigkeitszunahme größer als die typische Rauigkeit einer ungestörten Grasfläche von 0,01 m.

Die stärksten aerodynamischen Wechselwirkungen ergeben sich in einer Wald-Freiflächen-Landschaft mit einem mittleren Fraktionierungsgrad (Abb. 8-18). Stark aufgelockerte Wald-Feld-Landschaften besitzen eine deutlich höhere effektive Rauigkeit als Gebiete mit homogener Landnutzung. Gleichzeitig hängt die Stärke der aerodynamischen Wechselwirkung von der Größe der Inhomogenitäten ab. Bei gleichem Flächenanteil führen kleine Waldinseln mit deutlich mehr Kantenübergängen

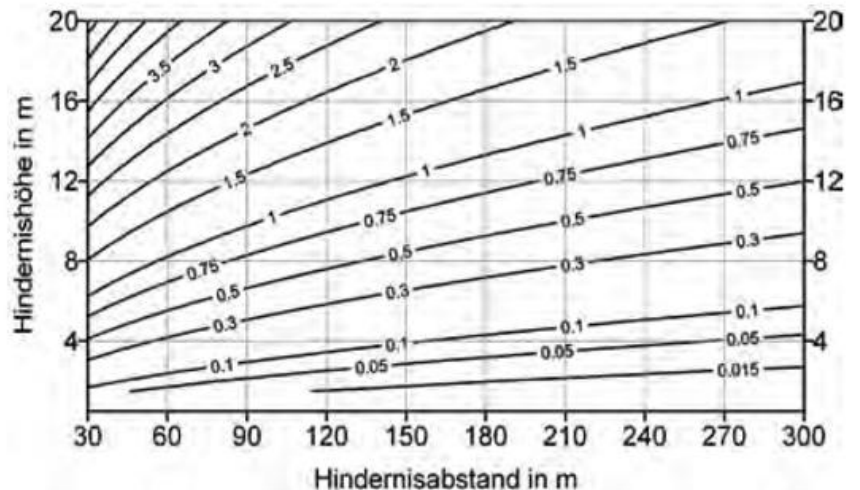


Abb. 8-17: Effektive Rauigkeit  $\langle z_0 \rangle$  in Metern einer aerodynamisch glatten Landoberfläche mit einer regelmäßigen Abfolge von Hindernissen (zum Beispiel Gehölzschutzstreifen), basierend auf Gleichung (1) mit  $\kappa=0,4$  und  $c_D=0,2$ .



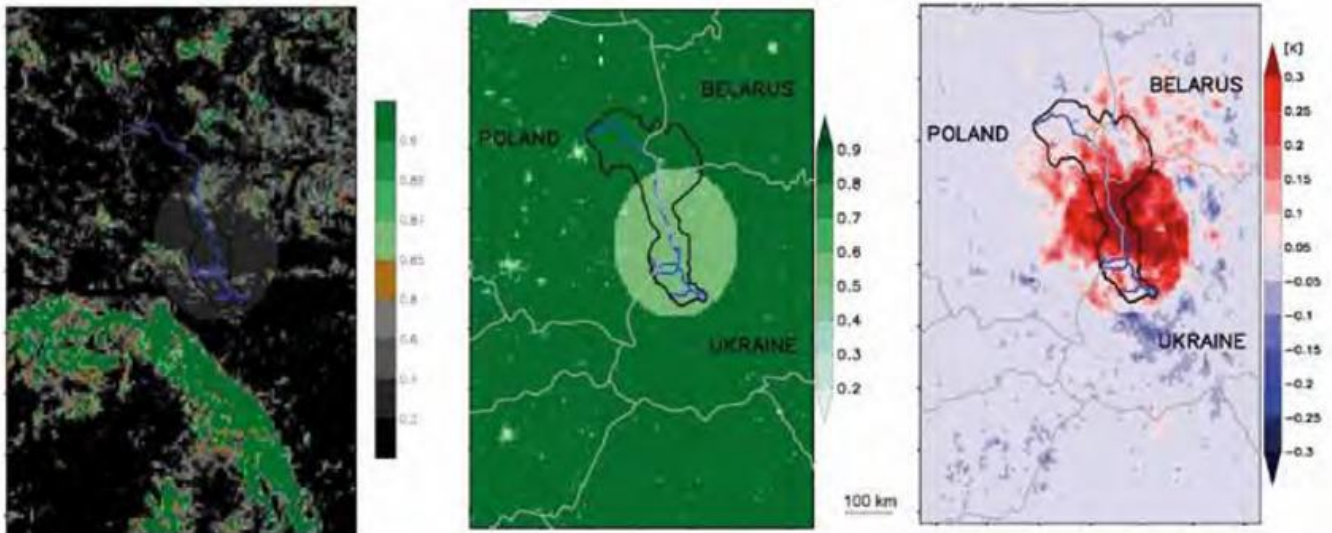


Abb. 8-21: Sensitivität des Regionalklimas auf die Änderung der Vegetationsbedeckung im Modellgebiet IWAS-Ukraine. links: Waldanteil; Mitte: Vegetationsanteil mit 40 %-Reduktion im Einzugsgebiet des Westlichen Bug; rechts: 2 m-Lufttemperaturdifferenz zur Ausgangssimulation ohne Vegetationsreduktion. Ergebnisse des regionalen Klimamodells CCLM.

im Herbst und Winter. Aufgrund der Verringerung der Oberflächenrauigkeit des entwaldeten Testareals steigt die Windgeschwindigkeit im gesamten Simulationsgebiet an (Abb. 8-22, unten).

#### 4 Fazit

Die vielfältigen Anforderungen an Wälder (Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktion), die lokale bis überregionale Einflussnahme von Wäldern auf Energie-, Wasser-, Impuls- und Stoffhaushalte sowie auf die Heterogenität der Landschaft stellen die Forstmeteorologie vor große Herausforderungen. So werden neben klassischen Aufgaben wie der Erhebung und Bewertung von forstmeteorologisch relevanten Variablen zunehmend Konzepte zur Charakterisierung der Waldfunktionen

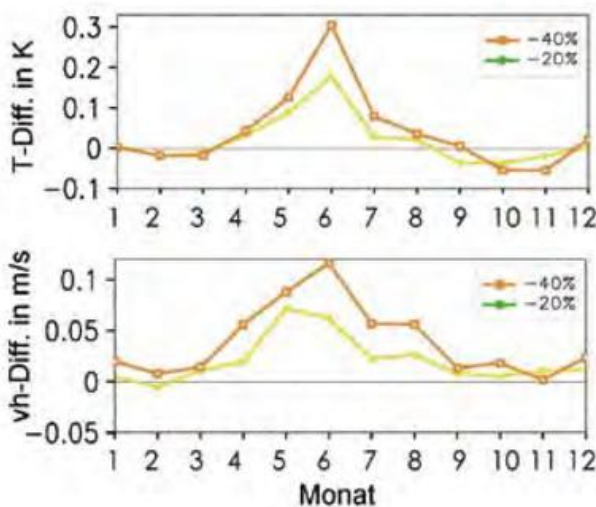


Abb. 8-22: Sensitivität des Regionalklimas auf die Reduktion der Vegetationsbedeckung um 20 beziehungsweise 40 % im Modellgebiet IWAS-Ukraine. Jahresgang der Abweichungen im Flächenmittel zur Ausgangssimulation. Oben: Lufttemperatur in 2 m; unten: Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe.

benötigt, mit denen die dynamischen Wechselwirkungen zwischen Wetter, Witterung, Klima auf der einen Seite und Wäldern auf der anderen Seite beschrieben werden können. In diesem Zusammenhang braucht die Forstmeteorologie geeignete regionale Klimaprojektionen, deren Ergebnisse vor dem Hintergrund der Langfristigkeit der forstlichen Produktionszeiträume von besonderem Interesse sind. Die Klimamodelle brauchen umgedreht eine geeignete, dynamische Beschreibung von Wald als Landnutzung, hier kann die Forstmeteorologie einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Modelle leisten.

#### Literatur

- AMARO, A., REED, D., SOARES, P. (Hrsg.), 2002: Modelling forest systems, Wallingford: CABI Publishing, 401 Seiten.
- BAUMGARTNER, A., 1967a: Entwicklungslinien in der forstlichen Meteorologie - Teil I. *Forstwiss. Cbl.* **86**, 156-175.
- BAUMGARTNER, A., 1967b: Entwicklungslinien in der forstlichen Meteorologie - Teil II. *Forstwiss. Cbl.* **86**, 201-220.
- BERNHOFER, C., SPANK, U., CLAUSNITZER, F., KÖSTNER, B., GRÜNWALD, T., EICHELHANN, U., MENZER, A., FEGER, K.-H., SCHWÄRZEL, K., 2011: Mikrometeorologische, pflanzenökologische und bodenphysiologische Messungen in Fichten- und Buchenbeständen im Tharandter Wald. *Waldökologie, Landesforschung und Naturschutz* **12**, 17-28.
- FAO, 2010: Global Forest Resources Assessment 2010. FAO *Forestry Paper* **163**, 378 Seiten.
- FAO, 2011: State of the World's Forests 2011, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 179 Seiten.
- FEDERER, C.A., VÖRÖSMARTY, C., FEKETE, B., 2003: Sensitivity of annual evaporation to soil and root

- properties in two models of contrasting complexity. *J. Hydrol.* **4**, 1276–1290.
- FLEMMING, G., 1994: Wald-Wetter-Klima: Einführung in die Forstmeteorologie, Berlin: *Deutscher Landwirtschaftsverlag*, 136 Seiten.
- GEIGER, R., 1961: Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig, *Friedr. Vieweg & Sohn*, 646 Seiten.
- GOLDBERG, V., BERNHOFER, C., 2001: Quantifying the coupling degree between land surface and the atmospheric boundary layer with the coupled vegetation-atmosphere model HIRVAC. *Ann. Geophys.* **19**, 581-587.
- HASAGER, C.B., JENSEN, N. O., 1999: Surface-flux aggregation in heterogeneous terrain. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **125**, 2075-2102.
- HASAGER, C.B., NIELSEN, N.W., SOEGAARD, H., BOEGH, E., HESSELBJERG CHRISTENSEN, J., JENSEN, N. O., SCHULTZ RASMUSSEN, M., ASTRUP, P., DELLWIK, E., 2002: SAT-MAP-CLIMATE Project Results. Riso-R-1350(EN), Riso National Laboratory, Roskilde, 71 Seiten.
- HOLST, J., GROTE, R., OFFERMANN, C., FERRIO, J.P., GESSLER, A., MAYER, H., RENNENBERG, H., 2010: Water fluxes within beech stands in complex terrain. *Int. J. Biometeorol.* **54**, 23-36.
- IMBERY, F., 2005: Langjährige Variabilität der aerodynamischen Oberflächenrauigkeit und Energieflüsse eines Kiefernwaldes in der südlichen Oberrheinebene (Harthaim). *Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg Nr.* **14**, 150 Seiten.
- KABAT, P. (ed.), 2004: Vegetation, Water, Humans and the Climate. The IGBP Series: Springer, Berlin, 566 Seiten.
- LANDSBERG, J., SANDS, P., 2011: Physiological ecology of forest production, Amsterdam: Elsevier, 331 Seiten.
- LI, C., FROLKING, S., FROLKING, T.A., 1992: A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *J. Geophys. Res.* **97**, 9759-9776.
- MAYER, H., 1982: Forstmeteorologie. *Promet* **3/4'82**, 22-29.
- MAYER, H., HOLST, T., SCHINDLER, D., 2002: Mikroklima in Buchenbeständen - Teil I: Photosynthetisch aktive Strahlung. *Forstw. Cbl.* **121**, 301-321.
- MITSCHERLICH, G., 1981: Wald, Wachstum und Umwelt. 2. Band: Waldklima und Wasserhaushalt, Frankfurt am Main: *J.D. Sauerländer's Verlag*, 402 Seiten.
- PAVLIK, D., SÖHL, D., PLUNTKE, T., MYKHNOVYCH, A., BERNHOFER, C., 2011: Dynamic downscaling of global climate projections for Eastern Europe with a horizontal resolution of 7 km. IWAS special issue. *Environmental Earth Science – DOI: 10.1007/s12665-011-1081-1*.
- QUECK, R., BIENERT, A. MAAS, H.-G., HARMANSA, S., GOLDBERG, V., BERNHOFER, C., 2012: Wind fields in heterogeneous conifer canopies: parameterisation of momentum absorption using high-resolution 3D vegetation scans. *Eur. J. Forest Res.* **131**, 165-176.
- RASPE, S., 2001: Abschlussbericht zum Projekt V46. Freising, Bayer. Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 183 Seiten.
- ROST, J., MAYER, H., 2006: Comparative analysis of albedo and surface energy balance of a grassland site and an adjacent Scots pine forest. *Clim. Res.* **30**, 227-237.
- SCHINDLER, D., 2008: Responses of Scots pine trees to dynamic wind loading. *Agric. Forest Meteorol.* **148**, 1733-1742.
- SCHWÄRZEL, K., PETERS, R., PETZOLD, R., HÄNTZSCHEL, J., MENZER, A., CLAUSNITZER, F., SPANK, U., KÖSTNER, B., BERNHOFER, C., FEGER, K.-H., 2011: Räumlich-differenzierte Berechnung und Bewertung des Standortwasserhaushaltes von Wäldern des Mittelgebirges. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**, 119-126.
- VALENTINI, R. (Hrsg.), 2003: Fluxes of carbon, water and energy of European forests, *Springer-Verlag*, Berlin, 270 Seiten.
- WELLPOTT, A., IMBERY, F., SCHINDLER, D., MAYER, H., 2005: Simulation of drought for a Scots pine forest (*Pinus sylvestris L.*) in the southern upper Rhine plain. *Meteorol. Z.* **14**, 143-150.

U. SPANK, C. BERNHOFER

# 9 Beschreibung, Messung und Modellierung von Wasserhaushalt und Wasserhaushaltskomponenten von Wäldern

Description, measurement and modeling of water budget and water budget components of forests

## Zusammenfassung

Der Wasserhaushalt, das heißt die Aufteilung des gefallenen Niederschlags in Abfluss, Verdunstung und Speicherung, wird durch die vielfältigen direkten und indirekten Wechselwirkungen zwischen biotischen (insbesondere Vegetation) und abiotischen Faktoren (insbesondere Boden und meteorologische Bedingungen) bestimmt. Wälder unterscheiden sich von anderen Vegetationsformen insbesondere durch ihren mehrschichtigen Aufbau, der eine vertikale Strukturierung der ablaufenden Prozesse bewirkt. Dadurch wird die prozessgerechte Modellierung der Wasserhaushaltskomponenten an Waldstandorten sehr komplex. Zum Beispiel muss die Simulation der Verdunstung getrennt nach Transpiration, Interzeption und Evaporation unter Berücksichtigung von Kronenraum, Unterwuchs und Boden erfolgen. Der vorliegende Artikel beschreibt alle wasserhaushaltsrelevanten Prozesse und ihre messtechnische Erfassung. Abschließend werden wichtige Aspekte der modelltechnischen Umsetzung insbesondere im Hinblick auf notwendige Vereinfachungen in unterschiedlichen Raumskalen erläutert.

## Summary

The water balance, i.e., the partitioning of precipitation into runoff, evapotranspiration and storage is governed by multiple direct and indirect interactions between biotic (particularly vegetation) and abiotic site parameters (particularly soil and meteorological conditions). The multi-layered structure of forests makes them different to other types of vegetation and creates a vertical structuring of processes. Thus, a process orientated modeling of water balance components for forest sites is rather complex. E.g., evapotranspiration must be simulated separately for transpiration, interception and evaporation considering crowns, understorey and soil. This article addresses all relevant processes of forest water budgets and common methods of measurement. Finally, important issues of model building are discussed with a special focus on necessary simplifications at different spatial scales.

## 1 Einleitung

Die genaue Kenntnis der Wasserbilanzkomponenten (Niederschlag,  $P$ ; Evapotranspiration,  $ET$ ; Abfluss,  $R$  und Speicheränderung,  $\Delta S$ ) ist eine notwendige Voraussetzung sowohl für eine erfolgreiche und nachhaltige Wasserbewirtschaftung als auch für eine effektive und wirtschaftlich rentable Land- und Forstwirtschaft. Wasserhaushaltsuntersuchungen sind dabei mehr als andere Bereiche der Hydrologie komplex und vielschichtig mit meteorologischen Größen verbunden. Insbesondere unterliegen in der Wasserbilanz,

$$P = ET + R \pm \Delta S, \quad (1)$$

neben dem Inputterm auch die Outputterme einer atmosphärischen Beeinflussung. Dabei ist die Evapotranspira-

tion  $ET$  als Schnittstelle hervorzuheben.  $ET$  bezeichnet die Summe aus (i) nur durch physikalischen Antrieb verdunstetem Wasser aus Bodenmatrix oder freien Wasseroberflächen  $E$  und (ii) der biologischen Prozessen unterliegenden Wasserabgabe von Pflanzen  $T$ . Die Interzeption  $I$ , also die Verdunstung von nicht infiltrierten Niederschlagswassers von Pflanzenorganen oder der Streu, wird je nach Verständnis als weitere Komponente angesehen oder der Evaporation zugezählt.

Im Zusammenhang mit  $ET$  wird die Kopplung der Wasserbilanz (1) mit der Energiebilanz,

$$R_n - G - J = H + LE, \quad (2)$$

(Nettostrahlung,  $R_n$ ; Bodenwärmestrom,  $G$ ; Wärmespeicherung im Bestand,  $J$ ; sensibler Wärmestrom,  $H$  und

latenter Wärmestrom, LE) deutlich. LE entspricht dem Energieäquivalent von ET ( $LE = L \cdot ET$ ,  $L = 2,5 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$  bei  $0^\circ\text{C}$ ). Somit sind beide Bilanzgleichungen direkt miteinander verbunden. Weiterführend ist die Kopplung des Wasserhaushalts an den Strahlungshaushalt beziehungsweise an die Strahlungsbilanz  $R_n$ ,

$$R_n = (1 - \alpha)R_G - R_T + R_A, \tag{3}$$

(Globalstrahlung,  $R_G$ ; Albedo,  $\alpha$ ; terrestrisch emittierte Strahlung,  $R_T$ ; atmosphärische Gegenstrahlung,  $R_A$ ) erkennbar. Es wird deutlich, dass der Wasserhaushalt sowohl durch den atmosphärischen Input in Form von Niederschlag  $P$  als auch durch den energetischen Antrieb von meteorologischen Faktoren gesteuert und beeinflusst wird.

Eine besondere Herausforderung stellt die Quantifizierung der Wasserhaushaltskomponenten in Wäldern dar. Wälder unterscheiden sich von anderen Vegetations- und Landnutzungsformen insbesondere durch ihren mehrschichtigen Aufbau (Stockwerke). Ein natürlicher Waldbestand kann vertikal in fünf beziehungsweise sechs Zonen gegliedert werden: Kronenraum und den für Hochwälder typischen Stammraum, Strauchschicht, Krautschicht, Streuauflage und Wurzelraum. In bewirtschafteten Wäldern sind die Strauch- und Krautschicht oft unterrepräsentiert.

Eine grundlegende Herausforderung der Beschreibung des Wasserhaushalts von Waldstandorten liegt darin, dass sich die einzelnen Stockwerke sowohl im Hinblick auf die Wasserbilanz als auch im Hinblick auf Energie- und Strahlungsbilanz gegenseitig beeinflussen, wodurch komplexe Wechselwirkungen entstehen. Zum einfacheren Verständnis wird im Folgenden meist modellhaft von einem zweischichtigen Wald bestehend aus Kronenraum und Bodenzone ausgegangen.

## 2 Niederschlag und Bestandeswassereintrag

### 2.1 Theorie und Modellbildung zur Beschreibung des Bestandeswassereintrags

Bereits die Beschreibung des Inputterms, also die Quantifizierung des dem Waldbestand zugeführten Wassers (Bestandeswassereintrag)  $P_n$  ist wesentlich komplexer als bei anderen Landbedeckungen. Die Wassermenge eines Niederschlagsereignisses, die auf das Kronendach eines Waldes fällt, teilt sich in vier Teilmengen auf: direkt durchfallender Niederschlag  $P_t$ , abtropfender Niederschlag  $P_d$ , Stammabfluss  $P_s$  und Interzeption  $I$ . Die Wassermenge, die den Boden erreicht ( $P_n$ ), ergibt sich somit aus:

$$P_n = P_t + P_d + P_s = P - I. \tag{4}$$

Heute noch gebräuchliche Modellkonzepte zur physikalisch begründeten Beschreibung der Aufteilung des Niederschlags respektive  $P_n$  wurden bereits in den 70er Jahren (RUTTER et al. 1971, GASH 1979) entwickelt und sollen auch hier zur grundlegenden Prozessbeschreibung dienen.

Zunächst gibt es einen Teil des Niederschlags, der durch Lücken im Kronendach direkt zu Boden fällt. Dieser Anteil wird als direkt durchfallender Niederschlag  $P_t$  bezeichnet. Im Wesentlichen hängt  $P_t$  nur vom Kronenschlussgrad beziehungsweise dem Anteil der Lücken im Kronendach  $a_t$  ab. Untergeordnete Bedeutung hat lediglich noch der Einfallswinkel des Niederschlags, der von Wind, Tröpfchengröße und Niederschlagsart bestimmt wird. Für die meisten praktischen Untersuchungen kann diese Beeinflussung jedoch vernachlässigt werden und  $P_t$  kann als fester Prozentsatz der gefallen Niederschlagsmenge  $P$  über  $a_t$ ,

$$P_t = a_t P, \tag{5}$$

quantifiziert werden. Die anderen Komponenten  $P_d$ ,  $P_s$  und  $I$  entstehen aus Niederschlagswasser, was zwischenzeitlich an Blättern beziehungsweise Nadeln, Zweigen oder Ästen gespeichert wurde. Die genaue Aufteilung wird sowohl von Bestandeseigenschaften aber auch signifikant von meteorologischen Faktoren bestimmt. Wichtige diesbezügliche Bestandesmerkmale sind: Blattform, Blattgröße, Blattanordnung, Belaubungszustand und Bestandesdichte. Die meteorologischen Aspekte sind insbesondere über die verdunstungssteuernden Größen: Strahlung, Wind und Sättigungsdefizit aber auch über Niederschlagsart, -verteilung und Intensität gekoppelt.

Zur vereinfachten Beschreibung und Modellbildung werden die Bestandesmerkmale zu einem Parameter, der Bestandes- oder Interzeptionsspeicherkapazität  $S_c$ , zusammengefasst. Als Richtwerte für  $S_c$  können 0,8 mm für Laubwälder und 1,2 mm für Nadelwälder auf Einzugsgebietsskala angenommen werden (SHUTTLEWORTH 1993). Für Einzelbestände kann  $S_c$  jedoch stark davon abweichen. So wurden zum Beispiel für Fichtenwälder im Erzgebirge Werte über 5 mm beobachtet.

Zum leichteren Verständnis sollte  $S_c$  am besten vereinfacht mit einem Behälter verglichen werden, welcher überlaufen muss, damit es zur Entstehung von abtropfenden ( $P_d$ ) oder abfließenden Niederschlagswasser ( $P_s$ ) kommen kann. Auf diese Weise lässt sich sehr anschaulich die Kopplung zu verdunstungssteuernden meteorologischen Größen und der zeitlichen Niederschlagsverteilung verdeutlichen. Einen Zulauf erhält  $S_c$  durch den gefallen Niederschlag  $P$  pro Zeitschritt. Die Entleerung erfolgt während der niederschlagsfreien Perioden durch die Interzeptionsverdunstung  $I$ . (Die Verdunstung während des Niederschlagsereignisses selbst kann meist auf Grund der hohen Luftfeuchte vernachlässigt werden.) Es ist klar, dass ein starker Verdunstungsantrieb (viel Strahlung, geringe Luftfeuchte bei gleichzeitig hoher Temperatur und viel Wind) eine schnelle Leerung des Speicherinhalts von  $S_c$  nach einem Niederschlagsereignis bewirkt. Indirekt wird somit auch ersichtlich, dass neben der absoluten Menge des gefallen Niederschlags die zeitliche Verteilung der Niederschlagsereignisse grundlegende Bedeutung hat. Entscheidend sind dabei besonders die niederschlagsfreien Perioden, die zum Abtrocknen des Bestandes und somit zur Entleerung von  $S_c$  führen. In Natura ist das Prozessgefüge natürlich wesentlich komplexer. Zum

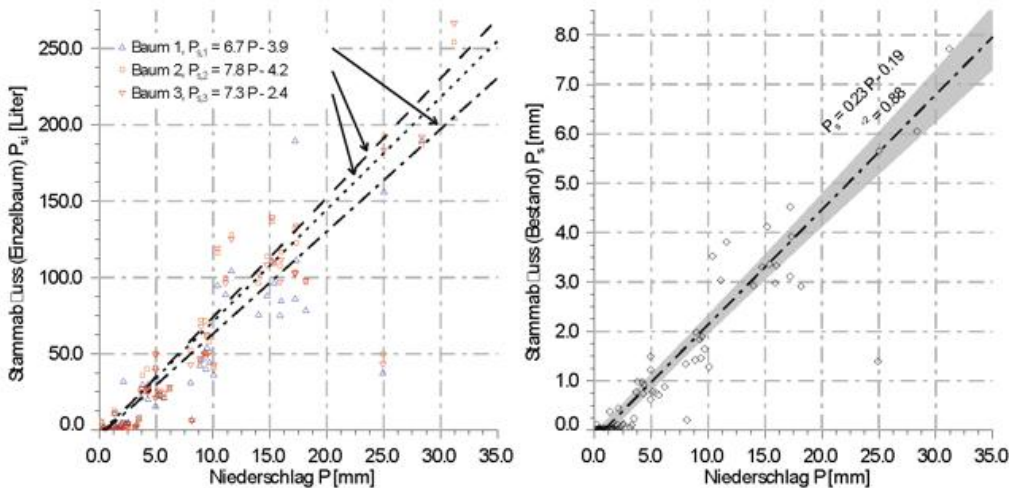


Abb. 9-1: Gemessener Stammabfluss in einem Buchenbestand im Tharandter Wald in Abhängigkeit des gefallen Niederschlages mit dazugehörigen Regressionsgeraden für den Zeitraum der vollständigen Belaubung (Mai bis September), links: auf Einzelbaumebene gemessener volumetrischer Wassereintrag (Messung an 3 Einzelbäumen), rechts: aus den Messwerten abgeleitet und auf den Gesamtbestand skaliertes Stammabfluss (Zur Separierung der Ereignisse wurde eine vollständige Abtrocknung des Bestandes nach vier Stunden zugrunde gelegt. Die Skalierung auf den Gesamtbestand erfolgt anhand des Mittelwerts der Einzelbaummessungen, der Anzahl der Bäume pro Grundfläche (= 331/ha) und der anschließenden Normierung auf die Einheitsfläche (= 1 m<sup>2</sup>). Voraussetzung war eine für den Gesamtbestand repräsentative Auswahl der Probestämme.)

Beispiel kann es bei windinduzierten Schwingungen von Ästen und Zweigen zum nachträglichen Abtropfen von Niederschlagswasser kommen. Besonders komplex wird die Situation im Fall von Schneeniederschlägen, wo die Akkumulation und das spätere Abschmelzen der Schneedecke oder auch das Abwehen oder die Sublimation von Schnee beachtet werden müssen.

Die modelltechnische Separation zwischen abtropfenden Niederschlag  $P_d$  und abfließenden Niederschlag (Stammabfluss)  $P_s$  ist eine besondere Herausforderung und kann nur bestandes- beziehungsweise baumartenspezifisch erfolgen. Insbesondere entscheiden artspezifische Merkmale wie Wuchs- und Kronenform, Blattanordnung und Beschaffenheit der Rinde, ob es überhaupt zur Entstehung von  $P_s$  kommen kann. So ist  $P_s$  bei den meisten einheimischen Nadelbaumarten wie Fichte, Tanne und Kiefer auf Grund der rauen Rinde und des zumindest bei Fichte und Tanne typischen dachziegelartigen Aufbaus der Krone vernachlässigbar. Anders verhält es sich bei Laubbaumarten mit einer trichterförmigen Kronenstruktur. Insbesondere bei Arten mit glatter Rinde wie Buche und Ahorn kann  $P_s$  einen signifikanten Anteil an  $P_n$  haben. An Standorten, wo Wasser ein limitierender Faktor ist, stellt dies einen Konkurrenzvorteil dar, da das am Stamm abfließende Wasser gezielt den eigenen Wurzeln zugeführt wird.

In Abb. 9-1 ist der an drei Buchen gemessene Stammablauf in Abhängigkeit der Niederschlagsmenge von Einzelergebnissen dargestellt. Auf der linken Seite wird dabei die volumetrische Menge des an den Bäumen abgeflossenen Wassers gezeigt. Die rechte Seite zeigt die auf den Bestand skalierte Wassermenge, die sich aus dem Wassereintrag der Einzelbäume und Anzahl der Bäume pro Grundfläche ergibt.

## 2.2 Messtechnische Erfassung des Bestandeswassereintrags

Der Bestandeswassereintrag  $P_n$  wird fundamental vom gefallen Niederschlag bestimmt. Somit stellt die exakte Quantifizierung, das heißt die Korrektur der typischen Unterschätzung zum Beispiel durch den Windfehler als auch die Beachtung der Unsicherheiten durch die Regionalisierung (Übertragung der Niederschlagswerte aus der Umgebung auf den Standort) eine wichtige Grundlage dar.

Für die messtechnische Erfassung von  $P_n$  ist zu beachten, dass die Messungen der einzelnen Komponenten

nur auf einem kleinen Raumausschnitt erfolgen können. Es muss somit gewährleistet werden, dass dieser Raumausschnitt repräsentativ für das Gesamtverhalten des Bestandes ist. Diese Forderung ist oftmals nur ansatzweise erfüllbar. Entsprechend können die gewonnenen Messwerte direkt nur zur Abschätzung von Größenordnungen oder zur qualitativen Beschreibung eingesetzt werden. Eine Übertragung auf andere Bestände ist erst durch eine entsprechende Modellbildung beziehungsweise Skalierung (zum Beispiel über pflanzenspezifische Kennwerte) möglich.

Von den einzelnen Komponenten von  $P_n$  ist nur der Stammabfluss  $P_s$  direkt messbar. Der direkt durchfallende Niederschlag  $P_i$  und der abtropfende Niederschlag  $P_d$  können nur gemeinsam erfasst werden. Diese Summe aus  $P_i$  und  $P_d$  wird als Kronentraufe oder Bestandesniederschlag  $P_c$  bezeichnet. Zur Bestimmung der Interzeption gibt es keine verbreiteten direkten Messverfahren. Am einfachsten lässt sich  $I$  als Restglied durch Umstellen von Gleichung (4) und gemessenen  $P$ ,  $P_c$  und  $P_s$ ,

$$I = P - P_i - P_d - P_s = P - P_c - P_s = P - P_n \quad (6)$$

bestimmen. Zur Erfassung von  $P_s$  muss zunächst das am Stamm abfließende Wasser aufgefangen werden. Praktisch haben sich dazu spiralförmig um den Stamm abgebrachte Rinnen bewährt. Diese können leicht aus PU-Schaum modelliert werden. Eine anschließende Dichtung und Glättung mit Silikon gewährleistet ein sicheres Auffangen und einen ungestörten Ablauf. Die eigentliche Herausforderung liegt in der Quantifizierung der abfließenden Wassermenge. Dabei muss beachtet werden, dass das am Stamm abfließende Wasser erstaunlich großen Durchflussschwankungen unterworfen ist. So können bei einem Starkregenereignis über 5 Liter/Minute abfließen während bei einem Nieselregen der



Abb. 9-2: Messanlagen zur Erfassung des Stammabflusses; links: spiralförmige Auffangrinne und Auffanggefäß (ausgerüstet mit Drucksonde zur Erfassung des Füllstandes und automatischer Entleerung); rechts: Messwippe der Firma UGT mit Kippschalen (100 ml).

Ablauf bei unter 1 Liter/Stunde liegt. Weiterführend muss beachtet werden, dass das am Stamm abfließende Wasser relativ viel Schmutz wie Moos, abgestorbene Blätter, Rindenstücke etc. mitführen kann.

Bewährt haben sich zwei Konzepte, die allerdings nur in der frostfreien Zeit betrieben werden können. Die einfachste Lösung ist die Erfassung der abfließenden Wassermenge mittels einer Kippwaage (Abb. 9-2 rechts). Dabei ist zu beachten, dass die Kippwaage ausreichend groß (100 ml) ist. Nachteilig bei dieser Variante sind die Anfälligkeit zu verstopfen als auch der Sachverhalt, dass geringe Stammabflüsse bei kleinen Ereignissen nicht oder nur ungenau erfasst werden. Die alternative Variante (Abb. 9-2 links) stellt die Einleitung des Stammabfluss in ein Auffanggefäß dar, wo anhand des Füllstandes der Zulauf und somit der Stammabfluss gemessen werden kann. Der Nachteil dieser Variante ist, dass die Auffanggefäße sehr groß dimensioniert werden müssen beziehungsweise eine automatische Entleerung vorgesehen werden muss.

Bei der Messung der Kronentraufe  $P_c$  muss sichergestellt werden, dass die Messungen eine repräsentative Stichprobe des gesamten abtropfenden und durchfallenen Niederschlags darstellt. Praktisch kann die Erfassung durch ein dichtes Raster konventioneller Niederschlagssammler oder durch die Aufstellung von



Abb. 9-3: Links: Messanlage zur Erfassung der Kronentraufe mittels Auffangrinnen (in DVWK, 1986, als Regenrinne bezeichnet) in einem Fichtenbestand im Tharandter Wald; rechts: im gleichen Bestand gemessene Kronentraufe in Abhängigkeit des Freilandniederschlags (Sommer 2006), zusätzlich gezeigt werden die potentiellen Grenzen für  $P_n$  sowie der mittlere statistische Zusammenhang zwischen Niederschlag und Bestandeswassereintrag pro Ereignis.

messrinnen (Auffangrinnen) realisiert werden (DVWK, 1986), wobei die Lösung mit Rinnen auf Grund der größeren Auffangfläche günstiger ist. In Abb. 9-3 (links) wird eine typische Messanlage mit Auffangrinnen (in DVWK, 1986, als Regenrinne bezeichnet) gezeigt. Die rechte Grafik zeigt in diesem Bestand gemessene Kronentraufe  $P_c$  in Abhängigkeit der Niederschlagsmenge von Einzelereignissen.

### 3 Evapotranspiration

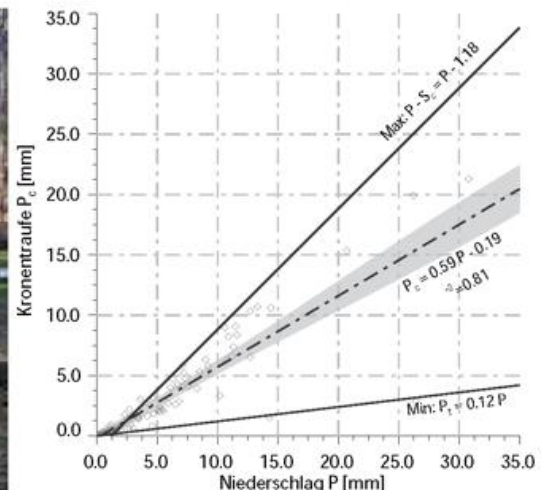
#### 3.1 Die Komponenten der Evapotranspiration von Waldbeständen

Die Evapotranspiration ET von Waldbeständen wird bezogen auf die zugrunde liegenden Prozesse aus drei Komponenten gebildet: der Interzeption I, der Bodenverdunstung  $E_s$  und der stomatären Wasserabgabe von Pflanzen (Transpiration) T. Die Komponente I ist somit Bestandteil der Niederschlagsbilanz (4) als auch der Verdunstungsbilanz,

$$ET = I + T + E_s \tag{7}$$

$E_s$  bezeichnet im engeren Sinn nur die Verdunstung direkt aus der Bodenmatrix. Im praktischen Verständnis beinhaltet  $E_s$  jedoch auch die Verdunstung aus Pfützen oder die Interzeptionsverdunstung der Streuaufflage.

Begründet durch den mehrschichtigen Aufbau von Wäldern finden I und T vertikal verteilt in mehreren Ebenen statt. Im Hinblick auf den meteorologischen Antrieb ist dabei die Strahlungsverteilung, die durch die Dämpfung und Lichtschwächung durch darüber liegende Stockwerke aber auch durch die Dynamik von Lichtflecken bestimmt wird, von fundamentaler Bedeutung. Weiterführend sind die Interaktion der einzelnen Verdunstungsebenen über das Sättigungsdefizit und die Vertikalverteilung der Windgeschwindigkeit im Stamm- und Kronenraum entscheidend für das Verdunstungsverhalten eines Bestandes.



Zur Modellbildung hat sich ähnlich wie beim Bestandeswassereintrag eine Vereinfachung auf 2 Ebenen (Kronenraum und Bodenzone) bewährt. In dem meisten prozessorientierten Wasserhaushaltsmodellen werden darauf aufbauend 3 Prozesse beziehungsweise 3 Komponenten von ET simuliert: Transpiration im Kronenraum  $T^*$ , Interzeption im Kronenraum  $I^*$  und Evapotranspiration unterhalb der Kronen. Das heißt, unterhalb des Kronenraums werden alle Verdunstungskomponenten integriert als Unterwuchs- oder Bodenevapotranspiration  $ET_s$  abgebildet. Der durch diese generalisierte Beschreibung verursachte Modellfehler ist vertretbar, insbesondere vor dem Hintergrund, dass  $ET_s$  auf Grund der verdunstungslimitierenden Faktoren (Strahlung, Sättigungsdefizit, Wind) meist weniger als 10 % von ET in einheimischen Wäldern ausmacht.

Die grundlegende Aufteilung der einzelnen Verdunstungskomponenten ( $I^*$ ,  $T^*$  und  $ET_s$ ) soll mit den Abbildung 9-4 dargestellten Ergebnissen einer Wasserhaushaltsimulation (BROOK90, FEDERER 2012) verdeutlicht werden. In diesem Beispiel werden die langjährigen Mittelwerte, die sich aus den klimatischen Bedingungen und den baumartenspezifischen Besonderheiten ergeben, für Laub- und Nadelwälder im Tharandter Wald gezeigt. Die Parametrisierung des Modells wurde in Anlehnung an die Eigenschaften der vorherrschenden Baumarten Fichte (Nadelwald) und Buche (Laubwald) durchgeführt.

Die Jahressumme von ET ist für Nadelwälder höher als für Laubwälder. Dieser höhere Wert wird vorrangig durch die höhere Interzeption und besonders durch die im Vergleich zu Laubwäldern sehr viel höhere Interzeption in den Wintermonaten ausgelöst. Die Wirkung der phänologischen Effekte setzt sich in der Transpiration fort. So ist außerhalb der belaubten Phase (Ende April bis Mitte Oktober)  $T$  bei Laubwäldern vernachlässigbar, während  $T$  bei Nadelwäldern selbst im Winter noch eine gewisse Rolle spielt. In den Sommermonaten ist  $T$  dagegen vergleichbar beziehungsweise ist bei den modellierten Buchen sogar ein höherer Wert zu beobachten. Eine höhere Transpiration tritt vor allem in Trockenperioden auf, wo auf Grund der größeren Wurzeltiefe eine bessere Wasserversorgung bei Buche gegenüber Fichte gewährleistet ist.

Der Anteil der Boden- und Unterwuchsverdunstung  $ET_s$  ist sehr von der Bestandesstruktur und Bewirtschaftungsform abhängig. Im Beispiel wurde mit dichten Beständen (Fichte:  $LAI = 7,6$ ; Buche:  $LAI_{max} = 3,9$ ) gerechnet, wodurch  $ET_s$  zumindest bei den Fichten aufgrund der Energielimitierung (Strahlungseintrag) sehr gering ist. Im Falle eines lichtereren Bestandes würden vom Modell höhere Werte von  $ET_s$  simuliert. Die Interpretation derartiger Ergebnisse sollte jedoch vorsichtig erfolgen. Unter realen Bedingungen führt ein Auflichten des Bestandes zu einer deutlichen Reduktion von  $T^*$  und  $I^*$  und dadurch zu einer Abnahme von ET. Der Betrag von  $ET_s$  ändert sich dagegen zunächst kaum. Erst nachdem sich die Pflanzen im Unterwuchs an die geänderten Umweltbedingungen angepasst haben, kann es durch den höheren

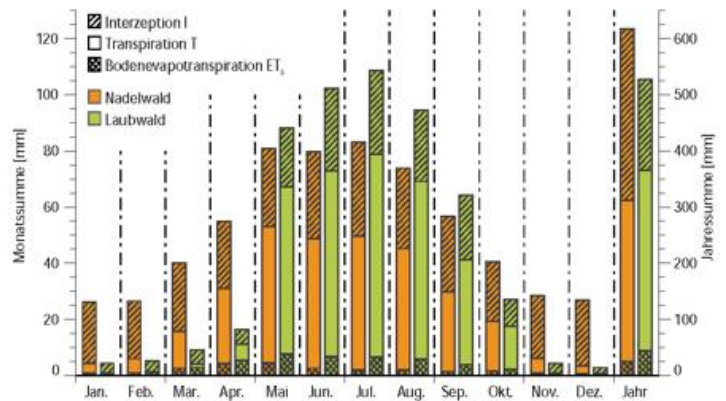


Abb. 9-4: Mittlerer Jahresgang der Verdunstungskomponenten für Nadel- und Laubwaldbestände im Tharandter Wald; BROOK90-Simulation: Klimaperiode 1971 bis 2000, Parametrisierung des Nadelwaldbestandes in Anlehnung an Fichte, Parametrisierung des Laubwaldbestandes in Anlehnung an Buche, sonstige Parameter basierend auf Parametrisierung/Kalibrierung für das Wernersbacheinzugsgebiet.

Strahlungseintrag und durch die ggf. bessere Wasserversorgung (Anstieg von  $P_i$ ) zu einer Erhöhung von  $ET_s$  kommen.

### 3.2 Messtechnische Erfassung einzelner Verdunstungskomponenten

Die Erläuterungen der messtechnischen Erfassung einzelner Verdunstungskomponenten soll sich schwerpunktmäßig auf die Gesamtevapotranspiration ET und die Transpiration der Bäume (Transpiration im Kronenraum)  $T^*$  konzentrieren. Betreffend der Evapotranspiration im Unterwuchs  $ET_s$  ist zu erwähnen, dass sich zur separaten Erfassung am besten Lysimeter eignen. Dieses Standardmessverfahren für niedrige Vegetation wird in nahezu jedem Lehrbuch (unter anderem DYCK und PESCHKE 1995, BAUMGARTNER und LIEBSCHER 1996) erklärt. Deshalb soll hier auf weitere Erläuterungen verzichtet werden. Die Bestimmung der Interzeption wurde bereits im Zusammenhang mit der Erfassung des Bestandeswassereintrags erläutert.

Zur Messung von ET über Waldbeständen eignen sich vor allem mikrometeorologische Messverfahren, wobei sich insbesondere die Eddy-Kovarianzmethode (EC-Methode) durchgesetzt hat. Das EC-Verfahren ist ein mikrometeorologisches Verfahren zur Bestimmung von turbulenten Stoff- und Energieflüssen. Das heißt im Bezug auf Wasserhaushaltsuntersuchungen wird die EC-Methode zur direkten Messung des Wasserdampfstromes  $F_w$  als auch des sensiblen Wärmestroms  $H$  eingesetzt. Unter Vernachlässigung von Taufall und Reif wird der gemessene und zeitlich integrierte Wasserdampfstrom  $F_w$  im Folgenden der Evapotranspiration ET gleichgesetzt.

Die eigentliche Grundlage der EC-Methode stellt die hochfrequente ( $\geq 10$  Hz) Messung von Vertikalwindgeschwindigkeit  $w$  und einer skalaren Größe  $x$  dar. Für die ET-Bestimmung ist diese skalare Größe die Wasserdampfkonzentration, bei  $H$  ist es die Lufttemperatur. Aus der Kovarianz zwischen  $w$  und  $x$  lassen sich unter Anwendung zusätzlicher und teilweise komplexer Korrekturalgorithmen (siehe dazu zum Beispiel: AUBINET et al. 2000, LEE et al. 2004 oder SPANK und

BERNHOFER 2008) die turbulenten Stoff- beziehungsweise Energieflüsse (und damit  $H$  und  $F_w$ ) zwischen Oberfläche (Wald) und Atmosphäre ermitteln. Alternativ neben der direkten Bestimmung von  $ET$  via des gemessenen  $F_w$  kann mittels eines EC-Systems  $ET$  auch als Restglied der Energiebilanz (ECEB-Methode) bestimmt werden,

$$ET_{ECEB} = \frac{R_n - G - J - H}{L} \tag{8}$$

Diese Methode besitzt eine größere Robustheit (geringere Störanfälligkeit und geringerer Wartungsaufwand), da auf die aufwändige hochfrequente Messung der Wasserdampfkonzentration verzichtet werden kann. Allerdings setzt die ECEB-Methode zusätzlich die Bestimmung der Strahlungsbilanz (Nettostrahlung)  $R_n$  voraus. (Auf die Messung des Bodenwärmestroms  $G$  und der Wärmespeicherung im Bestand  $J$  kann bei Tages- oder Monatswerten im Rahmen der Messgenauigkeit verzichtet werden.)

Die direkte Messung von  $F_w$  mittels EC-Methode eignet sich auch für Untersuchungen auf kleinen Zeitskalen (30 Minuten bis Tageswerte). Insbesondere ist sie für das direkte Monitoring von  $ET$  im Bezug zu pflanzenphysiologischen Reaktionen unter anderem auf Strahlung, Luftfeuchte und Temperatur geeignet. Die ECEB-Methode ist auf Grund der indirekten Bestimmung von  $ET$  von den zusätzlichen Speichertermen abhängig, die mit hoher zeitlicher Auflösung schwer repräsentativ zu bestimmen sind. Sie lässt sich aber erfolgreich für die Bestimmung von Tages- oder Monatssummen von  $ET$  einsetzen. In Abbildung 9-5 werden ein EC-System sowie die für die ECEB-Methode notwendige Sensorik zur Erfassung der Strahlungsbilanz von einer Messstation über einem Buchenbestand im Tharandter Wald gezeigt. Weitere Details zu den Messungen und Messergebnisse befinden sich unter anderem in SPANK (2010) und BERNHOFER et al. (2011).

Zur Erfassung der Transpiration der Bäume (Kronentranspiration  $T^*$ ) eignen sich vor allem Saftstrom- beziehungsweise Xylemflussmessungen. Dabei haben sich zwei Standardverfahren etabliert: das Verfahren nach Cermák (CERMARK

et al 1973, CERMAK et al. 1976) und das Verfahren nach Granier (GRANIER 1985, GRANIER 1987). Obwohl das Verfahren nach Cermák etwas genauer ist und auch sonst einige Vorteile (weniger empirische Annahmen) bietet, soll hier das Verfahren nach Granier auf Grund der weiteren Verbreitung vorgestellt werden.

Im Prinzip basiert die Transpirationsbestimmung bei Saftstrommessungen auf der Messung des im Splintholz zu den Kronen transportierten Wassers (Xylemfluss). Das Splintholz bezeichnet die Gesamtheit des wasserleitenden Gewebes in einem Baumstamm. Bei der Messung nach Granier werden zwei Thermoelemente (Temperatursensoren) in einem vertikalen Abstand von 15 cm radial in den Stamm eingebracht. Der obere Sensor wird mit einer konstanten Heizleistung erwärmt. Der untere Sensor bleibt unbeheizt. Die eigentliche Messung basiert auf der Erfassung der Temperaturdifferenz  $\Delta v$  zwischen oberen (beheizten) und unteren (unbeheizten) Sensor. Dabei wird angenommen, dass bei einer Transpiration  $T = 0$  (späte Nachtstunden) der Xylemfluss zum Erliegen kommt. Entsprechend heizt sich der obere Sensor immer mehr auf und die Temperaturdifferenz zwischen beiden Sensoren wird maximal ( $\Delta v_{max}$ ). Bei einsetzender Transpiration und nun im Xylem strömendem Wasser wird der obere Sensor gekühlt, was zur Abnahme der Temperaturdifferenz  $\Delta v$  führt. Letztendlich kann der Saft- oder Xylemfluss  $F_{xy}$  (in  $g\ m^{-2}\ s^{-1}$ ) zum Zeitpunkt  $i$  ( $F_{xy}(i)$ ) mittels des von Granier gefundenen empirischen Zusammenhangs aus der aktuell gemessenen Temperaturdifferenz  $\Delta v(i)$  und dem zugehörigen Maximum  $\Delta v_{max}$  bestimmt werden,

$$F_{xy}(i) = 0,0119 \cdot \left( \frac{\Delta v_{max} - \Delta v(i)}{\Delta v(i)} \right) \tag{9}$$

Was noch erfolgen muss, ist die Hochrechnung von  $F_{xy}(i)$  auf den Baum beziehungsweise auf den gesamten Bestand. Dieser Arbeitsschritt beinhaltet die größte Unsicherheit der Graniermethode, da dazu die individuelle Splintholzfläche des jeweiligen Baums geschätzt werden muss. Behelfsweise wird meist mit einer bestandstypischen (kumulativen)

Splintfläche gearbeitet. Dabei wird  $F_{xy}(i)$  direkt auf den Bestand skaliert, was die Unsicherheit durch die einzelbaumabhängige Variation der Splintfläche reduziert.

Die Installation der Sensoren ist in Abbildung 9-6 (links) zu sehen. Zur Reduktion der Messunsicherheit werden üblicher Weise je 2 Sensorpaare pro Baum verwendet. Weiterführend müssen die Sensoren vor direktem Strahlungseinfall geschützt werden. Die typische Messkonfiguration zur Bestimmung von  $T^*$  auf Bestandesebene wird am Beispiel eines Buchenbestandes (Abb. 9-6 rechts) gezeigt, wobei zu erwähnen ist, dass der



Abb. 9-5: Eddy-Kovarianz- (EC-) Messsystem zur Erfassung der Evapotranspiration über einem Buchenbestand im Tharandter Wald; links: EC-Messsystem bestehend aus Ultraschallanemometer (Campbell, CSAT3) und Open-Path-Gasanalysator (LI-COR, LI 7500); rechts: Messsystem zur Erfassung der Nettostrahlung und aller Strahlungsbilanzkomponenten (Kipp & Zonen, CNR1).



Abb. 9-6: Saftflussmessung nach Granier, links: Beispiel für den Einbau des Sensorpaares in einen Fichtenstamm, rechts: Ausschnitt einer Messanlage mit 10 Bäumen zur repräsentativen Bestimmung der Transpiration  $T^*$  von einem Buchenbestand im Tharandter Wald.

Bestandeswert im Beispiel aus den Messungen an 10 Bäumen abgeleitet wird.

## 4 Speicherung und Abfluss

### 4.1 Komponenten des Speicherterms und deren Implementierung in Wasserhaushaltsmodelle

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Größen wird der Speicherterm  $S$  je nach Untersuchungsziel und untersuchter Raum- beziehungsweise Zeitskala sehr unterschiedlich behandelt. Verallgemeinert lässt sich  $S$  am besten als eine Art Wassertank definieren, der durch  $P$  direkt oder indirekt gefüllt und durch Verdunstung oder Versickerung geleert wird. Im Hinblick auf die Quantifizierung der Wasserbilanz sei angemerkt, dass die exakte Beschreibung der Speicheränderung  $\Delta S$  (also die Änderung des Füllungszustandes von  $S$ ) oftmals entscheidender ist als der Betrag von  $S$  selbst.

Aus der Definition von  $S$  wird bereits die Skalenabhängigkeit deutlich. So könnte die im Zusammenhang mit der Interzeption vorgestellte Bestandesspeicherkapazität  $S_c$  definitionsgemäß als ein Teil des Speicherterms  $S$  aufgefasst werden. Diese Betrachtungsweise ist jedoch nur für Untersuchungen auf sehr kleiner Zeitskala ( $< 1$  Stunde) zweckmäßig. Üblicherweise wird daher der Bestandesspeicher getrennt von den übrigen Speichertermen behandelt.

Klassisch werden bei Wasserhaushaltsuntersuchungen 3 Speicherterme betrachtet: Schneespeicher  $S_s$ , Bodenspeicher  $S_b$  und geologischer beziehungsweise hydrogeologischer Speicher  $S_g$ . Der Schneespeicher ist gewissermaßen selbst erklärend. Darunter versteht man das Aufbauen beziehungsweise Abtauen und Sublimieren einer Schneedecke. Modelltechnisch ist aber eine prozessgerechte Abbildung von  $S_s$  außerordentlich schwierig und kann hier nicht eingehender behandelt werden. Gebräuchliche einfache Konzepte, die das Schmelzen einer Schneedecke simulieren, sind das Tagesgrad- und das Energieeintragsverfahren (Wärmehaushaltverfahren).

$S_b$  bezeichnet den Porenraum des Bodens, der entweder direkt durch  $P_n$  oder durch das Abschmelzen einer Schneedecke aus  $S_s$  gefüllt werden kann. Die Leerung erfolgt durch ET und durch Versickerung in den darunter liegenden geologischen Speicher  $S_g$  (Grundwasser). Im Vergleich zu anderen Landnutzungsformen gibt es bei Wäldern einige Besonderheiten. Zum Einen hat der Boden selbst meist auf Grund der geringeren Verdichtung und des höheren Humusgehalts einen höheren Porenraumanteil und dadurch eine größere Wasserspeicherkapazität. Zum anderen findet man in Wäldern aber auch oftmals eine sehr mächtige Streuauflage, die eine erhebliche Wassermenge speichern kann. Diese Streuauflage muss als zusätzliche Speicherkomponente  $S_p$  vorgeschaltet oder als Teilspeicher in  $S_b$  integriert werden.

Eine weitere Besonderheit betrifft die Leerung von  $S_b$  durch die Wurzelwasseraufnahme. Dieser Prozess wird durch die Transpiration  $T$  angetrieben und ist somit direkt an meteorologische und pflanzenphysiologische Faktoren gekoppelt. Wälder unterscheiden sich von niedrigen Vegetationsformen wie Gras durch ihre direkte pflanzenphysiologische Reaktion (Schließen der Spaltöffnungen) auf starken Verdunstungsanspruch der Atmosphäre oder reduzierter Wasserverfügbarkeit im Boden. Dadurch können Wälder die Transpiration steuern und in Trockenperioden ihren Wasserverbrauch stark einschränken (KÖSTNER und CLAUSNITZER 2011). Weiterführend unterscheiden sich Wälder von anderen Vegetationsformen oft auch durch die größere Wurzeltiefe und damit durch den größeren Bereich von  $S_b$ , der durch die Wurzelwasseraufnahme geleert werden kann. Dieser Faktor ist jedoch sehr art- und standortspezifisch und muss für einen konkreten Bestand individuell bewertet werden.

Die Herausforderung in der Beschreibung von  $S_b$  liegt in der großen räumlichen Heterogenität, die sowohl horizontal als auch vertikal in Erscheinung tritt und einer hohen zeitlichen Dynamik unterliegt. In Wasserhaushaltsmodellen wird meist nur die vertikale Variabilität und deren Dynamik beachtet. Dabei wird zur modelltechnischen Umsetzung oftmals ein mehrschichtiger Aufbau von  $S_b$  benutzt. Diese schichtweise Beschreibung des Bodens erlaubt es sowohl die Perkolation (also die Bewegung des Bodenwassers mit der Schwerkraft) als auch die Wurzelwasserentnahme prozessorientiert zu simulieren.

Unterhalb von  $S_b$  schließt sich der geologische Speicher  $S_g$  an. Dieser Speicher wird durch das Kluft- und Porensystem der anstehenden Gesteinsschicht gebildet und stellt vereinfacht die Speicherung im Grundwasserkörper dar. Die Füllung beziehungsweise Entleerung von  $S_g$  erfolgt primär schwerkraftgesteuert. Meteorologische als auch pflanzenphysiologische Faktoren haben hier nur indirekt Einfluss. Die Modellbildung und Beschreibung von  $S_g$  kann im Rahmen von Wasserhaushaltsuntersuchungen nur konzeptionell erfolgen. Insbesondere ist ein prozessorientiertes, physikalisch begründetes Modellkonzept für praktische Modellierungsaufgaben

unmöglich. Üblicher Weise wird  $S_g$  in Form eines Einzellinearspeichers oder durch eine Speicherkaskade ins Modell implementiert.

#### 4.2 Prozessorientierte Beschreibung von Abfluss und Abflusskomponenten

Als Abfluss können all die Teile der Wasserbilanz bezeichnet werden, die das untersuchte System in flüssiger Form verlassen. Entsprechend sind je nach gewählter Systemgrenze und Dimension (1D vs. 3D) des Modells die zu berücksichtigenden Abflusskomponenten unterschiedlich. Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich primär auf ein eindimensionales Modellkonzept.

Oberhalb des Bodens gibt es zunächst den Oberflächenabfluss  $R_o$ . Zur Entstehung von  $R_o$  kommt es, entweder wenn die Intensität des Bestandeswassereintrags  $P_n$  die Infiltrationskapazität des Bodens übersteigt oder wenn die Menge von  $P_n$  die Speicherkapazität  $S_\phi$  überschreitet. In beiden Fällen kommt es zum Überstau und im geeigneten Gelände zum lateralen oberflächlichen Abfluss. In den meisten Waldbeständen tritt  $R_o$  aufgrund der spezifischen Bodeneigenschaften (großes Speichervermögens und hohe Infiltrationsleistung) allerdings nur bei Starkregenereignissen auf.

Die anderen Abflusskomponenten entstehen durch infiltriertes Wasser. Ihre Beschreibung ist eng mit der Bodenwasserbewegung beziehungsweise der Strömung im Kluft- und Porensystem verbunden. Aufbauend auf dem vorgestellten Speicherkonzept lassen sich bei vertikaler Betrachtung drei Systemgrenzen und damit drei Abflusskomponenten definieren. Die oberste Systemgrenze befindet sich unterhalb des Wurzelraums. Die zugehörige Abflusskomponente ist die Versickerung  $R_s$ .  $R_s$  bezeichnet den Anteil des Bestandeswassereintrags, der nicht durch Transpiration und Bodenverdunstung der Evapotranspiration zugeführt wurde sondern schwerkraftbedingt das System nach unten verlässt. Diese Komponente ist besonders interessant, wenn die pflanzenphysiologische Beeinflussung des Wasserhaushalts untersucht werden soll.

Die nächste Systemgrenze stellt den Wassereintrag in den Grundwasserkörper beziehungsweise in  $S_g$  dar und wird entsprechend als Grundwasserneubildung  $R_g$  bezeichnet. Bei eindimensionaler Betrachtung sind  $R_g$  und  $R_s$  quasi identisch. Bei mehrdimensionaler Betrachtung auf Einzugsgebiets- beziehungsweise Landschaftsebene oder im Zusammenhang mit Be- und Entwässerung ist jedoch eine Unterscheidung zweckmäßig. Die letzte Systemgrenze ist der Wasseraustritt aus  $S_g$ . Aus klassischer hydrologischer Sicht ist dies der „eigentliche“ Abfluss  $R^*$ , welcher das System bezeichnet, dass auf Einzugsgebietsebene das System verlässt. Dabei ist zu beachten, dass der Term  $R^*$  sowohl das in Bächen und Flüssen abfließende Oberflächenwasser  $R_o^*$  als auch das in Aquiferen abströmende Grundwasser  $R_g^*$  beinhaltet.

#### 4.3 Modellbildung zur Abflussbeschreibung auf Einzugsgebiets- und Landschaftsskala

Es ist erkennbar, dass nicht nur die quantitative Menge sondern auch die zeitliche Dynamik aller Abflusskomponenten durch das integrative Wirken von meteorologischen, biologischen und geologischen Faktoren bestimmt wird. Bei mehrdimensionaler Betrachtung muss zusätzlich die Interaktion der Abflusskomponenten untereinander beachtet werden. Ein einfaches Beispiel dafür ist, dass an einer Stelle Oberflächenabfluss  $R_o$  entsteht, welcher jedoch an anderer Stelle infiltriert und von dort über die Transpiration verdunstet. Komplexere Beispiele lassen sich leicht für das orographisch geprägte Gelände konstruieren, wo neben der vertikalen Wasserbewegung auch laterale Zu- und Abflüsse beachtet werden müssen.

Eine prozessorientierte Beschreibung des Abflusses auf Einzugsgebiets- oder Landschaftsskala ist auf Grund der Vielfalt der zu berücksichtigenden Prozesse nicht realisierbar. Bewährt hat sich eine konzeptionelle systemanalytische Beschreibung mittels einer dreistufigen Speicherkaskade. Dabei wird das gesamte Speicher- und Infiltrationsverhalten eines Gebietes durch das Füllungs- und Leerlaufverhalten von drei Einzellinearspeichern stark abstrahiert und generalisiert abgebildet. Im Allgemeinen werden die Bezeichnungen geologischer Speicher  $S_g$  und Bodenwasserspeicher  $S_\phi$  beibehalten. Zusätzlich wird noch ein Oberflächenspeicher  $S_o$  zur Beschreibung des Muldenrückhalts eingeführt. Es ist jedoch zu beachten, dass die Parametrisierung dieser drei Speicher nicht direkt mit physikalisch messbaren Größen in Zusammenhang gebracht werden darf. Weiterführend erfordert dieses Speicherkonzept eine vereinfachte Abbildung der Transpiration. Insbesondere muss die Wurzelwasseraufnahme stark vereinfacht und generalisiert werden.

Die Abflussbeschreibung selbst funktioniert über die Superpositionierung der Abflüsse aus den einzelnen Speichern und beinhaltet: (i) den Oberflächen- oder Direktabfluss  $R_o$  als Ablauf von  $S_o$ , (ii) den hypodermischen Abfluss oder schnellen Basisabfluss  $R_{B1}$  als Ablauf von  $S_\phi$  und (iii) den Grundwasserabfluss beziehungsweise langsamen Basisabfluss  $R_{B2}$  als Abfluss von  $S_g$ . Es ist klar, dass durch diese generalisierte Betrachtung die räumliche Heterogenität im Einzugsgebiet und die Besonderheiten einzelner Standorte verwaschen werden. Weiterführend sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Beschreibung von  $R_o$ ,  $R_{B1}$  und  $R_{B2}$  nicht mit real auftretenden Abflussbildungsprozessen verwechselt werden darf. Entsprechend kann dieses Modellkonzept quantitativ nur zur Analyse des superpositionierten Gesamtabflusses  $R^*$  eingesetzt werden.

#### 4.4 Messtechnische Erfassung von Abfluss und Speicher

Die Möglichkeiten einer messtechnischen Quantifizierung der Speicherterme beschränken sich auf die Wasserspeicherung im Boden. Eine Quantifizierung des geologischen Speichers oder eine Bemessung der konzeptionellen Speicherterme auf Einzugsgebietsebene kann nur durch inverse

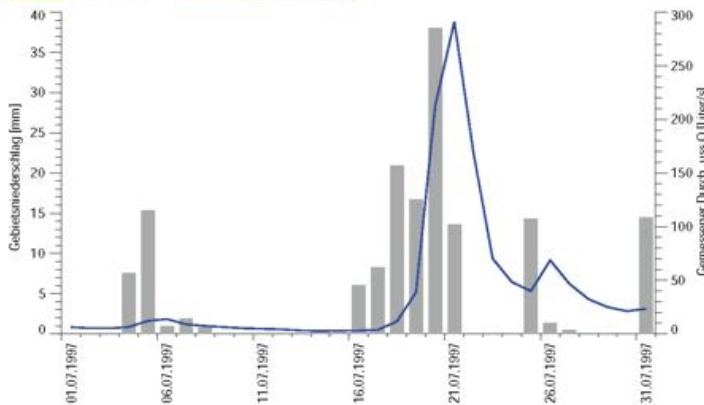


Abb. 9-7: Oben: Messanlage mit Messwehr zur Erfassung des Abflusses von einem Einzugsgebiet im Tharandter Wald (Wemersbach, 4,6 km<sup>2</sup>); unten: Gebietsniederschlag und am gleichen Pegel gemessener Durchfluss (weitere Erläuterungen siehe Text).

Modellierung beispielsweise mittels Ganglinienseparati-on (DIFGA-Methodik siehe SCHWARZE 2004) erfolgen. Aber selbst die Bestimmung von  $S_{\phi}$  ist mit sehr großen Unsicherheit verbunden und kann nur auf Standortsskala erfolgen. Üblicherweise wird  $S_{\phi}$  aus dem Porenraumanteil des Mineralbodens und dem quellfähigen Porenvolumen der Humus- beziehungsweise Streuauflage abgeleitet. In diesem Zusammenhang stellt die große Heterogenität der Bodeneigenschaften eine erhebliche Unsicherheitsquelle dar.

Neben der Bestimmung von  $S_{\phi}$  ist die Erfassung der aktuellen Füllung beziehungsweise die Erfassung deren Änderung  $\Delta S_{\phi}$  eine messtechnische Herausforderung. Für niedrige Vegetation kann dies mittels der schon erwähnten Lysimetermessungen realisiert werden. Eine grobe Abschätzung für Waldbestände liefern Bodenfeuchtemessungen, wobei sich insbesondere TDR- und FDR-Sensoren zum Monitoring eignen. Das Problem derartiger Messung ist nicht die Genauigkeit der Sensoren, sondern die repräsentative Erfassung. Insbesondere durch präferentielle Fließwege, die sich an Wurzeln und Tiergängen ausbilden, aber auch durch die allgemein sehr hohe Variabilität der Bodeneigenschaften und nicht zuletzt durch Inhomogenität des Bestandeswasserinhalts ist eine immense Variabilität der Bodenfeuchte auf

kleinster Raumskala zu beobachten (SCHWÄRZEL et al. 2009). Entsprechend ist die repräsentative Erfassung selbst für Einzelbestände sehr aufwendig und fehlerlastig.

Ähnlich wie der Speicher kann auch die Messung des Abflusses nur an ausgewählten Systemgrenzen messtechnisch realisiert werden. Bei Wäldern beschränkt sich die Messung meist auf die Einzugsgebietskala und somit auf die Erfassung von  $R^*$ . Messtechnisch müssen dabei zwei Komponenten: das abfließende Oberflächenwasser  $R^*_o$  und der Grundwasserabstrom  $R^*_g$  berücksichtigt werden. Die Aufteilung von  $R^*$  in die beiden Komponenten ( $R^*_o$  und  $R^*_g$ ) ist sehr von Geländeneigung und geologischen Beschaffenheit des Einzugsgebietes abhängig. So ist  $R^*_g$  bei Einzugsgebieten im Tiefland oder in verkarsteten Gebieten der dominierende Anteil. In dem meisten Mittelgebirgseinzugsgebieten oder im alpinen Bereich ist jedoch  $R^*_g$  oft-mals vernachlässigbar.

Die Erfassung von  $R^*_g$  ist sehr aufwendig. Eine Messung im klassischen Verständnis erfordert erhebliche bauliche Eingriffe (Spundwände, Dichtungsschleier), die das abströmende Grundwasser fassen und einem Oberflächen-gewässer zuführen. Doch auch die Erfassung von  $R^*_o$  ist vielfach nicht ohne bauliche Eingriffe in das Gewässer umsetzbar. Grundsätzlich basiert die Erfassung von  $R^*_o$  und damit die Bestimmung von  $R^*$  auf der Messung des Wasserstands  $W$  und der Ableitung des zugehörigen Durchflusses  $Q$ . Der Abfluss ( $R^*$ ) ergibt sich dann aus der zeitlichen Integration (Zeit,  $t$ ) und der Division mit der Einzugsgebietsfläche  $A_{EZG}$ :

$$R^* = \frac{\int_{t=0}^t Q(t) dt}{A_{EZG}} \quad (10)$$

Das eigentliche Problem bei der Bestimmung ist der nicht-lineare Zusammenhang zwischen  $W$  und  $Q$  sowie die in natürlichen Gerinnen auftretende Hysterese zwischen ansteigenden und fallenden Wasserstand. Zur Umgehung dieser Probleme eignen sich in kleinen Einzugsgebieten Pegelstationen mit Messwehren oder Venturigerinnen. Durch diese bautechnischen Lösungen wird ein definierter Zusammenhang zwischen  $W$  und  $Q$  hergestellt.

Eine typische Messanlage zur Erfassung von  $R^*$  in kleinen Einzugsgebieten wird in Abbildung 9-7 gezeigt. Auf der rechten Seite wird exemplarisch die an diesem Pegel gemessene Abflussganglinie mit dem zugehörigen Gebietsniederschlag für den Zeitraum 01.07. bis 31.07.1997 dargestellt. Es ist deutlich die Reaktion des Abflusses auf den Niederschlagseintrag in Abhängigkeit der Speicherfüllung erkennbar. So wird der Niederschlagsinput der ersten Niederschlagsperiode (04.07. bis 08.07.) fast vollständig zur Speicherfüllung verbraucht. Erst in den darauf folgenden Niederschlagsperioden ist eine Reaktion des Abflusses zu sehen. Dabei ist ersichtlich, dass die Reaktion zeitlich verzögert erfolgt und asymptotisch ausläuft. Dieses Verhalten ist besonders im Verlauf der Abflussganglinie im Anschluss auf den Niederschlagseintrag vom 25.07.1997 zu beobachten.

#### 4.5 Praktische Relevanz von Abflussmessungen für die Analyse des Wasserhaushaltes von Waldstandorten

In der hydrologischen Praxis stellt die Verfügbarkeit von Messwerten der Evapotranspiration ET beziehungsweise einzelner Verdunstungskomponenten die absolute Ausnahme dar. Dieser Sachverhalt gilt insbesondere für Waldstandorte, wo Lysimetermessungen zur exakten Quantifizierung der Wasserbilanzkomponenten ausgeschlossen sind. Für die meisten Standorte sind Niederschlag und einige leicht messbare meteorologischen Größen wie Lufttemperatur und Luftfeuchte oftmals die einzig verfügbaren Daten. Das heißt, zur Verdunstungsbeschreibung könnte lediglich die potentielle Verdunstung  $ET_p$  herangezogen werden. ( $ET_p$  entspricht der theoretisch maximal möglichen Verdunstung, die bei den gegebenen klimatischen Bedingungen und optimaler Wasserversorgung auftritt.) Daraus ergibt sich, dass die Besonderheiten eines Standorts im Bezug zur Wasserbilanz und insbesondere im Hinblick auf Effekte von Vegetation und Boden mit den verfügbaren Informationen in aller Regel nicht auf Standortskala untersucht werden können.

Einen Ausweg stellt die Analyse des Wasserhaushalts auf Einzugsgebietsebene und die Integration von Messwerten des Abflusses  $R^*$  dar. Vom Wesen her entspricht die Messung von  $R^*$  dem Monitoring der individuellen Systemantwort des Einzugsgebiets auf die meteorologischen, geologischen und biologischen Bedingungen. Praktisch heißt das, dass der gemessene Abfluss die zeitlich verzögerte und gedämpfte Reaktion auf den gefallen Niederschlag einerseits sowie auf die durch biotische und abiotische Prozesse angetriebene Verdunstung andererseits repräsentiert. Für kleine homogene Einzugsgebiete lässt sich daraus ableiten, dass hier die Systemantwort relativ direkt mit den bodenhydraulischen und pflanzenphysiologischen Eigenschaften verbunden ist.

Durch die Analyse des Systemverhaltens (insbesondere zwischen Niederschlag und Abfluss) kleiner Einzugsgebiete ( $< 10 \text{ km}^2$ ) lassen sich wichtige Erkenntnisse zu beziehungsweise die Besonderheiten von Wäldern im Bezug zum Wasserhaushalt herausarbeiten. Dabei kann (i) die Systemantwort selbst (also die zeitliche Verzögerung und Dämpfung der Abflussganglinie gegenüber dem gefallen Niederschlag) oder (ii) die Bilanzierung des Abflusses Untersuchungsschwerpunkt sein.

Die Analyse der Systemantwort ist die Grundlage der Kalibrierung und Validierung von Wasserhaushaltsmodellen auf Einzugsgebietsskala. Dabei wird versucht durch eine geeignete Parameterwahl die Systemantwort des Einzugsgebiets durch das Modell nachzubilden. Es wird davon ausgegangen, dass wenn die Systemantwort richtig beschrieben wurde, die maßgebenden Prozesse vom Modell berücksichtigt sind. Messwerte des Abflusses sind also notwendige Voraussetzung, um ein numerisches Wasserhaushaltsmodell an die jeweiligen Gebietseigenschaften anzupassen.

Neben der Bedeutung als Referenzgröße können Abflussdaten auch direkt zur Quantifizierung der Wasserbilanz für

größere Zeitskalen eingesetzt werden. Für große Zeiträume ist anzunehmen, dass sich die Menge an Zu- und Abfluss in den Speicher S ausgleicht beziehungsweise dass sich die Effekte der Speicheränderung  $\Delta S$  ausgeglichen haben. Entsprechend kann das langjährige Mittel der Evapotranspiration  $ET_m$  als Restglied,

$$ET_m = P - R, \tag{11}$$

näherungsweise bestimmt werden. Diese Methode eignet sich besonders für kleine, nicht verkarstete Einzugsgebiete in Mittelgebirgen, wo S vornehmlich durch den Bodenspeicher  $S_b$  repräsentiert wird. Für diese Gebiete kann diese Methode mit einer gewissen Restunsicherheit auch für die Jahresskala angewendet werden. Zur Reduktion der Unsicherheit durch unterschiedliche Speicherfüllung ist es jedoch zweckmäßig die Bilanzen nicht auf Grundlage kalendarischer Jahre zu machen. Sinnvoll ist es zur Abtrennung Perioden zu wählen, wo erfahrungsgemäß ähnliche Grade der Speicherfüllung vorliegen. Klassisch wird nach dem Hydrologischen Jahr der 1. November als Stichtag verwendet. Günstiger ist allerdings (zumindest für niedrigere Lagen in Mitteleuropa) den 1. April zu verwenden (WESSOLEK et al. 2008), da im Frühjahr auf Grund von Schneeschmelze und reduzierter Verdunstung im Winter die Speicher und insbesondere  $S_b$  meist vollständig gefüllt sind und entsprechend Effekte durch unterschiedliche Speicherfüllung stark reduziert werden.

In Abbildung 9-8 wird für den Wernersbach im Tharandter Wald die Verteilung des Einzugsgebietsniederschlags P auf die Summe aus Evapotranspiration ET und Speicheränderung  $\Delta S$  beziehungsweise auf den Abfluss R gezeigt. Es ist deutlich erkennbar, dass P und R eine sehr starke zwischenjährige Variation aufweisen. Die Variation von ET beziehungsweise exakter  $ET + \Delta S$  ist dagegen gering. Für das dargestellte Beispiel beträgt die Standardabweichung 160 mm (17 %) für P, 112 mm (48 %) für R, aber nur 81 mm (11 %) für den Term  $ET + \Delta S$ . Die unterschiedliche Variabilität zwischen R und  $ET + \Delta S$  verdeutlicht die Limitierung beziehungsweise Steuerung der Verdunstung durch die Strahlungsbilanz, welche im Vergleich zum Niederschlag nur geringere zwischenjährige Unterschiede aufweist. Entsprechend ergibt sich für den Abfluss, dass dieser massiv durch Variabilität des Niederschlags bestimmt wird. Diese Verhältnisse sind für Mitteleuropa durchaus typisch. Abweichungen von diesem generellen Muster treten nur in ausgesprochenen Trockenjahren auf, wenn die Wasserverfügbarkeit einen stärkeren Einfluss auf die Verdunstung ausübt.

Allgemein bleibt festzuhalten, dass in außeralpinen mitteleuropäischen Einzugsgebieten der Niederschlag zum Großteil verdunstet und nur ein geringer Teil zum Abfluss kommt. Bezogen auf das mittlere Verhalten von Einzugsgebieten in Deutschland geht rund die Hälfte bis drei Viertel des gefallen Jahresniederschlags in die Verdunstung. Dabei tritt bedingt durch den West-Ost-Gradient des Niederschlags eine Abnahme des Abflusses von West nach Ost auf, wobei die Verdunstung nur geringfügig zurückgeht. Die Beeinflussung durch die vorherrschende Landnutzungsform ist

jedoch deutlich größer als dieser Ost-West-Unterschied. So ist die Jahressumme des Abflusses bei Wäldern meist niedriger als bei anderen Landnutzungsformen wie zum Beispiel ackerbaulicher Nutzung (GOLDBERG und BERNHOFER 2006).

## 5 Wasserhaushaltsmodellierung von Wäldern in der hydrologischen Praxis

Die Wasserbilanz beziehungsweise die Aufteilung des Niederschlags in Abfluss und Verdunstung (Evapotranspiration) wird durch die vielfältigen Interaktionen zwischen abiotischen und biotischen Faktoren bestimmt. Dabei machen neben den oftmals nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen meteorologischen Antrieb und pflanzenphysiologischen beziehungsweise bodenhydrologischen Faktoren, die internen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Wasserhaushaltskomponenten das System hochgradig komplex. Auf Grundlage dieser vielfältigen Wirkmechanismen erfordern Untersuchungen des Wasserhaushalts immer eine interdisziplinäre Betrachtungsweise. Insbesondere überschneiden sich die Fachgebiete: Hydrologie, Geologie, Bodenkunde, Forst- und Landwirtschaft, Biologie und Meteorologie. Aber auch Fachwissen aus den Bereichen der Mathematik, Informatik und Systemtheorie ist unerlässlich für Modellbildung und quantitative Beschreibung.

Für Waldbestände sind im Vergleich zu anderen Vegetationsformen die viel komplexeren Prozessabläufe, die sich durch den mehrschichtigen Aufbau (Struktur) als auch durch die artspezifischen Charakteristika (Physiologie) ergeben, hervorzuheben. Weiterführend sind die besonderen Bodeneigenschaften zu beachten, wodurch sich das Abfluss- und Speicherverhalten maßgebend von anderen Landnutzungsformen unterscheidet. Eine vollständige prozessorientierte Beschreibung des Wasserhaushalts ist nur auf Bestandesebene beziehungsweise Standortsskala realisierbar, wobei auch hier eine vollständige physikalisch begründete Modellierung aller Teilprozesse nicht möglich ist. Somit müssen auch bei prozessorientierten Modellen vielfach vereinfachte beziehungsweise empirische Beschreibungen zur Abbildung diverser Teilprozesse verwendet werden. Modelle die zur prozessorientierten Modellierung auf Standortsskala eingesetzt werden können sind unter anderem BROOK90 (FEDERER 2012) und CoupModel (KTH 2012).

Zur Beschreibung des Wasserhaushalts auf größeren Raumskalen wie Einzugsgebieten oder Landschaften sind weitgreifende Vereinfachungen und Generalisierungen in der Modellstruktur erforderlich. Weiterführend erfordert die prozessorientierte Beschreibung sehr viele Informationen unter anderem über Bestandesstruktur und Bodeneigenschaften, die oftmals nicht vorhanden sind, was weitere Vereinfachungen erfordert.

Die einfachste Modellform sind Black-Box-Modelle. Diese Modelle entsprechen einer rein systemanalytischen Betrachtung

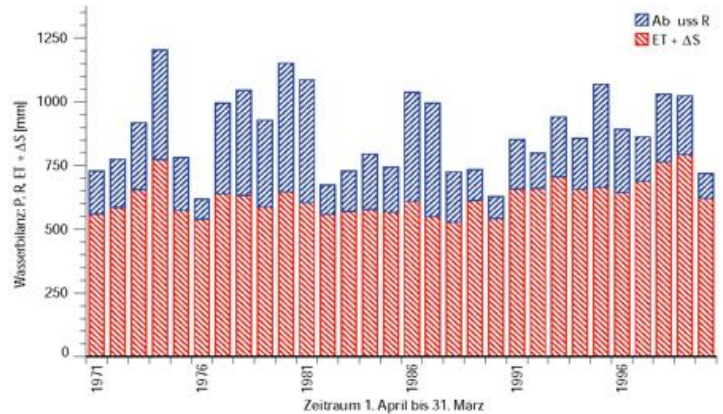


Abb. 9-8: Aus Niederschlag und Abfluss abgeleitete Jahresevpotranspiration für ein bewaldetes Einzugsgebiet im Tharandter Wald (Wernersbach, 4,6 km<sup>2</sup>).

und beschreiben den empirischen beziehungsweise statistisch gefundenen Zusammenhang zwischen Input (Niederschlag) und Output (Abfluss beziehungsweise Verdunstung). Beispiele für derartige Modelle sind das Bagrov-Glugla-Verfahren (siehe ATV-DVWK 2002) oder die Hydropedotransferfunktionen nach WESSOLEK et al. (2008), die im Zusammenhang mit planerischen Aufgaben in Deutschland (siehe zum Beispiel Hydrologischer Atlas, BMU 2003) vielfach gebräuchlich sind. Der Nachteil derartiger Modelle ist, dass sie die zugrundeliegenden Prozesse komplett vernachlässigen und nur bekannte Zustände abbilden können. Damit eignen sich Black-Box-Modelle zwar für die Beschreibung des mittleren Verhaltens, sie können aber nicht zur Analyse von Effekten, die das System verändern, wie unter anderem forstwirtschaftliche Eingriffe oder Klimawandel, genutzt werden.

Ein Bindeglied zwischen Black-Box-Modellen und vollständiger prozessorientierter Beschreibung sind konzeptionelle Wasserhaushaltsmodelle. Vom Wesen her orientiert sich dieser Modelltyp an einer kausalen Abbildung der relevanten Prozesse. Modelltechnisch erfolgt deren Beschreibung aber oftmals stark vereinfacht. Das heißt, einzelne Prozesse können in einem konzeptionellen Modell durchaus einer Black-Box-Beschreibung entsprechen. Andererseits werden aber auch wichtige Prozessabläufe durch Analogiebetrachtungen ersetzt, oder es ist ein vollständig physikalisch begründeter Ansatz zur Nachbildung einzelner Teilkomponenten implementiert. Tatsächlich sind neben den noch einfacheren Black-Box-Modellen alle verfügbaren Wasserhaushaltsmodelle für Einzugsgebiete und Landschaften konzeptionelle Modelle. Je nach Anwendungszweck und im speziellen nach interessierender Raumskala überwiegen prozessorientierte Beschreibung und physikalisch begründete Modellierung der Teilprozesse wie zum Beispiel MIKE SHE (DHI 2012) oder systemanalytische Betrachtung mit Fokus auf einer zweckmäßigen Beschreibung der Input-Output-Beziehungen wie zum Beispiel AQUA-M (MÜNCH 1995).

## Danksagung

Der hohe Wert von Langzeitbeobachtungen ist oftmals erst nach vielen Jahren erkennbar und verlangt entsprechende

Weitsicht. Unser Dank gilt insbesondere den zuständigen Professoren Prof. Dr. Hermann Pleiß (bis 1986), der das Monitoringprogramm initialisierte, und Prof. Dr. Gerd Peschke (1986-1993), sowie den technischen Mitarbeitern der Meteorologie in Tharandt. Für diesen Beitrag sind insbesondere Uwe Eichelmann, Horst Hebertanz und Heiko Prasse hervorzuheben. Besondere Würdigung verdient auch die intensive Zusammenarbeit mit PD Dr. Barbara Köstner, Dr. Kai Schwärzel und Prof. Dr. Karl-Heinz Feger.

**Literatur**

ATV-DVWK, 2002: Kapitel 7, Berechnung der mittleren jährlichen tatsächlichen Verdunstung unter Berücksichtigung von Landnutzung und Boden. In *ATV-DVWK-Regelwerk: Merkblatt M 504, Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden*. 91-116.

AUBINET, M., GRELLE, A., IBROM, A., RANNIK, et al., 2000: Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: The EUROFLUX Methodology. *Advances Ecol. Res.* **30**, 113-175.

BAUMGARTNER, A., LIEBSCHER, H. J., 1996: Allgemeine Hydrologie - Quantitative Hydrologie, 2. Auflage. *Gebrüder Bornträger Berlin Stuttgart*, 694 Seiten.

BERNHOFER, C., SPANK, U., CLAUSNITZER, F., KÖSTNER, B., GRÜNWALD, T., EI-CHELMANN, U., MENZER, A., FEGER, K.-H., SCHWÄRZEL, K., 2011: Mikrometeorologische, pflanzenökologische und bodenphysiologische Messungen in Fichten- und Buchenbeständen im Tharandter Wald. *Waldökologie, Landesforschung und Naturschutz* **12**, 17-28.

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Ed.), 2003: Hydrologischer Atlas von Deutschland, 3. Lieferung, Bonn.

CERMÁK, J., DEML, M., PENKA, M., 1973: A new method of sap flow rate determination in tress. *Biologia Plantarum (Praha)* **15**, 171-178.

CERMÁK, J., KUCERA, J., PENKA, M., 1976: Improvement of the method of sap flow rate determination in full-grown trees based on heat balance with direct electric heating of xylem. *Biologia Planatarum (Praha)* **18**, 105-110.

DHI, 2012: MIKE SHE - integrated catchment modelling. Available via dialog: <http://mikebydhi.com/Products/WaterResources/MIKESHE.aspx>.

DVWK, 1986: Ermittlung des Interzeptionsverlustes in Waldbeständen bei Regen. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft 211/1986, *Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin*, 11 Seiten.

DYCK, S., PESCHKE, G., 1995: Grundlagen der Hydrologie, 3. Auflage. *Verlag für Bauwesen, Berlin*, 536 Seiten.

FEDERER, C. A., 2012: BROOK 90 - A simulation model for evaporation, soil water, and streamflow. Available via dialog: <http://home.roadrunner.com/~stfederer/brook/brook90.htm> (accessed 16th Nov. 2009).

GASH, J. H., 1979: An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **105**, 43-55.

GOLDBERG, V., BERNHOFER, C., 2006: Water balance

of forested catchments. In: LOZÁN, J. L., GRABL, H., HUPFER, P., MENZEL, L., SCHÖNWIESE, C.-D. (Hrsg.): *Global Change: Enough Water for all? Wissenschaftliche Auswertungen*, 2nd Ed., Hamburg, 72-76.

GRANIER, A., 1985: Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestieres* **42**, 193-200.

GRANIER, A., 1987: Evaluation of transpiration in a Douglasfir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology* **3**, 309-320.

KÖSTNER, B., CLAUSNITZER, F., 2011: Die Transpiration eines Fichten- und Buchenbestandes unter Bodentrockenheit im Tharandter Wald. *Waldökologie, Landesforschung und Naturschutz* **12**, 29-35.

KTH (Institutionen för mark- och vattenteknik), 2012: CoupModel - Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere system. Available via dialog: <http://www2.lwr.kth.se/CoupModel/index.html>.

LEE, X., MASSMAN, W. J., LAW, B., 2004: Handbook of Micrometeorology. A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library Vol. **29**, *Kluwer Academic Publishers*, 250 Seiten

MÜNCH, A., 1995: Wasserhaushaltsuntersuchungen für Mittelgebirgseinzugsgebiete unter Berücksichtigung einer sich ändernden Landnutzung. Diss. TU Dresden.

RUTTER, A. J., KERSHAW, K. A., ROBINS, P. C., MORTON, A. J., 1971: A Predictive Model of Rainfall Interception in Forest, 1. Derivation of the Model from Observations in a Plantation of Corsian Pine. *Agricultural Meteorology* **9**, 367-384.

SCHWARZE, R., 2004: Analyse und Modellierung unterirdischer Abflusskomponenten und ihrer Verweilzeit in Festgesteinseinzugsgebieten der Mulde. In: BRONSTERT et al. (Herausgeber): *Wasser- und Stofftransport in heterogenen Flussgebieten. Forum für Hydrologie und Wasserwirtschaft, ATV-DVWK, Heft 5*, 209-219.

SCHWÄRZEL, K., MENZER, A., CLAUSNITZER, F., SPANK, U., HÄNTZSCHEL, J., GRÜNWALD, T., KÖSTNER, B., BERNHOFER, C., FEGER, K.-H., 2009: Soil water content measurements deliver reliable estimates of water fluxes: A comparative study in a beech and a spruce stand in the Tharandt forest (Saxony, Germany). *Agricultural and Forest Meteorology* **149**, 1994-2006

SHUTTLEWOTH, W. J., 1993: Evaporation. In: MAIDMENT, D. R. (Herausgeber): *Handbook of Hydrology. McGraw-Hill Professional*, 4.1-4.53.

SPANK, U., 2010: Site Water Budget: Influences of Measurement Uncertainties on Measurement Results and Model Results. Diss. TU Dresden. Available via dialog <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-62557> (accessed 10th Jan 2011).

SPANK, U., BERNHOFER, C., 2008: Another simple method of spectral correction to obtain robust eddy-covariance results. *Boundary-Layer-Meteor.* **128**, 403-422.

WESSOLEK, G., DUIJNISVELD, W. H. M., TRINKS, S., 2008: Hydropedotransfer functions (HPTFs) for predicting annual percolation rate on a regional scale. *J. Hydrol.* **356**, 17-27.

D. SCHINDLER, H. MAYER

# 10 Naturgefahren für die Wälder Europas: Winterstürme

## Natural hazards in European forests: winter storms

### Zusammenfassung

Extreme Wetterereignisse sind Teil der natürlichen Störungsdynamik von Waldökosystemen. Sie werden den abiotischen Naturgefahren zugerechnet. In Europa nehmen Winterstürme unter den Naturgefahren für Wälder gegenwärtig eine herausragende Stellung ein, da sie aufgrund ihrer großräumigen Ausdehnung und der extremen Ausprägung ihrer bodennahen Strömungsfelder das größte Gefährdungspotenzial für Wälder aufweisen. In den letzten Jahrzehnten verursachten sie europaweit ein deutlich höheres Schadholzaufkommen als Feuer und Schnee. Wegen ihrer großen Bedeutung für Wälder und die Forstwirtschaft ist die Herleitung quantitativer Parameter, die sich zur prozessbasierten Beschreibung der Sturmschadensentstehung eignen, unerlässlich. Aufgrund der komplexen und komplizierten Interaktionen zwischen Bodeneigenschaften, Baum-/Bestandeseigenschaften, anthropogenen Einflüssen, Orografie und schadenauslösender Wettersituation basieren die meisten Untersuchungen zu Sturmschäden in Wäldern jedoch nach wie vor auf retrospektiven, empirischen Ansätzen. Das gegenwärtige Prozessverständnis zur Sturmschadensentstehung sowie die eingeschränkte Verfügbarkeit problemstellungsrelevanter meteorologischer und forstlicher Datensätze schränken die Parametrisierung und Anwendung prozessbasierter Sturmschadensmodelle noch stark ein.

### Summary

Extreme weather events are part of the natural disturbance dynamics of forest ecosystems. In Europe, severe winter storms are currently the main hazard in forest ecosystems, because of their large expansion and their high-impact near-surface flow field characteristics. In recent decades, storms have caused a much higher volume of damaged timber as fire and snow together. Because of the great importance of storms for forests and forestry, the demand for mechanistic models that can be used to analyse and simulate processes involved in storm damage formation is increasing. However, due to the complex and complicated interactions between soil properties, tree and stand properties, anthropogenic influence, orography, and damage-causing weather conditions, most studies on storm damage in forests are based on retrospective analysis using empirical approaches. The current understanding of the processes involved in storm damage formation as well as the limited availability of comprehensive datasets narrow the parameterisation and application of mechanistic wind damage models.

## 1 Einleitung

Waldökosysteme sind nicht nur mittleren atmosphärischen Zuständen und deren Änderungen ausgesetzt, sondern auch extremen Wetterereignissen. Extreme Wetterereignisse sind Teil der natürlichen Störungsdynamik von Waldökosystemen und werden den abiotischen Naturgefahren zugerechnet. Unter Naturgefahren für Wälder verstehen SEIDL et al. (2011) Einzelereignisse, die

- Waldökosystemstrukturen,
- die Artenzusammensetzung von Waldökosystemen,
- Prozesse in Waldökosystemen

modifizieren. Die durch Naturgefahren bedingte Veränderung der physikalischen Umwelt führt in der Regel zum Verlust von belebter pflanzlicher Biomasse. Die reversible Einwirkung einer oder mehrerer Naturgefahren verursacht

vergleichsweise große Änderungsraten von Waldökosystemzuständen, gefährdet aber nicht die Ökosystemstabilität.

Die Erkennung, Bemessung und Bewertung von Naturgefahren erfolgt für Wälder meistens über deren Auswirkungen auf die Holzproduktion. Die Bewertung von Naturgefahren im Zusammenhang mit anderen Leistungen von Wäldern (Erholungsfunktion, Schutzfunktionen) ist aufgrund mangelnden Wissens bisher quantitativ nur unzureichend möglich (LINDNER et al. 2010). Trotz ihrer meistens abrupten Einwirkung haben Naturgefahren nicht nur kurzfristige und lokale, sondern auch langfristige und regionale Auswirkungen auf Zustände und Prozesse in Wäldern. Bezogen auf die angefallene Schadholzmenge haben sich in den letzten Jahrzehnten Stürme, Feuer und Schnee als die bedeutendsten abiotischen Naturgefahren für die Wälder

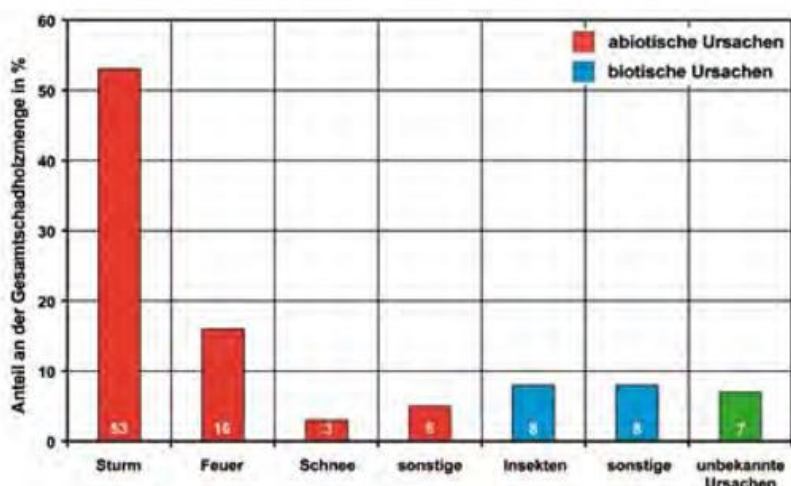


Abb. 10-1: Für die europäischen Wälder im Zeitraum 1950-2000 bedeutendsten Naturgefahren (nach SCHELHAAS et al. 2003).

in Europa herausgestellt. Sie haben nicht nur eine direkte Schadenswirkung, sondern können zusätzlich

- die Vitalität des verbleibenden Bestandes reduzieren,
- sekundäre biotische Naturgefahren, zum Beispiel Massenvermehrungen von Borkenkäfern wie dem Buchdrucker (*Ips typographus*) begünstigen,
- zu massiven Störungen von regulären Abläufen in Forstbetrieben führen,
- betriebswirtschaftliche Einbußen (Holzpreisverfall, Lagerkosten, beschädigtes Holz) verursachen,
- waldbaulich-ertragskundliche Folgeschäden (Hiebsunreife, Änderung der Baumartenzusammensetzung) nach sich ziehen.

In der forstlichen Öffentlichkeit in Europa wird derzeit spekuliert, ob die negativen Auswirkungen abiotischer Naturgefahren für die zukünftige Holzproduktion bedeutender sind als die Herausforderungen für Wälder, die durch den derzeit ablaufenden Klimawandel und die damit verbundenen Änderungen mittlerer atmosphärischer Zustände verursacht werden. Aus Sicht der Forstwirtschaft könnten Veränderungen der abiotischen Störungsdynamik eine Revision etablierter Waldbaustrategien und langfristiger Produktionszeiträume erforderlich machen. Würden sich zum Beispiel die Häufigkeit, die Intensität und/oder die jahreszeitliche Verteilung von Stürmen ändern, könnten sich die mit dem Nadelholzanbau verbundenen Risiken weiter erhöhen und die Stabilitätsvorteile von Laubbaumarten (im Winter unbelaubt) in Frage gestellt werden (ALBRECHT et al. 2009).

Bezogen auf den Zeitraum 1950-2000 geben SCHELHAAS et al. (2003) für die europäischen Wälder den Anteil der Schadholzmenge infolge von Stürmen an der angefallenen Gesamtschadholzmenge mit 53 % an. Damit dominiert die durch Stürme verursachte Schadholzmenge über die durch Feuer und Schnee sowie über die durch biotische Naturgefahren wie Insekten verursachte Schadholzmenge deutlich (Abb.10-1).

Da das durch Winterstürme verursachte Schadholzaufkommen in den europäischen Wäldern die durch andere

Naturgefahren verursachten Schadholzmengen bei weitem übersteigt, wird im Folgenden beispielhaft der Fokus auf die Entstehung von Schäden in Wäldern durch Winterstürme sowie die Untersuchung der Schadensentstehung gelegt. Weiterführende Ausführungen zur Bedeutung der anderen in Abb. 10-1 aufgeführten Naturgefahren finden sich in den Übersichtsartikeln von LINDNER et al. (2010) sowie SEIDL et al. (2011).

## 2 Sturmschäden in den Wäldern Europas

Von allen meteorologischen Extremereignissen weisen Winterstürme aufgrund ihrer großräumigen Ausdehnung und der extremen Ausprägung ihrer bodennahen Strömungsfelder

das größte Gefährdungspotenzial für die Wälder Europas auf. So stellt PFISTER (1999) für den Zeitraum 1500 bis 1995 fest, dass in der Schweiz 66 % aller schadbringenden Stürme zwischen Oktober und März auftraten. Nach einem von GARDINER et al. (2010) erstellten Katalog von Stürmen, die in Europas Wäldern im Zeitraum 1950-2010 die größten Schäden verursacht haben, traten 90 % der Stürme in den Monaten Oktober bis März auf. Allein im Jahr 1999 fielen infolge der drei Stürme „Anatol“ (4. Dezember), „Lothar“ (25./26. Dezember) und „Martin“ (27./28. Dezember) in mehreren Ländern Europas insgesamt 193 Millionen Kubikmeter Schadholz an (UNECE/FAO 2000). Im Jahr 2007 (17./18. Januar) führte der Sturm „Kyrill“ in den europäischen Wäldern zu insgesamt 45 Millionen Kubikmetern Schadholz. Deutschland war mit einem Schadholzaufkommen von 25 Millionen Kubikmetern am stärksten betroffen (ANONYMOUS 2007).

Neben großräumigen Winterstürmen können auch lokale Stürme im Sommer (KUNZ et al. 2009) ein hohes Gefährdungspotenzial für Wälder aufweisen. Heftige, kurz andauernde Stürme wie Tornados richten in Wäldern teilweise erhebliche Schäden an (BROSSMANN 1968). Angesichts ihrer geringen räumlichen Ausdehnung werden solche Sturmereignisse durch die vorhandenen Beobachtungssysteme aber nicht immer vollständig und eindeutig erfasst. BECK und DOTZEK (2010) verwenden deswegen Sturmschadensmuster in Wäldern zur Rekonstruktion bodennaher Strömungsfelder von Tornados.

Aufgrund der erheblichen, vielschichtigen Schadenswirkung von Winterstürmen besteht ein begründetes Interesse an der Entwicklung von Strategien zur Minimierung der durch sie verursachten Schäden in Wäldern. Die Anforderungen danach werden durch den derzeit ablaufenden Klimawandel erhöht. Er äußert sich nicht nur in sich ändernden Trends meteorologischer Variablen, sondern weist auch darin eingebettete extreme Wetterereignisse auf. Im Hinblick auf zukünftige Wintersturmereignisse könnte dies nach Untersuchungen von RAUTHE et al. (2010) bedeuten, dass sich das derzeit hohe Niveau der Sturmaktivität im Norden Deutschlands bis

zum Jahr 2050 weiter erhöhen und über Süddeutschland nicht signifikant ändern wird. Es muss daher aus meteorologischer Sicht davon ausgegangen werden, dass in Deutschlands Wäldern in den kommenden Jahrzehnten mindestens eine ähnlich hohe Schadholzmenge infolge von Winterstürmen wie in den vergangenen Jahrzehnten anfallen wird.

### 3 Faktoren, die das Auftreten von Sturmschäden in Wäldern beeinflussen

Die bodennahe Strömung ist ein wichtiger Bestandteil der physikalischen Umwelt von Bäumen. Wechselwirkungen zwischen Strömung und Bäumen sind vielfältig. Sie umfassen viele zeitliche und räumliche Skalen, denn die kinetische Energie des Windes wird auf alle oberirdischen Baumteile übertragen. Im Zusammenhang mit Andauer und Intensität der lokalen Windbelastung von Bäumen wird zwischen chronischer und akuter Windlast unterschieden. Als chronische Windlast bezeichnet man die langfristige Wirkung kontinuierlicher, nicht destruktiver Windeinwirkung auf Bäume, die neben physiologischen, morphologische und biomechanische Anpassungen an die standortspezifischen Strömungsverhältnisse hervorruft. Bedeutende morphologische Anpassungen von Bäumen an chronische Windlasten sind die Reduktion des Höhenwachstums, die Zunahme des Dickenwachstums am Stamm sowie Baumkronendeformationen (Abb. 10-2). Für das Baumwachstum relevante biomechanische Anpassungen sind die Modifikation von Holzeigenschaften wie des Elastizitäts- und des Bruchmoduls.

Als akute Windlasten bezeichnet man extreme Windeinwirkungen auf Bäume während Stürmen. Sie sind von kurzer Dauer, treten diskontinuierlich auf, können das maximale Widerstandsvermögen von Bäumen gegenüber der Windeinwirkung übersteigen und damit zu Schäden führen. Akute Windlasten sind Teil der abiotischen Störungsdynamik von Wäldern. Sie lassen sich während Stürmen durch eine hohe mittlere (stationäre) Komponente sowie durch Turbulenz verursachte dynamische Komponenten kennzeichnen.

Faktoren, für die der Einfluss auf das Auftreten von Sturmschäden in Wäldern in wissenschaftlichen Studien belegt wurde, können den fünf ineinandergreifenden Einflussfaktorengruppen Wetter-situation, Orografie, Baum/Waldeigenschaften, anthropogene Einflüsse und Boden zugeordnet werden (Abb. 10-3).

Die Grundvoraussetzung für die Entstehung von Sturmschäden in Wäldern ist das Auftreten atmosphärischer Bedingungen, die zur Entwicklung von Stürmen mit extrem ausgeprägtem bodennahem Strömungsfeld führen (MAYER und SCHINDLER 2002). Bei einer sehr hohen mittleren Windgeschwindigkeit kann allein die stationäre Windlast zu Sturm-



Abb. 10-2: Beispiel für Baumkronendeformationen infolge chronischer Windlasten: Buchen auf dem Schauinsland (Schwarzwald).

schäden führen. Da nach dem derzeitigen Kenntnisstand Bäume vor allem dynamisch auf turbulente Windlasten reagieren, ist während des Entstehungsprozesses von Sturmschäden nicht nur eine hohe mittlere Windgeschwindigkeit und die damit verbundene stationäre Windlast von Bedeutung. Lokal können die Eigenschaften des übergeordneten, großräumigen Windfeldes durch die Orografie sowie durch Baum- und Waldeigenschaften (Tab. 10-1) erheblich modifiziert werden, wodurch auch eine dynamische Turbulenz erzeugt wird. Veränderungen der Bestandes- und Bodenstruktur durch waldbauliche Behandlung, Straßenbau oder

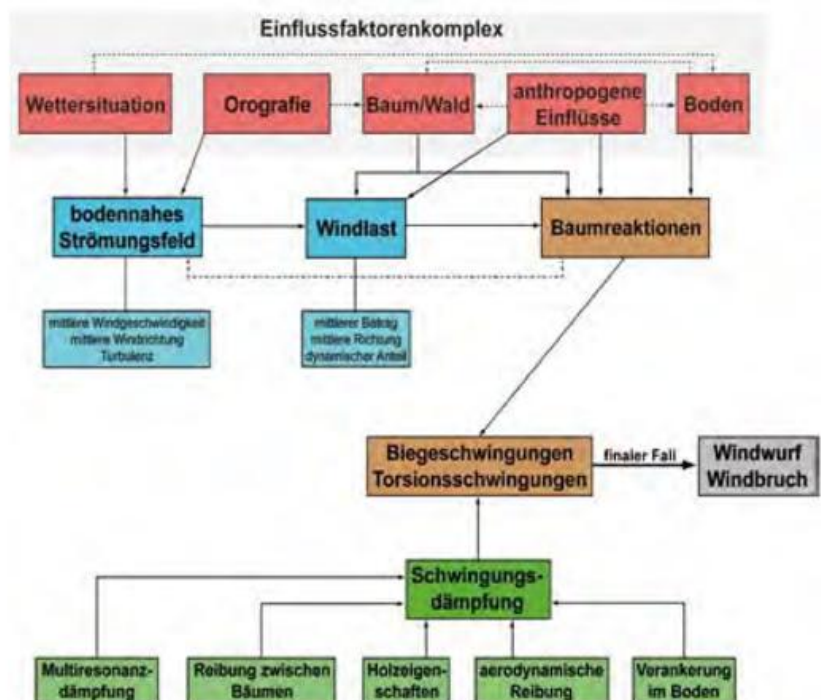


Abb. 10-3: Ineinandergreifende Faktorengruppen Wetter-situation, Orografie, Baum/Wald, anthropogene Einflüsse und Boden, die einen Einfluss auf die Entstehung von Sturmschäden in Wäldern haben.

Wettersituation	Orografie	Baum-/Waldeigenschaften	Anthropogene Einflüsse	Boden
bodennahes Strömungsfeld	topografische Exposition	Baumart	waldbauliche Behandlung	Bodentyp
	ergiebige Regenfälle	Geländehöhe	Baumarten-zusammensetzung	Straßen
Hangrichtung		Baum-/Bestandshöhe	Stromleitungs-trassen	Stauwasser
	Hangneigung	Brusthöhen-durchmesser		Boden-versauerung
		Bestandesrand-struktur		
		Entfernung zum windzugewandten Waldrand		
		Bestandesstruktur		
		Bestandesdichte		
		Bestandesalter		
		Bestandesvitalität		
		Bestandeslücken		
		Wurzelsystem-eigenschaften		
		Wurzelkrankheiten/-schäden		
		Holzeigenschaften		

Tab. 10-1: Faktoren, deren Einfluss auf die Entstehung und das Ausmaß von Sturmschäden in früheren Untersuchungen nachgewiesen wurde (dazugehörige Literaturliste ist bei den Autoren erhältlich).

Stromleitungstrassen führen ebenfalls zu Änderungen der lokalen Sturmgefährdung. Bodeneigenschaften beeinflussen die Verwurzelung und den Bodenwasserhaushalt und modifizieren damit die Verankerung von Bäumen, was sich letztlich auf das Baumreaktionsverhalten auswirkt.

Infolge turbulenter Windlasten werden bei Bäumen Reaktionen induziert, die vor allem durch Biege- und Torsionsschwingungen gekennzeichnet sind. Bei den meisten Nadelbaumarten wird das Reaktionsverhalten durch Biegeschwingungen dominiert (MAYER 1987, SCHINDLER et al. 2010). Können die Mechanismen, die bei Waldbäumen zur Schwingungsdämpfung beitragen (Multiresonanzdämpfung, Reibung zwischen Bäumen, Verankerung im Boden, ...), nicht mehr in ausreichendem Maße die auf einen Baum durch die Strömung übertragene Energie dissipieren, treten durch Sturm verursachte Schäden in Form von Windwurf (Abb. 10-4) oder Windbruch (Abb. 10-5) auf. Sie können sich auf einzelne Bäume beschränken oder größere bewaldete Flächen betreffen (Abb. 10-6).

Die Analyse der lokalen Sturmgefährdung sollte im Idealfall auf der Basis eines umfassenden Datensatzes zu allen möglichen Ausprägungen bodennaher Windfelder (in der Regel Böengeschwindigkeitsfelder) während einer Vielzahl vergangener Sturmereignisse sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeiten erfolgen (BEDACHT et al. 2008). Aus verschiedenen Gründen stehen derzeit für Deutschland keine flächendeckenden Datensätze zur Verfügung, die für Wälder sturmschadensrelevante, gemessene oder beobach-

tete Kenngrößen zu vergangenen Sturmer-eignissen enthalten (ALBRECHT et al. 2009).

Im Zusammenhang mit Gebäudeschäden hat es sich gezeigt, dass sich die Sturmgefährdung in orografisch wenig gegliedertem Gelände gut über die Böengeschwindigkeit untersuchen lässt, die von mesoskaligen numerischen Modellen simuliert wird (HENEKA et al. 2006). Im Hinblick auf die Quantifizierung der Sturmgefährdung von Wäldern ist die Verwendbarkeit der derzeit zur Verfügung stehenden simulierten Datensätze zur lokalen Böengeschwindigkeit jedoch sehr eingeschränkt. In zahlreichen Untersuchungen hat sich ihre räumliche Auflösung vor allem im orografisch stark gegliederten Gelände, in dem sich ein Großteil der europäischen Wälder befindet, als unzureichend herausgestellt. Da sturmschadensrelevante, bodennahe Strömungsfelder bisher nicht zur Verfügung stehen, werden in der forstlichen Sturmschadensforschung approximativ topografische Expositionsindizes zur Quantifizierung der Windbelastung von Bäumen während Stürmen verwendet (MITCHELL et al. 2008).

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass katastrophale Sturmschäden in Wäldern ab dem Überschreiten einer mittleren (10 Minuten-Mittelwert) bodennahen Windgeschwindigkeit von 30 m/s sehr wahrscheinlich sind. Allerdings fehlt es bisher an einer Spezifizierung der hier relevanten Messhöhe bzw. Simulationshöhe.

Zusätzlich zu den lokalen Strömungsbedingungen wird die Entstehung von Schäden durch einen hohen Wassergehalt des ungefrorenen Bodens vor oder während Wintersturmereignissen begünstigt, da dann die Wurzelverankerung erheblich reduziert ist (GARDINER et al. 2010). Ergiebige Niederschläge bei einer Luft- und Bo-



Abb. 10-4: Beispiel für Windwurf.



Abb. 10-5: Beispiel für Windbruch.



Abb. 10-6: Beispiel für flächige Sturmschäden in Wäldern.

dentemperatur oberhalb des Gefrierpunkts sind dafür die Voraussetzung.

Zur Bewertung des Sturmschadenrisikos muss neben der Sturmgefährdung mindestens auch die Vulnerabilität von Wäldern im Zusammenhang mit Winterstürmen quantifiziert werden. Dies sollte über die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Intensität eines Wintersturmes (zum Beispiel Ausprägung einer Kenngröße des

bodennahen Strömungsfeldes) und des erwarteten Schadensausmaßes (zum Beispiel nach früheren Sturmereignissen angefallene und exakt verortete Schadholzmenge) erfolgen. Eine hinreichend belastbare Quantifizierung der Vulnerabilität von Wäldern gegenüber Wintersturmesignissen ist bisher nicht möglich. Neben eingeschränkt geeigneten meteorologischen Datensätzen liegen forstliche Datensätze zu Schäden entweder nur für einzelne vergangene Sturmereignisse vor oder weisen ein Format auf, das für die Quantifizierung der Vulnerabilität ungeeignet ist.

## 4 Methoden zur Analyse des Auftretens von Sturmschäden

### 4.1 Überblick

Bestehende Ansätze zur Untersuchung des Auftretens von Sturmschäden in Wäldern unterscheiden zwischen endemischen und katastrophalen Sturmschäden (Abb. 10-7). Von endemischen Sturmschäden spricht man, wenn im Kontext des lokalen Windklimas häufig wiederkehrende Spitzenwerte von Strömungskenngrößen regelmäßig Schäden in Wäldern auf labilen Standorten oder kürzlich waldbaulich behandelten Beständen hervorrufen. So gelten zum Beispiel gegen die Hauptwindrichtung aufgerissene Bestandesränder (Abb. 10-8) oder sehr stark durchforstete Bestände als besonders anfällig für das Auftreten von endemischen Sturmschäden.

Katastrophale Sturmschäden entstehen in Mitteleuropa dagegen meistens als Folge des unregelmäßigen Auftretens von heftigen Winterstürmen wie „Lothar“ oder „Kyrill“. Dabei wird der Einfluss der verschiedenen Bestandes- und Standortfaktoren auf die Baum- und Bestandesstabilität durch Eigenschaften des extrem ausgeprägten bodennahen Strömungsfeldes überlagert, wobei sich die Intensität der

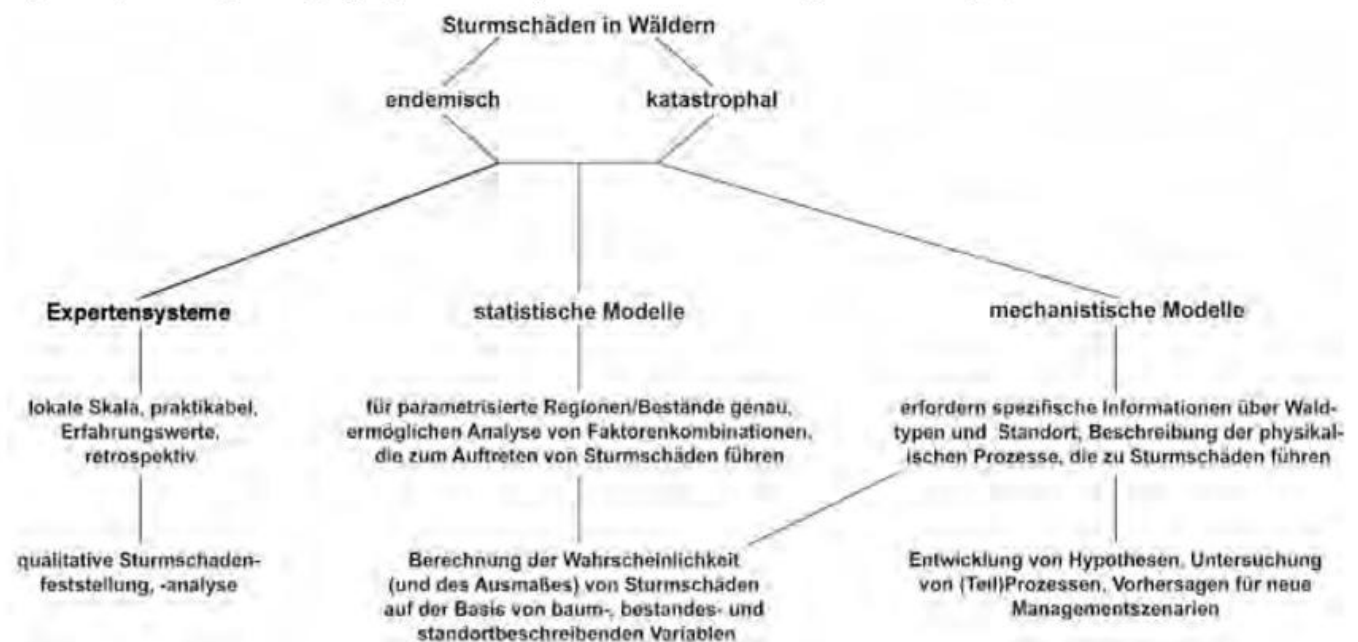


Abb. 10-7: Methodische Ansätze zur Analyse der Entstehung, des Auftretens und der Ausprägung von Sturmschäden in Wäldern (nach GARDINER et al. 2008).



Abb. 10-8: Rand eines Fichtenbestandes westlich von Augsburg, aufgerissen gegen die Hauptwindrichtung.

Überlagerung mit der räumlichen und zeitlichen Variabilität des bodennahen Strömungsfeldes ändert.

Unter den Methoden, die zur Analyse von Sturmschäden in Wäldern angewendet werden, unterscheiden GARDINER et al. (2008) zwischen Expertensystemen bzw. Beobachtungen, statistischen Modellen sowie mechanistischen Modellen. Expertensysteme sind oft die Basis für eine praktikable, qualitative Sturmschadensfeststellung und -analyse auf lokaler Skala, zum Beispiel durch den zuständigen Revierleiter. Sie sind aber nicht geeignet, die komplexen physikalischen Prozesse, die zur Entstehung von Sturmschäden in Wäldern führen, abzubilden beziehungsweise zu quantifizieren.

Statistische und mechanistische Modelle ermöglichen eine Quantifizierung der Sturmschadenswahrscheinlichkeit und ggf. des Ausmaßes von Sturmschäden auf der Basis von Bestandes- und Standortfaktoren in parametrisierten Beständen und Regionen. Im Vergleich zu statistischen Modellen bieten mechanistische Modelle zudem die Möglichkeit, die physikalischen Prozesse, die zum Auftreten von Sturmschäden führen, detailliert zu untersuchen. Dadurch erlauben es mechanistische Modelle, Hypothesen und Vorhersagen zu Waldmanagementszenarien zu entwickeln (GARDINER et al. 2008).

#### 4.2 Mechanistische Sturmschadensmodelle

Eine wichtige Voraussetzung, die für die Anwendbarkeit mechanistischer Sturmschadensmodelle gegeben sein muss, ist die Verfügbarkeit sturmschadensrelevanter baum-, bestandes- und standortbeschreibender Variablen auf sehr kleiner räumlicher Skala. Mechanistische Sturmschadensmodelle ermöglichen die Berechnung der sogenannten kritischen Windgeschwindigkeit (Abb. 10-9), das heißt der Windgeschwindigkeit in der mittleren Höhe eines Nadelwaldes, ab deren Überschreiten Sturmschäden an einem

Durchschnittsbaum nicht mehr verhindert werden können. Die Kennzeichnung des Durchschnittsbaums erfolgt über den mittleren Brusthöhendurchmesser (mittlerer Stammdurchmesser in 1,3 m Höhe über Grund) sowie die mittlere Höhe der Bäume im untersuchten Bestand.

Aus der mittleren Windgeschwindigkeit wird zunächst die stationäre Windlast auf den Durchschnittsbaum berechnet. Um dem Beitrag der Turbulenz zur Baumauslenkung Rechnung zu tragen, wird der Betrag der mittleren Windgeschwindigkeit linear um einen „Böenfaktor“ erhöht, der meist zwischen 1 und 4 schwankt. Ausgehend von der Strömung zugewandten Waldrändern wird die Bedeutung von Böen für die Windbelastung von Waldbäumen in Windkanaluntersuchungen oder mit Hilfe computergestützter Strömungsmodelle analysiert (RUCK et al. 2011). Auf Basis der aus der gesamten Windlast resultierenden statischen Baumauslenkung wird das statische Biegemoment am Stammfuß des Durchschnittsbaums  $M_{max}$  berechnet. Dieses wird dann mit dem maximalen Bruchbiegemoment  $M_{kr}$  (Indikator für Windbruch) sowie dem maximalen Verankerungsmoment der Wurzeln im Boden  $M_s$  (Indikator für Windwurf), die beide empirisch bestimmt werden müssen, verglichen.

Die Simulation der kritischen Windgeschwindigkeit beruht ganz wesentlich auf Erkenntnissen, die in den letzten Jahrzehnten durch eine sehr große Anzahl von Zugversuchen an einzelnen Nadelbäumen (zum geringen Teil auch an Laubbäumen) gewonnen wurden (Abb. 10-10). Dabei soll die horizontale Komponente  $F_1$  der Zugkraft  $F_{zug}$  entlang eines Zugseils die auf einen Baum einwirkende Windlast simulieren. Mit zunehmender Auslenkung des Probebaums aus der Vertikalen steigt infolge des Gewichts der Baumkrone der Beitrag der vertikalen Kraftkomponente  $F_2$  an  $M_{max}$ . Die auf den Probebaum wirkende Zugkraft wird bei einem Zugver-

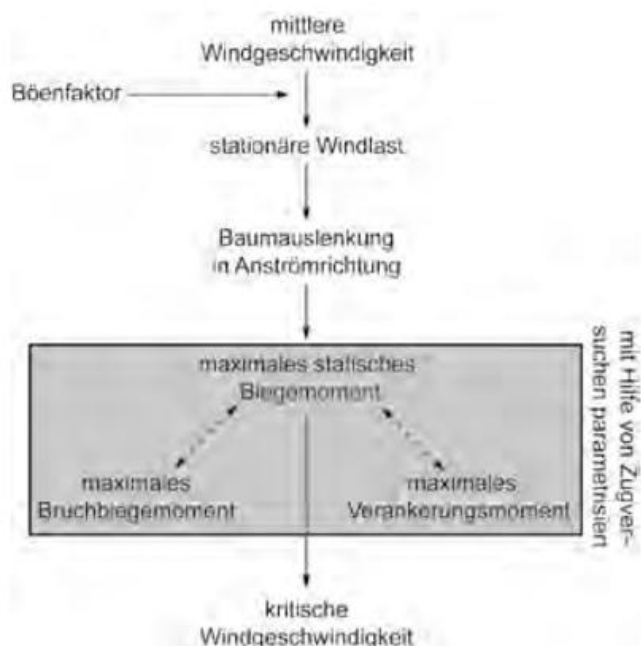


Abb. 10-9: Vereinfachte Darstellung des Berechnungsschemas der kritischen Windgeschwindigkeit durch mechanistische Sturmschadensmodelle.

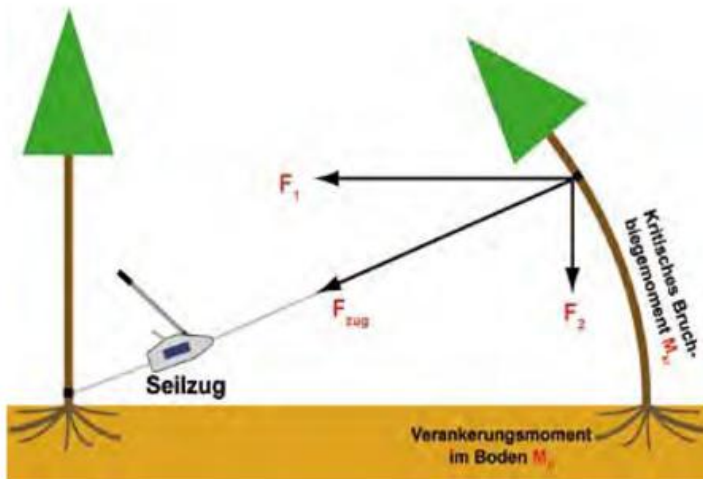


Abb. 10-10: Schematische Darstellung von Zugversuchen an Waldbäumen.

sich solange erhöht, bis der Probebaum entweder bricht oder umgezogen ist. Aus dem Vergleich von  $M_{\max}$ ,  $M_{kr}$  und  $M_S$  lässt sich ableiten, dass mit Baumwurf zu rechnen ist, wenn  $M_S < M_{\max} < M_{kr}$ . Baumbruch tritt ein, wenn  $M_{kr} < M_{\max} < M_S$ . Durch Zugversuche muss der Zusammenhang zwischen der auf einen Einzelbaum wirkenden Windlast, Holzigenschaften und Verankerung eines Baums im Boden für verschiedene Kombinationen von Standorten und Baumpositionen in Wäldern parametrisiert werden.

Aufgrund der komplexen lokalen Strömungsverhältnisse, insbesondere im heterogenen Gelände, lässt sich die Wirkung der Turbulenz auf Bäume in den derzeitigen Versionen der mechanistischen Sturmschadensmodelle durch die darin verwendeten Böenparametrisierung nur unzureichend simulieren. Gegenstand der Forschung ist außerdem die Quantifizierung der augenblicklichen, windinduzierten Änderung des Widerstandsbeiwerts von Kronenkronen sowie der damit verbundenen Variabilität der Kronenprojektionsfläche senkrecht zur Strömung. Da die Variabilität beider Größen während Stürmen bisher nicht in Freilandversuchen quantifiziert werden konnte, wird nach dem derzeitigen Kenntnisstand die auf einen Waldbaum wirkende dynamische Windlast auf der Basis von Parametrisierungen aus Windkanalexperimenten approximiert (MAYER und SCHINDLER 2002).

Die Tab. 10-2 enthält eine Zusammenstellung mechanistischer Sturmschadensmodelle, die in verschiedenen Ländern in Europa über Zugversuche parametrisiert wurden. Die Berechnung der kritischen

Windgeschwindigkeit erfolgt in den aufgeführten Modellen überwiegend durch das ursprünglich an finnische Verhältnisse angepasste Modell HWIND sowie durch das für schottische Verhältnisse entwickelte Modell GALES (GARDINER et al. 2008). Mechanistische Sturmschadensmodelle sind bisher ganz überwiegend nur für Nadelbaumarten parametrisiert worden. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass sich Wind-Baum-Interaktionen von Nadelbaumarten mit Hilfe der Balkentheorie untersuchen und beschreiben lassen. Dies ist bisher bei Laubbaumarten aufgrund ihrer komplexen oberirdischen Architektur sowie ihres komplizierten, bisher während Stürmen wenig erforschten dynamischen Reaktionsverhaltens noch nicht hinreichend möglich. Da der Laubbaumanteil in den Wäldern Europas kontinuierlich ansteigt, verstärkt sich auch das Interesse an einer Quantifizierung der Sturmstabilität von Laubbäumen. In den letzten Jahren wurde deshalb begonnen das windinduzierte Schwingungsverhalten von Laubbäumen experimentell zu untersuchen.

Zurzeit können die existierenden mechanistischen Sturmschadensmodelle nur auf einen Bruchteil von Deutschlands Wäldern angewendet werden. Ihre gegenwärtigen Parametrisierungen müssen noch um die in Deutschland vorkommenden Baumarten- bzw. Baumdimensionen-Standortkombinationen erweitert werden.

### 4.3 Statistische Sturmschadensmodelle

Da die für die Anwendung mechanistischer Sturmschadensmodelle benötigten Daten und Parametrisierungen oft nicht oder nur im geringem Umfang vorliegen, werden Sturmschäden in Wäldern bis heute meistens mit Hilfe statistischer Modellansätze retrospektiv untersucht. Dabei kommen unter anderem logistische Regressionsmodelle, multiple lineare Regressionsmodelle, neuronale Netze, Klassifikations- und Regressionsbäume, generalisierte additive Modelle sowie das Weights-of-Evidence-Verfahren zur Anwendung.

In den meisten Fällen beruht die Entwicklung statistischer Modelle zur Untersuchung der Auswirkungen von Natur-

Sturmschadensmodell	Modell für kritische Windgeschwindigkeit	Datenbasis	Baumarten	Anwendungsgebiet
FORGEM-W	HWIND	Messdaten	Douglasie	Niederlande
WINDA	HWIND	WASP <sup>a</sup>	Gemeine Fichte, Waldkiefer, Birke	Skandinavien
ForestGALES	GALES	DAMS <sup>b</sup>	viele der in Europa kommerzielle bedeutenden Nadelbaumarten	Großbritannien
STORMFALD	GALES	Messdaten	viele der in Europa kommerzielle bedeutenden Nadelbaumarten	Dänemark
ForêtVENT	GALES	Messdaten	Küstenkiefer	Frankreich
FOREOLE	FOREOLE	Messdaten	Gemeine Fichte	Frankreich

<sup>a</sup> WASP Wind Atlas Analysis and Application Program

<sup>b</sup> DAMS Detailed Aspect Method of Scoring

Tab. 10-2: Mechanistische Sturmschadensmodelle, die in europäischen Ländern für verschiedene Baumarten parametrisiert wurden (nach GARDINER et al. 2008).

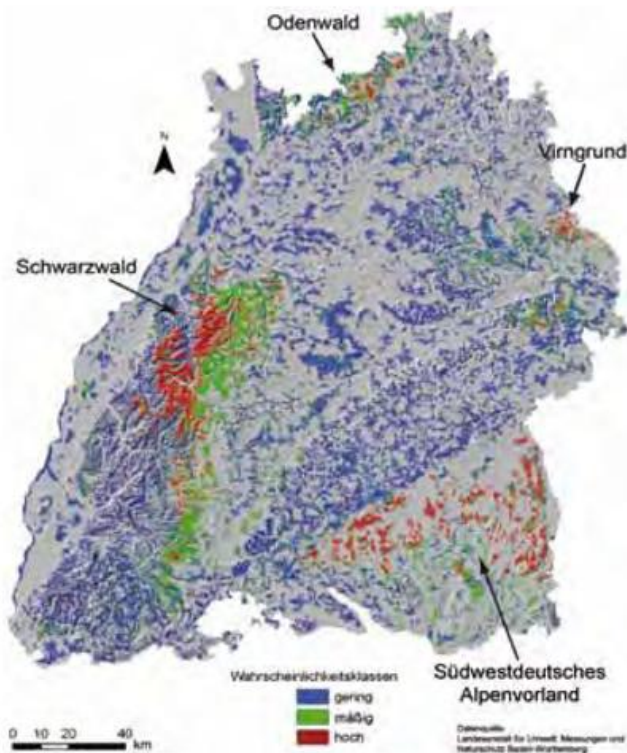


Abb. 10-11: Karte der klassifizierten Sturmschadenswahrscheinlichkeit (gering, mäßig, hoch) für die Wälder Baden-Württembergs.

gefahren auf Ökosysteme auf dem gleichen konzeptionellen Ansatz (GUZZETTI et al. 1999). Im Fall von Sturmschäden in Wäldern bedeutet dies (1) die Kartierung sturmgeschädigter Flächen, (2) die Kartierung von Umweltfaktoren, die direkt oder indirekt mit Sturmschäden verknüpft sind, (3) die Abschätzung des relativen Beitrags dieser Umweltfaktoren zur Entstehung von Sturmschäden und (4) die Klassifizierung der Sturmschäden anhand unterschiedlicher Sturmschadenswahrscheinlichkeitsstufen. Ein Beispiel für ein Produkt, das diesem Ansatz folgend erstellt wurde, ist die in Abb. 10-11 dargestellte klassifizierte (gering, mäßig, hoch) Sturmschadenswahrscheinlichkeit für die Wälder Baden-Württembergs (SCHINDLER et al. 2012a). Grundlage für diese Karte bilden Schäden infolge der Winterstürme „Wiebke“ (28. Februar 1990) und „Lothar“.

Statistische Sturmschadensmodelle eignen sich zur Analyse genereller Abhängigkeiten zwischen Sturmereignissen und Sturmschäden. Zur Untersuchung physikalischer Zusammenhänge während der Sturmschadensentstehung sind sie ungeeignet. So wurde bisher im Zusammenhang mit katastrophalen Sturmschäden in Wäldern noch kein statistisches Modell publiziert, bei dem die initiale Bedeutung eines Sturmereignisses adäquat berücksichtigt werden konnte. Dies ist in erster Linie auf die bereits angesprochene Datenlage zurückzuführen. Bei den Modellen, die strömungsfeldkennzeichnende Prädiktoren verwenden, ist meistens bereits die univariate Assoziation dieser Prädiktoren zu den Schäden im Vergleich zu anderen bestandes- und standortbeschreibenden Prädiktoren sehr gering. Die Vielzahl der Abhängigkeiten zwischen bestandes- und standortbeschreibenden Prädiktoren und Sturmschäden lässt wiederum eine Generalisierung vieler statistischer Modelle noch nicht zu. XI et al. (2008)

führen dies unter anderem auf die unterschiedlichen räumlichen Betrachtungsebenen bei der Analyse katastrophaler Sturmschäden zurück. Werden statistische Modelle auf der Bestandesebene parametrisiert, lassen sich vor allem Baumdimensionen und Baumarten mit entstandenen Schäden assoziieren bzw. korrelieren. Auf der Landschaftsebene scheinen Bodeneigenschaften sowie orografische Faktoren das Auftreten von Sturmschäden am besten zu erklären.

### 5 Schlussfolgerungen

Trotz beachtlicher Fortschritte im Verständnis von Teilprozessen bei der Sturmschadensentstehung in Wäldern ist es in den vergangenen Jahrzehnten nicht hinreichend gelungen, Anforderungen der Forstwirtschaft im Rahmen eines vorbeugenden Risikomanagements abiotischer Naturgefahren befriedigend zu begegnen. Noch dominieren statistische und beschreibende Modellierungsansätze die Analyse und Simulation der Wirkungen von Naturgefahren in Waldökosystemen (SEIDL et al. 2011). Eine verstärkte Hinwendung zur mechanistischen Modellierung ist aber dringend geboten, weil durch die Zunahme der Holzvorräte die europäischen Wälder zunehmend vulnerabler gegenüber meteorologischen Extremereignissen werden (GARDINER et al. 2010, HANEWINKEL et al. 2010).

Bezogen auf das Wintersturmgeschehen sind die gegenwärtigen Erkenntnisse zur zukünftigen Entwicklung der schadensauslösenden Wintersturmhäufigkeit und -intensität für die nordatlantisch-europäische Region zwar noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Werden die negativen Auswirkungen von Winterstürmen für die Forstwirtschaft der vergangenen Jahrzehnte zugrundegelegt, lässt sich für die forstliche Praxis sowie die risikosensitive Differenzierung forstlicher Bewirtschaftungsziele daher folgern, dass die Bedeutung von Winterstürmen für die forstliche Produktion weiterhin hoch bleiben wird (ALBRECHT et al. 2009). In Bezug auf katastrophale Wintersturmereignisse besteht vor dem Hintergrund des derzeitigen Stands der Wissenschaft nach SCHINDLER et al. (2012b) vor allem Forschungsbedarf in den Bereichen der

- schadensrelevanten räumlichen und zeitlichen Skalen von Kenngrößen des bodennahen Strömungsfeldes, vor allem im komplexen Gelände;
- Interaktionen zwischen bodennahem Strömungsfeld und Wäldern jeglicher Struktur auf lokaler und regionaler Skala;
- kleinräumigen Variabilität der Bodenwasserbilanz sowie damit zusammenhängender Wurzel-Boden-Interaktionen während Sturmereignissen;
- Auswirkungen des Klimawandels auf die regionale Sturmschadenswahrscheinlichkeit beziehungsweise das regionale Sturmschadensrisiko.

Als Folge des bisher unzureichenden Prozessverständnisses von ihren Auswirkungen auf Waldökosysteme bzw. ihres Zusammenwirkens in Waldökosystemen werden Naturgefahren in vielen forstlichen Managementstrategien bisher ausgeklam-

mert. Die Bedeutung von Naturgefahren für das nachhaltige Management von Waldökosystemen wird erst mit verbessertem, ganzheitlichem Prozessverständnis steigen. Zur besseren Abschätzung der Anpassungsfähigkeit von Wäldern an die Facetten des zukünftigen europäischen Klimas fordern SEIDL et al. (2011) die Abkehr von der zumeist reduktionistischen und die Hinwendung zu einer holistischen Betrachtungsweise und Modellierung von Naturgefahren.

## Literatur

- ALBRECHT, A., SCHINDLER, D., GREBHAN, K., KOHNLE, U., MAYER, H., 2008: Sturmaktivität über der nordatlantisch-europäischen Region vor dem Hintergrund des Klimawandels – eine Literaturübersicht. *Allg. Forst Jagdztg.* **180**, 109-118.
- ANONYMOUS, 2007: The storm "Kyrill" and its effect on European forests. *Forest Policy Econ.* **9**, 1134-1135.
- BECK, V., DOTZEK, N., 2010: Reconstruction of near-surface tornado wind fields from forest damage. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **49**, 1517-1537.
- BEDACHT, E., GRIMM, T., MIESEN, P., WEINDL, H., 2008: Stürme: Schadenrisiken und ihre Modellierung. *Promet* **34**, Nr. 1/2, 40-45.
- BROSSMANN, L., 1968: Der Tornado von Pforzheim. Schadensbild, Schadensumfang und Hilfsmaßnahmen. *AFZ-DerWald* **23**, 640-642.
- GARDINER, B., BYRNE, K., HALE, S., KAMIMURA, K., MITCHELL, S.J., PELTOLA, H., RUEL, J.-C., 2008: A review of mechanistic modeling of wind damage risk to forests. *Forestry* **81**, 447-463.
- GARDINER, B., BLENNOW, K., CARNUS, J.-M., FLEISCHER, P., INGEMARSON, F., LANDMANN, G., LINDNER, M., MARZANO, M., NICOLL, B., ORAZIO, C., PEY-RON, J.-L., REVIRON, M.-P., SCHELHAAS, M.-J., SCHUCK, A., SPIELMANN, M., USBECK, T., 2010: Destructive storms in European forests: Past and forthcoming impacts. Final report to European Commission - DG Environment, European Forest Institute.
- GUZZETTI, F., CARRARA, A., CARDINALI, M., REICHENBACH, P., 1999: Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* **31**, 181-216.
- HANEWINKEL, M., HUMMEL, S., ALBRECHT, A., 2010: Assessing natural hazards in forestry for risk management: a review. *Eur. J. Forest Res.* **130**, 329-351.
- HENEKA, P., HOFHERR, T., RUCK, B., KOTTMEIER, C., 2006: Winter storm risk of residential structures - model development and application to the German state of Baden-Württemberg. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **6**, 721-733.
- KUNZ, M., SANDER, L., KOTTMEIER, CH., 2009: Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany. *Int. J. Climatol.* **29**, 2283-2297.
- LINDNER, M., MAROSCHEK, M., NETHERER, S., KREMER, A., BARBATI, A., GARCIA-GONZALO, J., SEIDL, R., DELZON, S., CORONA, P., KOLSTRÖM, M., LEXER, M.J., MARCHETTI, M., 2010: Climate Change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manage.* **259**, 698-709.
- MAYER, H., 1987: Wind-induced tree sways. *Trees* **1**, 195-206.
- MAYER, H., SCHINDLER, D., 2002: Forstmeteorologische Grundlagen zur Auslösung von Sturmschäden im Wald im Zusammenhang mit dem Orkan „Lothar“. *Allg. Forst Jgdztg.* **173**, 200-208.
- MITCHELL, S.J., LANQUAYE-OPOKU, N., MODZLEWSKI, H., SHEN, Y., STULL, R., JACKSON, P., MURPHY, B., RUEL, J.C., 2008: Comparison of wind speeds obtained using numerical weather prediction models and topographic exposure indices for predicting windthrow in mountainous terrain. *For. Ecol. Manage.* **254**, 193-204.
- PFISTER, C., 1999: Winterstürme. In: *Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496-1995)*, 246-255.
- RAUTHE, M., KUNZ, M., KOTTMEIER, C., 2010: Changes in wind gust extremes over Central Europe derived from a small ensemble of high resolution regional climate models. *Meteorol. Z.* **19**, 299-312.
- RUCK, B., FRANK, C., TISCHMACHER, M., 2011: On the influence of windward edge structure and stand density on the flow characteristics at forest edges. *Eur. J. Forest Res.* **131**, 177-189.
- SCHELHAAS, M.-J., NABUURS, G.-J., SCHUCK, A., 2003: Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Glob. Change Biol.* **9**, 1620-1633.
- SCHINDLER, D., BAUHUS, J., MAYER, H., 2012b: Wind effects on trees. *Eur. J. Forest Res.* **131**, 159-163.
- SCHINDLER, D., VOGT, R., FUGMANN, H., RODRIGUEZ, M., SCHÖNBORN, J., MAYER, H., 2010: Vibration behavior of plantation-grown Scots pine trees in response to wind excitation. *Agric. For. Meteorol.* **150**, 984-993.
- SCHINDLER, D., GREBHAN, K., ALBRECHT, A., SCHÖNBORN, J., KOHNLE, U., 2012a: GIS-based estimation of the winter storm damage probability in forests: a case study from Baden-Wuerttemberg (Southwest Germany). *Int. J. Biometeorol.* **56**, 57-69.
- SEIDL, R., FERNANDES, P.M., FONSECA, T.F., GILLET, F., JÖNSSON, A.M., MERGANIČOVÁ, K., NETHERER, S., ARPACI, A., BONTEMPS, J.-D., BUGMANN, H., GONZÁLEZ-OLABARRIA, J.R., LASCH, L., MEREDIEU, C., MOREIRA, F., SCHELHAAS, M.-J., MOHREN, F., 2011: Modelling natural disturbances in forest ecosystems: a review. *Ecol. Model.* **222**, 903-924.
- UNECE/FAO, 2000: Effects of the December 1999 storms on European timber markets. Forest products and market review. Economic Commission for Europe, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 23-37.
- XI, W., PEET, R.K., DECOSTER, J.K., URBAN, D.L., 2008: Tree damage risk factors associated with large, infrequent wind disturbances of Carolina forests. *Forestry* **81**, 317-334.

A. NOTHDURFT, D. CULLMANN, H.-G. MICHIELS, H. PUHLMANN, C. YUE,  
U. KOHNLE, G. KÄNDLER, K. VON WILPERT

# 11 Forstliche Forschung zur Entwicklung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel

Forest management for mitigating the effects of a changing climate

## Zusammenfassung

Wegen der hohen Bevorratung baden-württembergischer Wälder ist deren Potenzial zur Speicherung von atmosphärischem CO<sub>2</sub> nahezu erschöpft. Deswegen gewinnt die nachhaltige Forstwirtschaft zur Minderung der Effekte des Klimawandels eine große Bedeutung. Nur durch eine nachhaltige Nutzung der Wälder in Verbindung mit einer anschließenden Verwertung des Rohholzes in Form langlebiger Produkte sowie durch die Substitution fossiler Brennstoffe und konventioneller Bauträger kann zur Verminderung der Auswirkungen des Klimawandels beigetragen werden. Vor diesem Hintergrund und aufgrund der langen Produktionszeiträume in der Forstwirtschaft muss schon heute mit der Entwicklung geeigneter Strategien zur Anpassung an den wahrscheinlich nicht mehr aufzuhaltenden Klimawandel Rechnung getragen werden. Das Klima stellt einen wesentlichen Faktor des forstlichen Standortbegriffs dar. Eine besondere Schlüsselmaßnahme zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel ist die Auswahl klimatisch geeigneter Baumarten an den forstlichen Standorten, um die Widerstandskraft der Waldbestände zu erhöhen. Diese und andere Maßnahmen setzen eine umfassende Forschung zur Aufklärung der komplexen Ursache-Wirkung-Beziehungen voraus. Basierend auf den gegenwärtigen Forschungsergebnissen muss der Anbau der Fichte, als gegenwärtig bedeutendste Baumart, künftig in warmen und trockenen Tieflagen unterbleiben. Zur Diversifizierung und Begrenzung des Risikos sollen daher Mischwälder aus Eichen, Buchen, Tannen und Douglasien bevorzugt angebaut werden und diese in kürzeren Produktionszeiträumen bewirtschaftet werden.

## Summary

Because of high stocking timber volumes in Baden-Württemberg's forests the potential to store additional atmospheric CO<sub>2</sub> is nearly exhausted. To mitigate the effects of a changing climate a sustainable forest management has to be applied in connection with subsequent timber utilization in the form of long-lived products and together with substituting fossil fuels and conventional building materials. Against this background and due to the long production periods in forestry, appropriate management strategies for adapting to climate change are now required. Climate is an essential factor in the concept of forest site classification, and the key to adapt forests on a specific site to a changing climate is to choose climatically suitable tree species for regeneration. Developing such management strategies requires extensive research to model often complex cause-and-effect relationships. Based on findings from current research, the cultivation of Norway spruce, which is the most relevant tree species in Baden-Württemberg, is no longer possible in warm and dry lowlands. To limit the risk of forest production the rotation times are shortened. Furthermore, forest stands are now established having a mixed-species composition consisting of oak, common beech, silver fir and Douglas-fir.

## 1 Einleitung

Simulationsläufe globaler Zirkulationsmodelle und regionaler Klimamodelle prognostizieren, den Emissionsszenarien des IPCC-Sonderberichts (NAKICENOVIC et al. 2000) folgend, bei erhöhten atmosphärischen Konzentrationen von Treibhausgasen einen Anstieg der mittleren jährlichen

Lufttemperatur und bei insgesamt gleichbleibenden Jahresniederschlagsmengen eine Zunahme der Niederschläge in den Winterhalbjahren. Ein Ausmaß des Anstiegs der mittleren jährlichen Lufttemperatur, ähnlich wie es für die nächsten 100 Jahre prognostiziert wird, konnte in der Vergangenheit noch nicht beobachtet werden. Deshalb wird vermutet, dass die künftigen Klimaveränderungen das natürliche

Anpassungspotenzial der Wälder überschreiten könnten (IVERSON und PRASAD 1998, 2000).

Im Folgenden wird die besondere Betroffenheit des Waldes und der Forstwirtschaft im Kontext des Klimawandels erläutert, und es werden Schwerpunktaufgaben der Klimafolgenforschung identifiziert. Es wird dargelegt, wie die Klimafolgenforschung Unterstützung für die Forstwirtschaft bei der Entwicklung strategischer Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel leisten kann. Außerdem werden die Resultate exemplarischer Lösungsansätze gezeigt.

## 2 Milderung und Anpassung

Der Nettoeffekt des Waldes auf das Klima ist noch nicht abschließend geklärt. Jedoch kann eine Entwaldung in den gemäßigten Breiten und insbesondere in der kaltgemäßigten Zone zu einer Abkühlung führen, weil der damit verbundene Anstieg der Ausstrahlung die Erwärmung durch die CO<sub>2</sub>-Freisetzung voraussichtlich überkompensieren könnte. Eine Entwaldung in tropischen Regionen wirkt sich höchstwahrscheinlich entgegengesetzt aus, weil dort die kühlenden Evapotranspirationseffekte fehlen würden, die einen dominierenden Einfluss auf die mittleren Lufttemperaturen haben (BONAN 2008). Bei den existierenden Klimaprojektionen, basierend auf den Emissionsszenarien des IPCC-Sonderberichts, wurden bisher keine Landnutzungsänderungen unterstellt. Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass eine weitere Entwaldung tropischer Regenwälder in diesen Regionen zu einer stärkeren Erwärmung führen könnte als sie durch die gängigen Zirkulationsmodelle bisher aufgezeigt wurde. Gleichzeitig könnte es in den gemäßigten Breiten zu einer Abkühlung kommen (FEDDEMA et al. 2005). Im Streben nach verbesserten Wirkungsmodell-Prognosen werden deshalb von den Forstwissenschaftlern aktuelle Klimaprojektionen für die neuen RCP-Szenarien (MOSS et al. 2008, 2010) unter Berücksichtigung möglicher Landnutzungsänderungen erwartet.

Unter den terrestrischen Ökosystemen stellen die Wälder den bedeutendsten Kohlenstoffspeicher dar und spielen daher im globalen Kohlenstoffkreislauf eine wichtige Rolle. Insbesondere die Wälder der Nordhemisphäre bilden bislang eine Kohlenstoffsenke, während global betrachtet die Entwaldung in den Tropen (vor allem in Südamerika und Afrika) zu einer C-Freisetzung in die Atmosphäre führt, was insgesamt weltweit eine negative C-Bilanz erbringt. Neuesten Schätzungen zufolge (FAO 2010) belaufen sich die globalen C-Vorräte in Wäldern auf insgesamt 652 Gt<sup>1</sup>; auf Europa (ohne Russland) entfällt ein vergleichsweise kleiner Anteil von insgesamt lediglich 25 Gt<sup>2</sup>. Für die 15 Länder der EU (vor der Osterweiterung) sowie die Schweiz und Norwegen zeigt eine Analyse der nationalen Waldinventuren für den Zeitraum 1950 bis 2000 einen erheblichen Anstieg der Vorräte um durchschnittlich 75 % (CIAIS et al. 2008). Der von den Bäumen gespeicherte Kohlenstoffvorrat entspricht etwa 10 % der im Zeitraum 1950 bis 2007 in den 15 EU-Ländern aufgelaufenen C-Emissionen aus fossilen

Energieträgern (CIAIS et al. 2008). Insofern leisten im Zusammenhang mit dem CO<sub>2</sub>-induzierten Treibhauseffekt zumindest in Europa (und in anderen Regionen der Nordhalbkugel) die Wälder durchaus einen Beitrag, die Atmosphäre von CO<sub>2</sub> zu entlasten. Die Minderung von fossilem CO<sub>2</sub> erfolgt allerdings nicht nur durch den Aufbau von Biomasse im Wald und deren Speicherung im lebenden Holzvorrat, im Totholz, in der Streu und im Boden, sondern auch durch eine nachhaltige, unter Erhaltung der Waldsubstanz betriebene Holznutzung. Die Holzernte verlangsamt zwar den Anstieg des Holzvorrats im Wald und begrenzt ihn auf eine Größenordnung, die wahrscheinlich unter dem Wert liegt, der ohne Nutzung erreicht würde. Der Entzug des im Holz gespeicherten Kohlenstoffs mit der Holzernte ist jedoch nicht zwangsläufig mit einer Freisetzung von Kohlenstoff in die Atmosphäre gleichzusetzen. Dies träfe nur dann zu, wenn das Holz unmittelbar nach der Nutzung verbrannt würde. Aber auch in diesem Fall der Nutzung als Energieträger tritt ein Substitutionseffekt ein, sofern Holz fossile Energieträger ersetzt. Allerdings wird in Europa Holz zu einem nennenswerten Anteil als Rohstoff für langlebige Produkte verwendet, wodurch ebenfalls ein Speichereffekt erzielt wird. Zugleich tritt ein weiterer Substitutionseffekt ein, wenn Holzprodukte Konkurrenzprodukte ersetzen, deren Herstellung eine größere Menge fossiler Energieträger erfordert, zum Beispiel wenn Holz anstelle von Beton oder Stahl verwendet wird.

Der Wald und die Forstwirtschaft können daher aktiv zu einer Milderung der Klimaveränderungen beitragen. Dabei spielt die Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Vermeidung von Abholzungen bzw. durch Wiederaufforstungen des tropischen Regenwaldes eine Schlüsselrolle (CANADELL und RAUPACH 2008). Im Gegensatz dazu sind in den gemäßigten Breiten und speziell in Baden-Württemberg die Möglichkeiten, durch Aufforstungen und der damit verbundenen Bindung zusätzlichen Kohlenstoffs zu einer Milderung des Klimawandels beizutragen, eher als gering einzuschätzen; zum einen stehen aufgrund des starken Wettbewerbs zwischen den konkurrierenden Landnutzungsformen nur wenige Landflächen für Aufforstungen zur Verfügung, zum anderen ist die Akquise der knappen Landfläche nur zu vergleichsweise hohen Preisen möglich.

Eine weitere aktive Möglichkeit zur Milderung des Klimawandels durch den Wald besteht in der Erhöhung der gebundenen Kohlenstoffmenge auf der momentan bereits bestehenden Waldfläche. Höhere Holzvorräte pro Flächeneinheit können durch eine höhere Dichte der Bäume und durch höhere Baumhöhen erzielt werden, davon würden letztere mit längeren Produktionszeiträumen einhergehen. Jedoch ist der Holzvorrat in den Wäldern Baden-Württembergs in den letzten Jahrzehnten schon kontinuierlich angestiegen; allein zwischen den beiden Bundeswaldinventuren in den Jahren 1987 und 2002 ist der durchschnittliche Holzvorrat pro ha in Baden-Württemberg von 352 Vorratsfestmeter auf 367 Vorratsfestmeter angestiegen. Mit größeren Dichten und höheren Baumhöhen steigt das Risiko von Sturmschäden noch weiter an (SCHMIDT et al. 2010), und mit längeren Produktionszeiten erhöht sich die Gefahr einer Entwertung durch Pathogene

<sup>1</sup> davon 289 Gt in der lebenden Biomasse, 72 Gt im Totholz und Streu sowie 291 Gt im Boden

<sup>2</sup> davon 12,5 Gt in der Biomasse, 3,6 Gt im Totholz und Streu sowie 18,9 Gt im Boden

oder Schadinsekten. Aus diesen Gründen wird ein weiterer Holzvorratsaufbau mit einer zusätzlichen Nettobindung von CO<sub>2</sub> in den Wäldern Baden-Württembergs aus physiologischen und betriebswirtschaftlichen Gründen zumindest mittelfristig nicht praktikierbar sein. Demzufolge kann nur noch die nachhaltige Ernte von Holz aktiv zur Milderung des Klimawandels beitragen; indem das CO<sub>2</sub> in langlebigen Holzprodukten fixiert wird und fossile Energieträger durch Holzbrennstoffe substituiert werden. Es wird deutlich, dass die forst- und holzwirtschaftlichen Maßnahmen zur Milderung des Klimawandels in den gemäßigten Breiten, und speziell in Baden-Württemberg, sehr beschränkt sind, und dass vielmehr der Entwicklung von Anpassungsstrategien eine größere Bedeutung eingeräumt werden muss.

Die nicht mehr forstlich bewirtschafteten Bannwälder Baden-Württembergs, auf die aktuell nur 0,6 % der gesamten Waldfläche entfallen, werden im Prozess einer natürlichen Anpassung auf sich alleine gestellt sein. Dort werden zum einen die Evolutionsfaktoren (Mutation, Selektion, Gendrift, Rekombination) und zum anderen physiologische Mechanismen zur individuellen Akklimatisierung zum Tragen kommen. Bei der Einschätzung der Bedeutung von individueller Akklimatisierung herrscht noch große Unklarheit. Noch ist zu wenig bekannt über den Düngeeffekt einer ansteigenden atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration und es gibt Hinweise darauf, dass die Waldbäume effizienter mit dem vielleicht künftig in geringerem Ausmaß zur Verfügung stehenden Wasser umgehen werden (TOLLEY und STREIN 1984, ABER et al. 1995).

Im Gegensatz zu den Bannwäldern können in den bewirtschafteten Wäldern aktive Anpassungen an den Klimawandel durch menschliche Einwirkungen vorgenommen werden. Vor allem durch die Festlegung geeigneter Produktionszeiträume und durch die Planung stabilisierender Durchforstungsmaßnahmen lassen sich biotische und abiotische Risiken als Auswirkungen des Klimawandels verringern. Es wird davon ausgegangen, dass es bei der Anwendung bestimmter Anpassungsmaßnahmen keinen Königsweg gibt. Eine gute Strategie wird es sein, situationsgebunden Kombinationen verschiedener Maßnahmen ergreifen zu können (MILLAR et al. 2007), um die Widerstandskraft der Wälder insgesamt zu erhöhen. Anfällige und gleichförmige Waldlandschaften sollten vermieden und künftig umgebaut werden zu vielfältigeren Wäldern, in denen die Auswirkungen von extremen Einwirkungen besser abgedämpft werden können. So kann im Einzelfall das Fördern oder Einbringen von Mischbaumarten dazu beitragen, die Gefahr von Insekteneinfällen zu verringern.

Wie weiter unten ausführlich beschrieben wird, stellt die Auswahl bestimmter Baumarten bei der Verjüngung von hiebsreifen Waldbeständen eine wichtige Strategiemassnahme zur Anpassung an den Klimawandel dar. Da die Richtung und das Ausmaß der möglichen regionalen und lokalen Auswirkungen des Klimawandels unbekannt sind, werden in der forstwissenschaftlichen Klimafolgenforschung Wirkungsmodelle erstellt, die zunächst für retrospektive Klimadaten angepasst werden und mit denen dann

Vorhersagen auf Basis von existierenden Klimaprojektionen vorgenommen werden können.

### 3 Wirkungsmodellierung auf der Basis von retrospektiven Klimadaten und mittels Szenarien von Klimaprojektionen

Der Begriff des forstlichen Standorts umfasst die Gesamtheit der in einem Waldökosystem wirksamen Umweltbedingungen, also die physikalischen und/oder chemischen Zustände der stofflichen Medien und der Energieformen, denen die Waldorganismen ausgesetzt sind, unter Berücksichtigung der kleinräumigen Variation und des zeitlichen Verlaufs. Pflanzenökologisch besitzen neben dem Strahlungsgenuss die Eigenschaften der Fest-, Flüssig- und Gasphase des Bodens und die der Luft herausragende Bedeutung. Unter diesen Eigenschaften sind die Lufttemperatur und der Wassergehalt des Bodens, die chemische Zusammensetzung der Bodenlösung sowie die Lufttemperatur und der relative Wassergehalt der Luft im Allgemeinen die wichtigsten, das Pflanzenwachstum bestimmenden Umweltfaktoren. Weil alle diese Umweltzustände zusammen nur punktuell und mit hohem Aufwand gemessen werden können, erfolgt die Einschätzung der Standortseigenschaften von Waldökosystemen in aller Regel abgeleitet aus Proxygrößen. Dazu zählen die geographische und topographische Lage, das Ausgangssubstrat der Bodenbildung, leicht zu bestimmende Bodenmerkmale wie Körnung und Lagerungsdichte sowie insbesondere auch Klimawerte für den Niederschlag und die Lufttemperatur. Diese Standortgrößen werden in einem forstlichen Wirkungsmodell als unabhängige Variablen verwendet. Die Lufttemperatur und der Niederschlag finden besondere Beachtung, weil sich diese Variablen im Klimawandel räumlich und zeitlich verändern werden.

Zur Erklärung einer bestimmten forstlichen Messgröße, wie zum Beispiel das Vorkommen einer bestimmten Baumart an einem Ort oder die Höhe eines Baumes bei einem gegebenen Alter, wird ein Wirkungsmodell in Abhängigkeit von retrospektiven Klimadaten angepasst. Weil die meisten Standortgrößen kleinräumig sehr stark variieren und dabei noch voneinander abhängig sind, so zum Beispiel die Wasserversorgung, die Bodeneigenschaften, die Topographie und die Niederschlagsmenge, werden zeitlich und räumlich möglichst hoch aufgelöste Klimadaten für die Modellierung benötigt. Wegen der kleinräumigen topographischen Unterschiede in der Region Baden-Württembergs sollten retrospektive Klimadaten im Rasterdatenformat eine horizontale Auflösung von unter einem Kilometer aufweisen, um eine genaue Modellierung der komplexen Ursache-Wirkungs-Beziehungen von forstlichen Fragestellungen zu ermöglichen. Meistens lassen sich mit Hilfe der beiden wichtigsten Klimagrößen, der Lufttemperatur und dem Niederschlag, plausible statistische Regressionsmodelle erstellen. Für die Modellierung ökophysiologischer Prozesse müssen jedoch weitere meteorologische Parameter betrachtet werden, wie die Dauer und Intensität der Sonneneinstrahlung und das Wassersättigungsdefizit der Luft.

Die Niederschlagssumme ist innerhalb der Waldbestände häufig niedriger als im Freiland. Dieses liegt an der Interzeption. Dabei wird der Niederschlag schon von den Blättern und Nadeln der Waldbäume abgefangen und verdunstet von dort, ohne auf den Waldboden zu gelangen und ohne für die Bäume verfügbar zu sein. Der sogenannte Bestandesniederschlag wird zwar an einzelnen Waldmessstationen erhoben, räumlich flächendeckende Informationen über den Bestandesniederschlag bedürfen aber komplexer Modellannahmen und stehen deshalb nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund wird häufig nur der Freilandniederschlag als Näherungsgröße in forstlichen Klimawirkungsmodellen verwendet.

#### 4 Modellierung der regionalklimatischen Angepasstheit verschiedener Baumarten

Baden-Württembergs Wälder sollen den walddtypischen pflanzlichen und tierischen Organismen als Lebensraum dienen, den Boden- und Trinkwasserschutz gewährleisten, Erholung und Tourismus ermöglichen und gleichzeitig wertvolles Holz produzieren. Daher muss abgeschätzt werden, welche Baumarten bei veränderten Klimabedingungen stabile und regenerationskräftige Waldbestände hervorbringen können, um die oben genannten Funktionen auch künftig bestmöglich zu erfüllen. Zu diesem Zweck wird versucht, die funktionalen Zusammenhänge zwischen dem Auftreten bestimmter Baumarten und den wichtigsten Klimagrößen aufzuklären. Die Szenarien für das zukünftige Klima in Deutschland zeigen vor allem deutliche Anstiege der mittleren jährlichen Lufttemperatur in Bodennähe. Wegen der notwendigen Extrapolationen bei der Prognose für Klimaszenarien in Deutschland werden die Modelle der regionalklimatischen Angepasstheit von bestimmten Baumarten daher mit europaweit vorliegenden Daten aus dem Waldzustandsmonitoring angepasst.

Das Auftreten einer bestimmten Baumart wird aus dem Datensatz „Data on Crown Condition of the systematic grid (16 x 16 km)“ (Level I) aus dem „International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests“ (ICPF) abgeleitet. ICPF wurde durch die „Convention on Longrange Transboundary Air Pollution under the United Nations Economic Commission for Europe“ eingerichtet; die Messungen liegen für die Periode zwischen den Jahren 1987 und 2007 vor. Grundlage der klimatischen Prädiktoren ist der WorldClim-Datensatz von HIJMANS et al. (2005). Die Verschneidung von Klimadaten mit den Artverbreitungsdaten ergibt einen europäischen Datensatz mit 8366 geographischen Orten, an denen das Auftreten der Baumart und die Ausprägungen der bioklimatischen Variablen bekannt sind.

Die binären Auftretensereignisse einer bestimmten Baumart werden als logarithmische Wett-Prozente mit Hilfe generalisierter linearer Modelle in Abhängigkeit von erklärenden Größen modelliert. Dabei erzeugen Polynome zweiter Ordnung biologisch plausible Kurven für die Modellierung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen dem Auftre-

ten einer Baumart und den bioklimatischen Effekten. Um aus der großen Zahl potentieller Prädiktoren eine qualifizierte, ökologisch interpretierbare Auswahl zu treffen wird ein initialer Modellierungsgang vorgeschaltet: Zunächst werden einleitend univariate Modelle für alle bioklimatischen Prädiktoren an die Präsenz-Absenz-Information der wirtschaftlich dominanten Arten *Picea abies* und *Fagus sylvatica* angepasst. Aus dem Vergleich dieser Modelle wurde die jährliche Wärmesumme über fünf Grad Celsius (WS5) ausgewählt, da dieser Prädiktor sich ökologisch sehr gut interpretieren lässt und sein univariates Modell die zweitbeste Summe der adjustierten Devianzen der Modelle für die beiden betrachteten Arten aufweist. Auf diesen Initialmodellen aufbauend konnten durch Anwendung numerischer Selektionsverfahren die wichtigsten fünf erklärenden Regressoren identifiziert werden, WS5, die Isothermalität (das Verhältnis aus dem Mittel der Differenzen aus monatlicher Maximal- und Minimaltemperatur und der Differenz aus der Maximaltemperatur des wärmsten Monats und der Minimaltemperatur des kältesten Monats), der Trockenheitsindex nach O'Neill, die Niederschlagssumme im wärmsten Quartal und der Niederschlag des feuchtesten Monats. Die Prognosegüte der Modelle wurde in umfangreichen Kreuzvalidierungen überprüft.

Die Frage, wann eine prognostizierte Auftretenswahrscheinlichkeit für eine Baumart so hoch ist, dass sie als gesichertes Vorkommen der Art gewertet wird, hängt vom Modelltyp und der Prävalenz der Art im Kalibrierungsdatsatz ab (vergleiche FIELDUNG und BELL 1997). Im vorliegenden Fall wird das Prognoseintervall basierend auf Trennwertanalysen in vier artspezifische Klassen der regionalklimatischen Angepasstheit eingeteilt. Dabei ergeben sich die Trennwerte TW1 bis TW3 aus einer Trennwertanalyse mit TW1 als dem Minimum der Trennwerte, für die die Falsch-Positiv-Rate der Konfusionsmatrix kleiner 0,01 ist, TW2 als der Trennwert, der Cohens Kappa der Konfusionsmatrix maximiert und TW3 als dem Maximum der Trennwerte, für die die Falsch-Negativ-Rate der Konfusionsmatrix kleiner 0,01 ist. Die klassifizierten Ergebnisse werden auf das Gauß-Krüger-Koordinatensystem projiziert und auf 50 x 50 Meter interpoliert.

Auf der Basis der Ergebnisse dieser Modelle wurden die vier zunächst statistisch definierten Klassen für die Auftretenswahrscheinlichkeiten einer Baumart mittels flächenhafter Darstellungen standorts- und vegetationsökologisch interpretiert. Im Ergebnis lassen sich die Klassen als Teilräume regionalklimatischer Angepasstheit der Baumarten ausweisen. Diese Teilräume reichen vom ökologischen Optimum über das ökologische Suboptimum und die innere Arealrandzone bis zur Äußeren Arealrandzone.

Im ökologischen Optimum erreicht eine Baumart ihr artspezifisches Höchstalter, besiedelt ein sehr breites Spektrum an Standorten, weist eine sehr hohe Konkurrenzstärke aus, ist regelmäßig Teil der natürlichen Waldgesellschaft und ist nur einem geringen Risiko des Befalls durch Schädlinge (vor allem Insekten, Pilze) ausgesetzt. Im ökologischen Suboptimum weist eine Baumart nur noch verminderte Höchstalter auf, sie regeneriert sich aber kontinuierlich. Außerdem

ist im ökologischen Suboptimum das Spektrum geeigneter Standorte eingeschränkt, die Art weist eine geminderte Konkurrenzstärke auf und muss gegebenenfalls waldbaulich gestützt werden. Zudem weist sie eine erhöhte Disposition für abiotische Schäden (zum Beispiel Wipfeldürre), episodisch bestandsbedrohende Pathogene und vitalitätswirksame Parasitierung auf.

In ihren inneren Arealrandzonen treten die Baumarten nur auf Standorten auf, die ihren Ansprüchen in besonderem Maße entsprechen, und sie benötigen aufgrund ihrer stark verringerten Konkurrenzkraft eine regelmäßige waldbauliche Förderung. Ihre Lebensdauer ist stark verkürzt, sie regenerieren sich nur episodisch und haben ein erhöhtes phytosanitäres Risiko; das heißt Pathogene, Parasiten und abiotische Schäden treten häufig auf.

In der Äußeren Arealrandzone erreichen die Baumarten nur ein sehr geringes Alter, eine spontane Besiedlung findet dort nicht mehr statt, die Konkurrenzstärke der Baumarten ist sehr gering, die Baumarten lassen sich hier allenfalls zeitlich begrenzt als Pflanzungen erhalten und weisen höchste Anfälligkeit für den Befall durch Schädlinge auf.

Die Auswertung und Interpretation dieser Modelle für Baden-Württemberg zeigt ausgeprägte artspezifische Besonderheiten. So fällt die Fichte zum Beispiel bereits unter den heutigen Klimabedingungen in den warm-trockenen Bereichen Baden-Württembergs (Oberrheinische Tiefebene, Teile des Neckarlandes) in die äußere Arealrandzone, während das regionalklimatische Optimum auf die höheren Lagen des Schwarzwaldes, des südwestdeutschen Alpenvorlandes

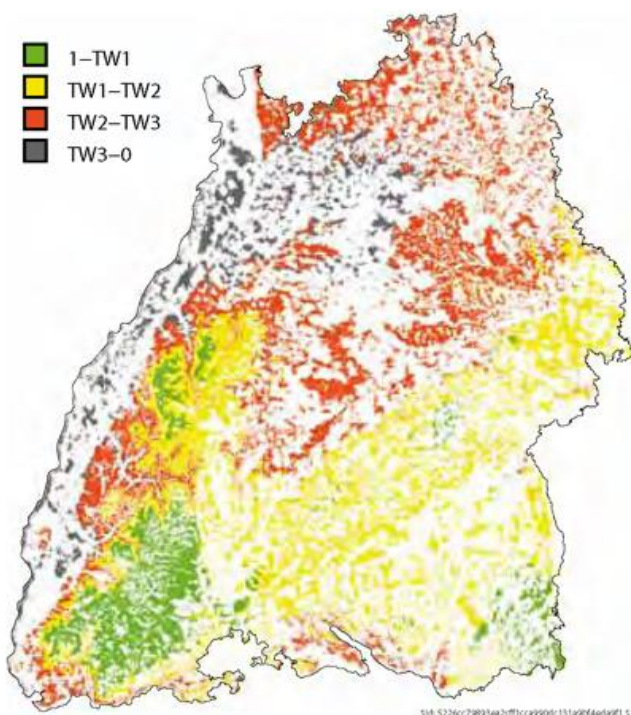


Abb. 11-1: Räumliche Verteilung der Prognose regionalklimatischer Angepasstheit von Fichten (*Picea abies*) basierend auf retrospektiven WorldClim-Daten für die Waldflächen Baden-Württembergs.

und die Schwäbische Alb beschränkt bleibt. Die Fichte befindet sich aktuell in weiten Teilen Baden-Württembergs in der inneren Arealrandzone oder im regionalklimatischen Suboptimum (Abb. 11-1).

Bei Anwendung des Szenarios B2 mit einem angenommenen Anstieg der mittleren jährlichen bodennahen Lufttemperatur um 2 °C und einer Verminderung der jährlichen Niederschlagssumme um 25 mm bis zum Jahr 2050 im Vergleich zur Referenzperiode von 1950 bis 2000 wird die Fichte auf der überwiegenden Fläche Baden-Württembergs in die äußere Arealrandzone gedrängt sein. Lediglich in den höchsten Lagen des Schwarzwaldes und des Südwestdeutschen Alpenvorlandes wird sich für diese Baumart noch das regionalklimatische Suboptimum finden, das Optimum wird nach diesem Modellszenario nicht mehr vorhanden sein (Abb. 11-2).

Für die Buche stellt sich die Situation günstiger dar. Diese Baumart kommt unter den heutigen Klimaverhältnissen in großen Teilen im regionalklimatischen Optimum oder Suboptimum vor, lediglich in der oberrheinischen Tiefebene und in den wärmsten Teilen des Neckarlandes wird die innere Arealrandzone erreicht. Bei einem Klimawandel verschlechtert sich diese Situation zwar auch für die Buche, allerdings wird auch bei der unterstellten Zunahme der bodennahen Lufttemperatur von knapp 2° C die höchste Klimarisikostufe (äußere Arealrandzone) in Baden-Württemberg nicht erreicht. Die Buche bleibt in den höheren Lagen des Schwarzwaldes, der Schwäbischen Alb und des

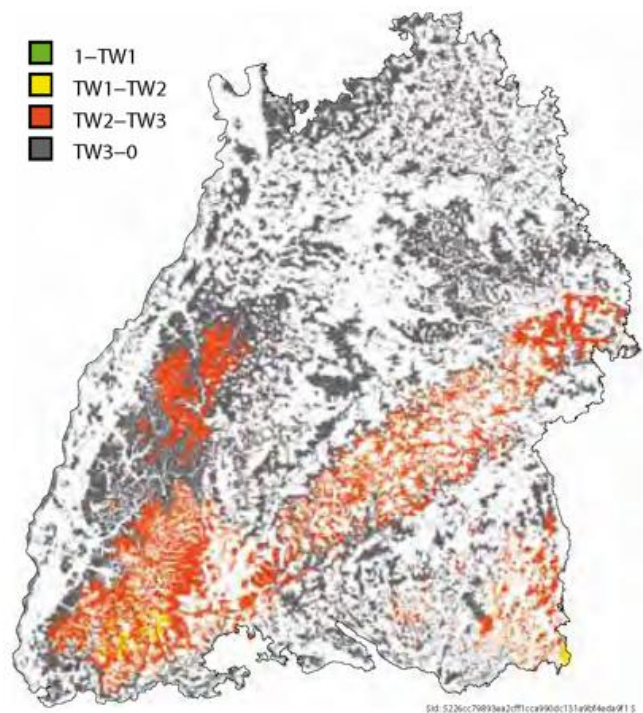


Abb. 11-2: Räumliche Verteilung der Prognose regionalklimatischer Angepasstheit von Fichten (*Picea abies*) für das Szenario B2 im Jahr 2050 mit einem unterstellten Anstieg der mittleren jährlichen Lufttemperatur von 2 °C und einer unterstellten Abnahme der jährlichen Niederschlagssumme von 24,5 mm im Vergleich zur Referenzperiode von 1950 bis 2000 für die Waldflächen Baden-Württembergs.

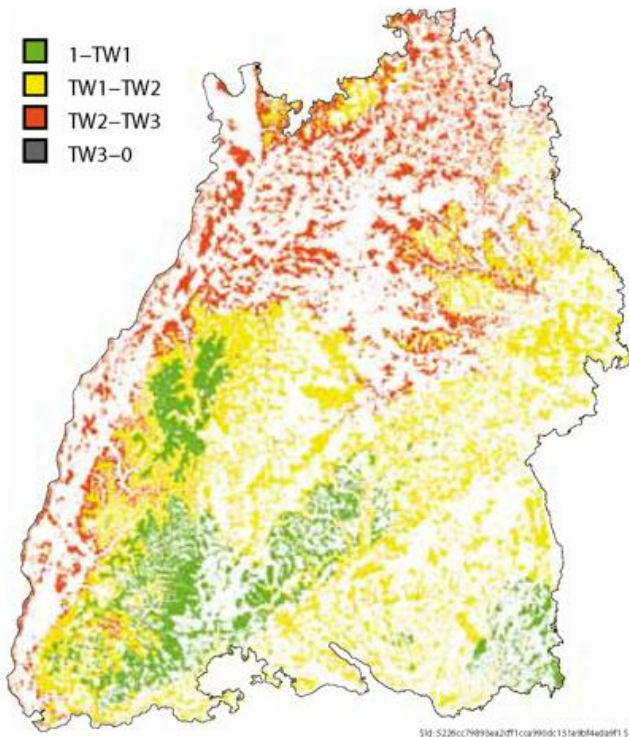


Abb. 11-3: Räumliche Verteilung der Prognose regional-klimatischer Angepasstheit von Buchen (*Fagus sylvatica*) für das unter dem Szenario B2 im Jahr 2050 mit einem unterstelltem Anstieg der mittleren jährlichen Lufttemperatur von 2° C und einer unterstellten Abnahme der jährlichen Niederschlagssumme von 24,5 mm im Vergleich zur Referenzperiode von 1950 bis 2000 für die Waldflächen Baden-Württembergs.

Südwestdeutschen Alpenvorlandes bei dem angenommenen Szenario weiterhin im Optimum (Abb. 11-3).

## 5 Dynamisierte Bewertung der Baumarteneignung

Die Modelle der regional-klimatischen Angepasstheit der Baumarten berücksichtigen nicht die lokalen Standortseigenschaften wie Reliefposition, Bodenwasserhaushalt und Trophie. Durch eine Verschneidung der Modellresultate mit den Daten der Forstlichen Standortskarte im Maßstab von 1:10 000 konnten genannte dynamisierte Baumarteneignungskarten für die wichtigsten Baumarten erstellt werden. Diese Karten werden der Forstpraxis als erste waldbauliche Entscheidungshilfe zur Verfügung gestellt. Die Neubewertung der Baumarteneignung erfolgte für die Fichte, die Buche und die Traubeneiche, jeweils auf der Basis von zwei Szenarien: der aktuelle Ist-Zustand (2010) sowie ein Klimaänderungsszenario mit der Projektion bis in das Jahr 2050. Es wurde gemäß dem Szenario B2 bis zum Jahr 2050 eine Erhöhung der mittleren jährlichen bodennahen Lufttemperatur von 2 °C und eine Verringerung des Jahresniederschlages von rund 25 mm im Vergleich zur Referenzperiode von 1950 bis 2000 unterstellt; dabei wurde mit einer höheren Abnahme der Niederschläge in der Vegetationszeit gerechnet. Die Baumarteneignungskarten folgen dem in der forstlichen Standortkunde etablierten Konzept zur Beurteilung der Baumarteneignung aus der Kombination der Kriterien „Konkurrenzstärke“, „Standortspfleglichkeit“, „Schadresistenz (Betriebs sicher-

heit)“ und „Ertragsleistung“. Anhand dieser Kriterien wird die Eignung einer Baumart für Anbau und Bewirtschaftung in vier Stufen (mit jeweils einer Zwischenstufe) von „geeignet“ (das heißt die Baumart ist ohne Einschränkung für Anbau und Bewirtschaftung geeignet) über „möglich“, „wenig geeignet“ bis „ungeeignet“ (das heißt die Baumart sollte allenfalls einzeln beigemischt und nur zeitweise in den Wäldern vorhanden sein) bewertet. Mit Hilfe der oben beschriebenen Einschätzung der regional-klimatischen Angepasstheit wird nun das Kriterium „Schadresistenz/Betriebsicherheit“ der aktuellen Baumarteneignung angepasst. Wenn zum Beispiel die Fichte nach dem oben beschriebenen Modell aufgrund der zu erwartenden Klimaänderung bis zum Jahr 2050 aus dem derzeitigen Optimum in das Suboptimum oder gar die innere Arealrandzone fällt, so wird die Schadresistenz und damit die Betriebsicherheit der Baumart als geringer eingestuft. Dies führt dazu, dass die Eignung dieser Baumart von derzeit „geeignet“ nach „möglich“ oder gar „wenig geeignet“ herabgestuft wird. In die neue Einschätzung der Baumarteneignung gehen damit sowohl die Ergebnisse der Modellierung über das zu erwartende klimabedingte Risiko für die Baumarten ein, als auch die auf den bisherigen waldbaulichen Erfahrungen aufbauende Einschätzung ihres Leistungsvermögens und der sonstigen Risiken, die von den weiteren in der Standortskarte zusammengefasst dargestellten Standortseigenschaften abhängig sind. Die Ergebnisse der neu berechneten Baumarteneignung wurden in Form von Karten im Maßstab 1:50 000 erstellt und sind über das Internet allgemein zugänglich (<http://www.fva-bw.de/forschung/bui/klimakarten.html>), (Abbildung 11-4 zeigt ein Beispiel).

## 6 Berücksichtigung von Bodenwasserverfügbarkeit und Wassermangelrisiko

Das Auftreten einer bestimmten Baumart und die Wasserverfügbarkeit an einem Standort werden kleinräumig durch die Bodeneigenschaften beeinflusst. Diese umfassen zum einen statisch-hydraulische Eigenschaften, wie das Wasserspeichervermögen (nutzbare Feldkapazität) und die Wasserleitfähigkeit. Zum anderen werden die Standortbedingungen durch die dynamische Änderung der Bodenwasserspeicherfüllung als Folge von Niederschlag und Verdunstungsprozessen geprägt.

Die statisch-hydraulischen Bodeneigenschaften wurden für die Waldflächen vollflächig in einer Auflösung von 50 m mit Hilfe sogenannter Pedotransferfunktionen berechnet. Pedotransferfunktionen leiten die hydraulischen Bodeneigenschaften aus einfacher zu messenden und allgemein verfügbaren Bodeneigenschaften (zum Beispiel Bodenart) ab. Die Parametrisierung der Pedotransferfunktionen für die Waldböden Baden-Württembergs geschah mit den Messdaten von 400 Waldbodenprofilen und in Multi-Step-Outflow-Experimenten (PUHLMANN et al. 2009). Die abgeleiteten Pedotransferfunktionen (PUHLMANN und VON WILPERT 2011, 2012) bestimmen die Retentionsfunktion und die ungesättigte Leitfähigkeit als Funktion der Korngrößenverteilung der Bodenmatrix, des Gehaltes an organi-

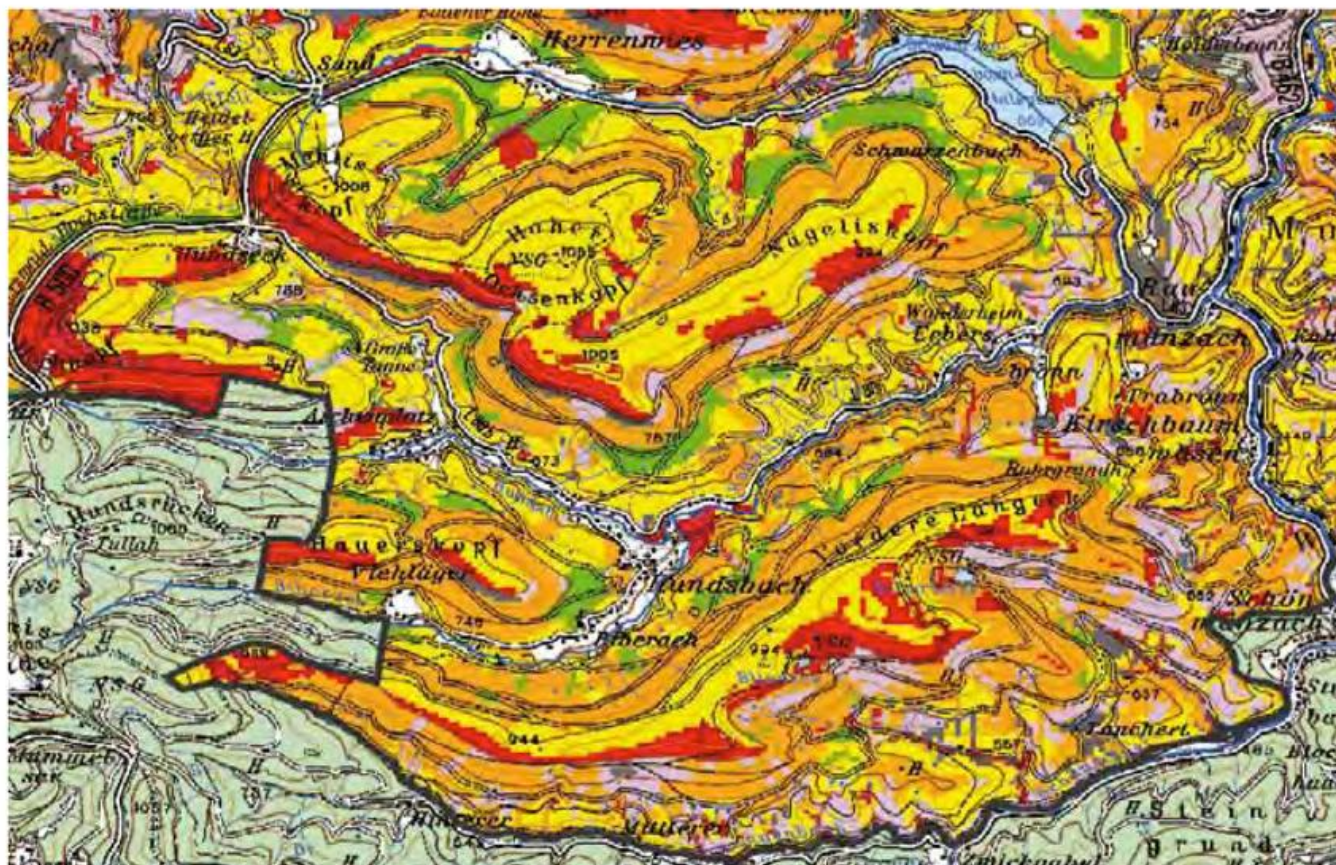


Abbildung 11-4: Baumarteneignungskarte der Fichte für Klimaprojektionen des Szenarios B2 für das Jahr 2050 im Landkreis Rastatt (Ausschnitt). Dunkelgrün: geeignet, gelb: möglich, rot: wenig geeignet, grau: ungeeignet; mit den Zwischenstufen hellgrün (geeignet bis möglich), orange (möglich bis wenig geeignet) und hellviolett (wenig geeignet bis ungeeignet).

scher Substanz und der Trockenrohdichte sowie Merkmalen des Bodengefüges. Die Eingangsgrößen in die Pedotransferfunktionen wurden mit Hilfe multipler Regressionsmodelle aus punktförmig vorliegenden Messungen an etwa 700 Profilen abgeleitet (ZIRLEWAGEN und VON WILPERT 2011). Die Vorhersage der bodenphysikalischen Eingangsgrößen erfolgte mittels quasi-kontinuierlich in der Landschaft aus Kartenwerken oder dem digitalen Geländemodell verfügbaren Prädiktoren. Die Regionalisierungsmodelle erklären – mit Ausnahme der Feinwurzelndichte – zwischen 45 und 75 % der Varianz in den Messdaten. Mit den oben beschriebenen Verfahren konnten die den Bodenwasserhaushalt maßgeblich bestimmenden Bodeneigenschaften für die Waldflächen Baden-Württembergs vollflächig und räumlich hoch auflösend auflösend (Rasterweite 50 m) kartiert werden. Abbildung 11-5 zeigt beispielhaft den mittels der Regionalisierungsmodelle von Zirlewagen und von Wilpert (2011) berechneten prozentualen Gehalt an Sand in 10 bis 30 cm Bodentiefe.

Auf dieser Basis wurde der Bodenwasserhaushalt für jede Rasterzelle für rezente Klimabedingungen (Zeitraum 1978-2007) und für Klimaprojektionen (IPCC-Szenario A2, Zeitraum 2011-2070) mit einem Speicheransatz (WENDLING et al. 1991) simuliert. Abb. 11-6 zeigt beispielhaft die Füllung des nutzbaren Bodenwasserspeichers (nFK) als Mittelwert für die Perioden 1978-2007, 2011-2040 und 2041-2070 für die Baumart Fichte. Danach ist im

Schwarzwald ein Nord-Süd-Gradient mit zunehmendem Wassermangel Richtung Norden zu erkennen. Gebiete mit moderater Austrocknung sind die nördliche Oberrheinebene, der Sandstein-Odenwald und das nördliche Oberschwaben. Hohe Austrocknungsintensitäten treten auf den flachgründigen Böden im Neckarland und der Schwäbischen Alb auf, während das Subalpine Jungmoränenland und die Hochlagen des Schwarzwalds als gut wasserversorgt gelten können. Unter den Klimaverhältnissen des IPCC-Szenarios A2 verschwinden die Kleinflächen ohne Trockenstressrisiko (blau) vollständig und die Flächen mit geringem Risiko (grün) nehmen etwa um die Hälfte ab.

Die Einschätzung der Modellgüte geschah zum einen an den sechs intensiven Messflächen des sogenannten Level II Programms innerhalb des EU-ICP-Forests-Programms ([www.icp-forests.net](http://www.icp-forests.net)), und zum anderen wurden im Umfeld dieser Messstationen entlang 2 km langer Geländetransekte Bodenfeuchtemessplots randomisiert angelegt (WÖHRLE 2006). Die Messungen der Bodenfeuchte in 14 Tage dauernden Perioden zwischen den Jahren 2008 und 2010 wurden mit den Modellvorhersagen verglichen (MORGENSTERN et al. 2011). Bisher wurde bei der landesweiten Bodenwassermodellierung auf den skizzierten Speichermodell-Ansatz vertraut. Sobald jedoch validierte Klimadatensätze verfügbar sind, soll die Wasserhaushaltsmodellierung auf das Richards-Modell „LWF-Brook90“ (HAMMEL und KENNEL 2001) umgestellt werden.

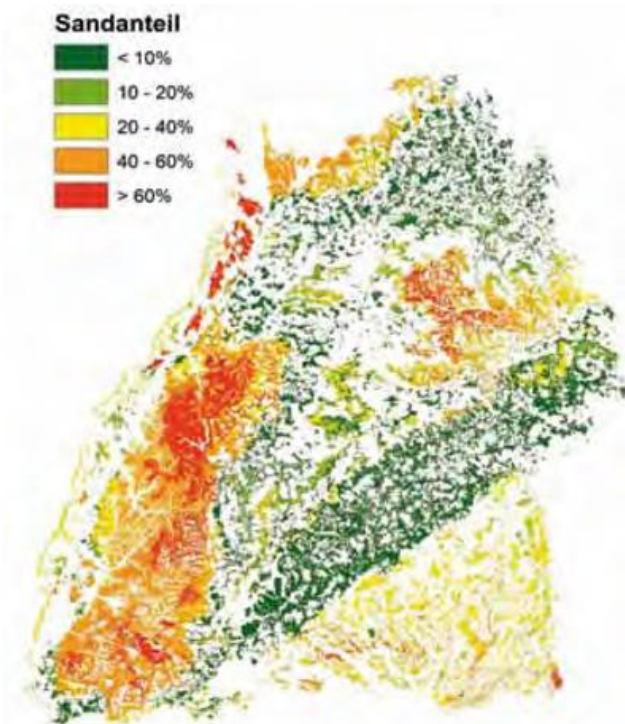


Abb. 11-5: Räumliche Vorhersagen des prozentualen Sandgehalts in einer Bodentiefe von 10 cm bis 30 cm für die Waldflächen Baden-Württembergs, erstellt mit den Regionalisierungsmodellen von ZIRLEWAGEN und VON WILPERT (2011).

## 7 Extraktion und langfristige Trends der umweltbedingten Zuwachskomponente bei Bäumen

Der Holzzuwachs ist eine der wichtigsten Kenngrößen zur Planung und Steuerung der nachhaltigen Bewirtschaftung von Wäldern. Zur Prognose des Holzzuwachses für Klimaveränderungs-Szenarien sind umweltsensitive Zuwachsmodele erforderlich, die die Wechselwirkungen zwischen zuwachsrelevanten Umweltfaktoren und dem Zuwachssignal quantitativ beschreiben. Geeignete Modelle werden im Regelfall auf der Basis retrospektiver Analysen entwickelt, in denen die Effekte von zuwachsrelevanten Umweltfaktoren auf den geleisteten Holzzuwachs in Raum und Zeit

quantifiziert werden. Neben den umweltspezifischen Faktoren, wie zum Beispiel der Lufttemperatur, Niederschlag, Nährstoffe, sind auch andere Einflüsse bedeutsam. Zu diesen zählen zum Beispiel das Alter der Bäume, deren soziologische Stellung, der Dichtstand der Bäume, die Häufigkeit und Stärke von Durchforstungen und schließlich die Leistungskraft der Waldstandorte.

Es hat sich ein Ansatz zur Entwicklung umweltsensitiver Zuwachsmodele als geeignet herausgestellt, bei dem in einem ersten Schritt zunächst die Wirkung von nicht-umweltspezifischen Faktoren auf das gemessene Zuwachssignal eliminiert wird. Damit kann die tatsächlich durch Umweltfaktoren und deren Veränderung beeinflusste Komponente aus dem Zuwachssignal extrahiert werden. Zur Filterung des umweltbedingten Wachstumssignals wurde in der Vergangenheit traditionell auf Methoden der Dendrochronologie zurückgegriffen (COOK und KAIRIUKSTIS 1990). Weil der mit dendrochronologischen Ansätzen ermittelte Holzzuwachs jedoch häufig von anderen Effekten als den klimatischen Bedingungen überlagert ist, wird ein Ansatz verfolgt, bei dem die einzelnen nicht-umweltspezifischen Effekte in multiplikativ verknüpfte Komponenten zerlegt werden (YUE et al. 2011). Die restlich verbleibende Streuung repräsentiert den Effekt, den Umweltfaktoren (insbesondere das Klima) auf den Holzzuwachs haben. Der umweltbedingte Zuwachstrend kann in Form eines Trendkoeffizienten anschaulich dargestellt werden (Abb. 11-7), für dessen Herleitung die auf umweltspezifische Einflussgrößen entfallende Reststreuung durch den Zuwachs dividiert wird, der bei mittleren Komponenteneffekten in einem bestimmten Jahr zu erwarten ist. Entsprechende multiplikative Dekompositionsansätze konnten sowohl für den Dickenzuwachs einzelner Bäume (YUE et al. 2011) als auch für den Grundflächenzuwachs von ganzen Waldbeständen (YUE et al. 2012) angewendet werden. Bei den beiden Anwendungen stellte sich heraus, dass sich sowohl für den Dickenzuwachs von einzelnen Bäumen als auch für den Querschnittsflächenzuwachs ganzer

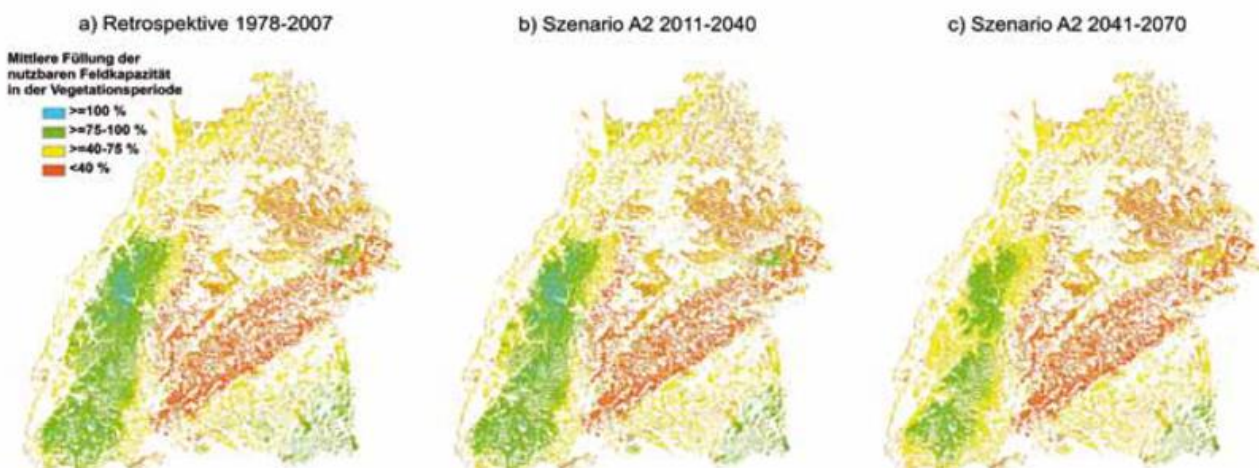


Abb. 11-6: Mittlere Füllung des Bodenwasserspeichers in der Vegetationsperiode basierend auf dem Speichermodell von Wendling et al. (1991), dargestellt für die Referenzperiode 1978-2007 (links) sowie für die zwei Zeiträume 2011-2040 und 2041-2070 bei Annahme des Szenarios A2.

Waldbestände ein nahezu gleicher Trend über die Zeit abzeichnete.

Die restlich verbleibende Abweichung von dem unter durchschnittlichen Umweltbedingungen zu erwartenden Holzzuwachs stieg bei Fichten in Baden-Württemberg von den 1950er bis in die 1970er Jahre nahezu kontinuierlich an. Bis Anfang der 1990er lag der Trend auf einem nahezu gleichbleibend hohen Niveau, bevor gegen Mitte der 1990er Jahre eine Trendumkehr auftrat, die bis in die Gegenwart anhält. Für die Buche zeigt sich ein ähnlicher Verlauf des Trends, dessen Extreme gegenüber der Fichte jedoch deutlich abgeschwächt sind.

Im Gegensatz zur Fichte und zur Buche trat bei der Tanne während der Hochzeiten des „Waldsterbens“ im Zeitraum von den 1960er bis 1980er Jahren eine charakteristische Zuwachsdepression auf. Allerdings war danach auch bei der Tanne ab Anfang der 1980er Jahre ein Anstieg zu beobachten, der bis in die Mitte der 1990er Jahre andauerte. Ähnlich wie bei der Fichte und Buche trat dann eine Absenkung ein, die bis in die Gegenwart anhält. Es ist auffällig, dass die bei allen drei betrachteten Baumarten zu beobachtende Trendumkehr in der jüngsten Vergangenheit offensichtlich bereits deutlich vor dem charakteristischen Trockenjahr 2003 einsetzte.

Die vorgestellten Trendanalysen für den Holzzuwachs liefern Indizien für die Existenz umweltbedingter und damit vor allem klimatischer Veränderungen, lassen jedoch noch keinen Rückschluss auf die ursächlich verantwortlichen Effekte zu. Hierzu sind künftig differenzierte Wirkungsanalysen erforderlich. Entsprechende Untersuchungen der räumlichen und zeitlichen Auswirkung zuwachsrelevanter Umweltfaktoren (Lufttemperatur, Niederschlag, Nährstoffeinträge etc.) sind gegenwärtig in Arbeit.

### 8 Ableitung forstlicher Anpassungsstrategien

Aufgrund der großen Unsicherheit bezüglich der Realitätsnähe der verschiedenen Klimaszenarien und wegen der gegenwärtigen Unklarheiten hinsichtlich der zu erwartenden komplexen Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen dem Verhalten der Waldbäume und den Effekten von Klima und Umwelt erscheinen insbesondere solche Anpassungsstrategien geeignet, die forstlichen Entscheidungsprozessen ein höheres Maß an Flexibilität einräumen. Auf jeden Fall kann die lokale Wahl einer geeigneten Baumart als Schlüsselfaktor zur Etablierung von klimatisch angepassten Waldbeständen gewertet werden.

Die gängigen Waldbehandlungsstrategien in Baden-Württemberg entsprechen dabei den Prinzipien einer naturnahen Waldwirtschaft, bei denen einer auf natürlichem Weg entstandene Waldverjüngung eine große Rolle beigemessen wird. Da sich die natürlich entstan-

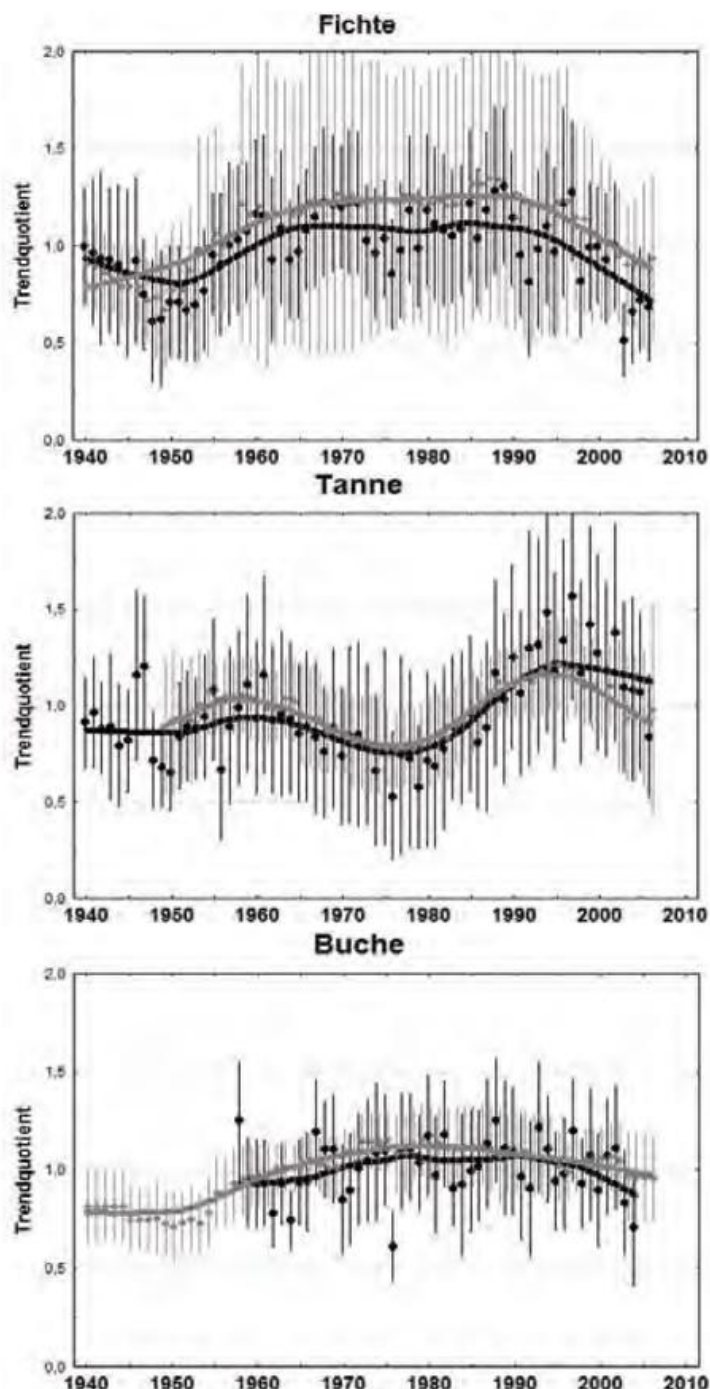


Abb. 11-7: Umweltbedingte relative Wachstumstrends der Fichte, Tanne und Buche in Baden-Württemberg dargestellt in Form des Trendkoeffizienten, für dessen Herleitung die auf umweltspezifische Einflussgrößen entfallende Reststreuung durch den Zuwachs dividiert wird, der bei mittleren Komponenten-Effekten zu erwarten ist. Schwarze Kurve: Durchmesserzuwachstrends herrschender Einzelbäume abgeleitet aus Jahrringanalysen von Probestämmen. Graue Kurve: Grundflächenzuwachstrends ganzer Bestände abgeleitet aus periodischen Vollaufnahmen von Versuchsbeständen. Punkte: Jahresmittelwerte. Senkrechte Balken: Standardabweichung. Die Trendkurven sind geglättet durch lokal gewichtete polynomische Regressionen.

dene Verjüngung hauptsächlich unter dem Einfluss der Baumartenzusammensetzung des überschildernden Altbestandes entwickelt, kann sich deren Zusammensetzung bei sich wandelnden klimatischen Rahmenbedingungen durchaus suboptimal darstellen. In solchen Fällen wird es notwendig sein, in den Naturverjüngungen enthaltene

Exemplare klimatisch gut angepasster Baumarten durch selektive Maßnahmen gezielt zu fördern. Auf den Waldstandorten, an denen klimatisch angepasste Baumarten in der Verjüngung nur unzureichend vertreten sind, wird es zudem unumgänglich sein, diese durch aktive Pflanzung zu etablieren.

Zur Begrenzung von Folgekosten und zur raschen Wiederbewaldung nach eingetretenen Störungsfällen, wie zum Beispiel Windwurf oder Insektenkalamitäten, sollten gesicherte natürliche Verjüngungen prinzipiell nach Möglichkeit schon unter dem Schirm der Altbestände etabliert werden. An Stellen, wo dieses nicht möglich ist, wird der Altbestand mit jungen Bäumen klimatisch angepasster Arten aktiv unterpflanzt. Weil in Wäldern, die nur aus einer Baumart bestehen („Reinbestände“), häufig günstigere Voraussetzungen für Massenvermehrungen von Insekten bestehen als beispielsweise in gemischten Beständen, wird die Bewirtschaftung von Mischbeständen (bestehend aus mehreren Baumarten) auch künftig eine wichtige Rolle spielen.

Grundsätzlich steigt mit zunehmendem Alter und Höhe von Waldbeständen das Schadrisiko vor allem durch Stürme oder biotische Krankheitserreger. Daher kann es unter bestimmten Voraussetzungen durchaus Teil einer sinnvollen Anpassungsstrategie sein, während der Übergangs- beziehungsweise Anpassungszeit das Lebensalter der Bestände nicht übermäßig ansteigen zu lassen. Wegen der höchstwahrscheinlich aufgrund des veränderten Klimas zunehmenden Risiken wird der individuellen Stabilität der einzelnen Bäume in einem Waldbestand eine besondere Beachtung geschenkt werden. Demzufolge wird in Baden-Württemberg auch künftig das Konzept der sogenannten Zukunftsbäume weiter verfolgt. Zukunftsbäume müssen sich schon heute vital und wertvoll zeigen und werden als solche von den Förstern im Wald eindeutig identifiziert. Die klimatisch stabilen Zukunftsbäume werden in der Entwicklung ihrer Kronen und ihres Wurzelwerks stetig gefördert, indem bei regelmäßig stattfindenden Durchforstungen bedrängende Konkurrenten entfernt werden. Mit Hilfe der Durchforstungen kann auch die Höhe des Holzvorrats sowie der Dichtstand der Bäume pro Flächeneinheit begrenzt werden. Damit lässt sich gegebenenfalls auch der Wasserstress während Dürreperioden vermindern.

Im Rahmen waldwirtschaftlicher Anpassungsstrategien wird die Rolle der Holznutzung mitunter kontrovers diskutiert. Um die CO<sub>2</sub>-ökologischen Effekte der Waldnutzung oder eines Nutzungsverzichts zu bewerten, müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Aktuell werden im Hinblick auf mögliche Mitigationsstrategien in der Wissenschaft unterschiedliche Optionen debattiert. Seit einigen Jahren spielt die Biodiversität und deren Erhaltung eine zunehmende Rolle. Natur- und Umweltschützer sehen in einer intensiven Forstwirtschaft eine Gefahr für die Biodiversität und halten einen Nutzungsverzicht auf 5 bis 10 % der Waldfläche für nötig, um auch in europäischen Waldökosystemen die Biodiversität zu sichern. Es

wird argumentiert, dass durch Nutzungsverzicht die Kohlenstoffspeicherung in den Wäldern erhöht würde; diese Argumentation ignoriert jedoch die Wirkungen der Holznutzungen. Gleichzeitig steigt die Nachfrage nach Holz als nachwachsendem CO<sub>2</sub>-neutralem Rohstoff und Energieträger. Gerade aus Gründen des Klimaschutzes zielt die EU-Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Erneuerbare-Energien-Richtlinie) auf eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien; so sollen im Rahmen nationaler Aktionspläne die vorhandenen Potenziale auch der Bioenergie ausgeschöpft werden; explizit wird gefordert, dass die Gemeinschaft und die Mitgliedstaaten eine verstärkte Mobilisierung bestehender Holzreserven und die Entwicklung neuer Waldbausysteme fördern sollen, um das Biomassepotenzial voll auszunutzen. Auf die Konflikte zwischen der Wald-Holz-Option und den Naturschutzziele der Erhaltung und Förderung der Artenvielfalt durch Nutzungsverzicht soll hier nicht weiter eingegangen werden. Im Rahmen einer waldwirtschaftlichen Anpassungsstrategie an den Klimawandel wird die Holznutzung aber auch künftig eine wichtige Rolle spielen. Zum einen ist die Holzernte das Instrument zur Pflege und Erhaltung angepasster und anpassungsfähiger Wälder; die Nutzung als nachwachsender Rohstoff führt somit gleichzeitig zu den erwähnten CO<sub>2</sub>-Minderungseffekten. Aktiver Waldumbau und Holznutzung erfüllen auf diese Weise beide Ziele der Adaptions- und Mitigationsstrategie. Die Wirksamkeit des Beitrags der Waldnutzung hängt allerdings von der Produktivität, dem Biomassezuwachs ab, und aktuell ist es schwer zu beurteilen, ob und wie sich die Produktivität der Wälder im Zuge der Klimaänderung entwickeln wird.

## Literatur

- ABER, J.D., OLLINGER, S.V., FEDERER, C.A., REICH, P.B., GOULDEN, M.L., KICKLIGHTER, D.W., MELILLO, J.M., LATHROP JR, R.G., 1995: Predicting the effects of climate change on water yield and forest production in the northeastern United States. *Climate Research* 5, 207–222.
- BONAN, G.B., 2008: Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320, 1444–1449.
- CANADELL, J.G., RAUPACH, M.R., 2008: Managing forests for climate change mitigation. *Science* 320, 1456–1457.
- CIAIS, P., SCHELHAS, M.J., ZAEHLE, S., PIAO, S.L., CESCATTI, A., LISKI, J., LUYSSAERT, S., LEMAIRE, G., SCHULZE, E.-D., BOURIAUD, O., REIBAUER, A., VALENTINI, R., NABUURS, G.J., 2008: Carbon accumulation in European forests. *Nature geoscience* 1, www.nature.com/naturegeoscience.
- FAO, 2010: Global Forest Resources Assessment 2010. Main Report. Rome.
- FEDDEMA, J.J., OLESON, K.W., BONAN, G.B., MEARNES, L.O., BUJA, L.E., MEEHL, G.A., WASHINGTON, W.M., 2005: The importance of land-co-

- ver change in simulating future climates. *Science* **310**, 1674-1678.
- FIELDING, A., BELL, J., 1997: A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation* **24**, 38-49.
- HAMMEL K., KENNEL, M., 2001: Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. *Forstliche Forschungsberichte München*, **185**.
- HIJMANS, R. J., CAMERON, S. E., PARRA, J. L., JONES, P. G., JARVIS, A., 2005: Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* **25**, 1965-1978.
- IVERSON, L.R., PRASAD, A.M., 2000: Potential changes in tree species richness and forest community types following climate change. *Ecosystems* **4**, 186-199.
- IVERSON, L.R., PRASAD, A.M., 1998: Predicting abundance of 80 tree species following climate change in the eastern United States. *Ecological Monographs* **68**, 465-485.
- MILLAR, C.I., STEPHENSON, N.L., STEPHENS, S.L., 2007: Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecological applications* **17**, 2145-2151.
- MORGENSTERN, Y., PUHLMANN, H., WILPERT, K., 2011: Erfassung und erste Analysen von räumlichen Mustern der Bodenfeuchte auf Waldstandorten. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**, 47-59.
- MOSS, R.H., EDMONDS, J.A., HIBBARD, K.A., et al., 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* **463**, 747-756.
- MOSS, R., BABIKER, M., BRINKMAN, S., et al., 2008: Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies: IPCC Expert Meeting Report, 19-21 September 2007. Noordwijkerhout, The Netherlands.
- NAKICENOVIC, N., ALCAMO, J., DAVIS, G., et al., 2000. Emissions Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III. *Cambridge University Press*, New York.
- PUHLMANN, H., VON WILPERT, K., LUKES, M., DRÖGE, W., 2009: Multistep outflow experiments to derive a soil hydraulic database for forest soils. *European Journal of Soil Science* **60**, 792-806, doi: 10.1111/j.1365-2389.2009.01169.x
- PUHLMANN, H., VON WILPERT, K., 2011: Datenbank hydraulischer Eigenschaften von Waldböden – Test und Entwicklung von Pedotransferfunktionen, *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **11**, 61-71.
- PUHLMANN, H., VON WILPERT, K., 2012: Pedotransfer functions for water retention and unsaturated hydraulic conductivity of forest soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **175**, 221-235, doi: 10.1002/jpln.201100139 221.
- Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG  
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:DE:PDF>
- SCHMIDT, M., HANEWINKEL, M., KANDLER, G., KUBLIN, E., KOHNLE, U., 2010: An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany. *Canadian Journal of Forest Research* **40**, 1636-1652.
- TOLLEY, L.C., STRAIN, B.R., 1984: Effects of CO2 enrichment and water stress on growth of *Liquidambar styraciflua* and *Pinus taeda* seedlings. *Canadian Journal of Botany* **62**, 2135-2139.
- WENDLING U., SCHELLIN, H.G., THOMÄ, M., 1991: Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. *Z. f. Meteorologie* **41**, 1-16.
- WÖHRLE, N., 2006: Randomisiert wandernde Messplots. Raum-Zeit-Modellierung von Parametern des Stoffhaushaltes in heterogenen Kalkbuchenwäldern. Freiburg, Dissertation, *Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen* **44**, 145 S.
- YUE, C., KOHNLE, U., HANEWINKEL, M., KLÄDTKE, J., 2011: Extracting environmentally driven growth trends from diameter increment series based on a multiplicative decomposition model. *Can. J. For. Res.* **41**, 1577-1589.
- YUE, C., KOHNLE, U., KAHLE, H.-P., KLÄDTKE, J., 2012: Exploiting irregular measurement intervals for the analysis of growth trends of stand basal area increments: a composite model approach. *For. Ecol. Manage.* **263**, 216-228.
- ZIRLEWAGEN, D., VON WILPERT, K., 2011: Regionalisierung bodenphysikalischer Eingangsgrößen für bodenhydraulische Pedotransferfunktionen. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **11**, 73-83.

**Adressen der Autoren dieses Heftes**

PROF. DR. CHRISTIAN BERNHOFER  
 Institut für Hydrologie und Meteorologie  
 TU Dresden  
 Pienner Str. 23  
 01737 Tharandt  
 christian.bernhofe@tu-dresden.de

DR. KLAUS BLÜMEL  
 Humboldt-Universität zu Berlin  
 Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät  
 Albrecht-Thaer-Weg 5  
 14195 Berlin  
 klaus.bluemel@agr.ar.hu-berlin.de

DR. HARALD BRADEN  
 Deutscher Wetterdienst  
 Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung (ZAMF)  
 Bundesallee 50  
 38116 Braunschweig  
 harald.braden@gmx.de

DR. UDO BUSCH  
 Deutscher Wetterdienst  
 Abteilung Agrarmeteorologie  
 Frankfurter Straße 135  
 63067 Offenbach  
 Udo.Busch@dwd.de

PROF. DR. FRANK-M. CHMIELEWSKI  
 Humboldt-Universität zu Berlin  
 Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät  
 Albrecht-Thaer-Weg 5  
 14195 Berlin  
 chmielew@agr.ar.hu-berlin.de

DR. DOMINIK CULLMANN  
 Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt  
 Baden-Württemberg (FVA)  
 Wonnhaldestr. 4  
 79100 Freiburg  
 dominik.cullmann@forst.bwl.de

DR. CATHLEEN FRÜHAUF  
 Deutscher Wetterdienst  
 Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung (ZAMF)  
 Bundesallee 50  
 38116 Braunschweig  
 cathleen.fruehauf@dwd.de

DR. VALERI GOLDBERG  
 Technische Universität Dresden  
 Institut für Hydrologie und Meteorologie  
 Pienner Str. 23  
 01737 Tharandt  
 valeri.goldberg@tu-dresden.de

DR. THOMAS GRÜNWARD  
 TU Dresden  
 Institut für Hydrologie und Meteorologie  
 Pienner Str. 23  
 01737 Tharandt  
 thomas.gruenwald@tu-dresden.de

DIPL.-MET. WOLFGANG JANSSEN  
 Deutscher Wetterdienst  
 Agrarmeteorologie  
 Frankfurter Straße 135  
 63067 Offenbach  
 Wolfgang.Janssen@dwd.de

DR. GERALD KÄNDLER  
 Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt  
 Baden-Württemberg (FVA)  
 Wonnhaldestr. 4  
 79100 Freiburg  
 Gerald.Kaendler@forst.bwl.de

PROF. DR. ALEXANDER KNOHL  
 Universität Göttingen  
 Büsingen Institut, Abteilung Bioklimatologie  
 Büsingenweg 2  
 37077 Göttingen  
 aknohl@uni-goettingen.de

PD DR. BARBARA KÖSTNER  
 Professur für Meteorologie  
 Technische Universität Dresden  
 01062 Dresden  
 barbara.koestner@tu-dresden.de

DR. ULRICH KOHNLE  
 Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt  
 Baden-Württemberg (FVA)  
 Wonnhaldestr. 4  
 79100 Freiburg  
 ulrich.kohnle@forst.bwl.de

DIPL.-MET. FRANZ-JOSEF LÖPMEIER  
 Deutscher Wetterdienst  
 Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung (ZAMF)  
 Bundesallee 50  
 38116 Braunschweig  
 franz-josef.loepmeier@dwd.de

DR. REMIGIUS MANDERSCHIED  
 Thünen-Institut für Biodiversität  
 Bundesallee 50  
 38116 Braunschweig  
 remy.manderscheid@ti.bund.de

PROF. DR. HELMUT MAYER  
 Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
 Meteorologisches Institut  
 Werthmannstraße 10  
 79085 Freiburg  
 helmut.mayer@meteo.uni-freiburg.de

DR. HANS-GERHARD MICHIELS  
 Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt  
 Baden-Württemberg (FVA)  
 Wonnhaldestr. 4  
 79100 Freiburg  
 Hans-Gerhard.Michiels

DR. ARNE NOTHDURFT  
 Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt  
 Baden-Württemberg (FVA)  
 Wonnhaldestr. 4  
 79100 Freiburg  
 arne.nothdurft@forst.bwl.de

DR. CORNELIA PERSEKE-OCKELMANN  
 Deutscher Wetterdienst  
 Abteilung Agrarmeteorologie  
 Außenstelle Geisenheim  
 Kreuzweg 25  
 65366 Geisenheim  
 Cornelia.Perseke-Ockelmann@dwd.de

DR. HEIKE PUHLMANN  
 Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt  
 Baden-Württemberg (FVA)  
 Wonnhaldestr. 4  
 79100 Freiburg  
 heike.puhlmann@forst.bwl.de

DR. DIRK SCHINDLER  
 Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
 Meteorologisches Institut  
 Werthmannstraße 10  
 79085 Freiburg  
 dirk.schindler@meteo.uni-freiburg.de

DR. SIEGFRIED SCHITTENHELM  
 Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde  
 Julius Kühn-Institut (JKI)  
 Bundesallee 50  
 38116 Braunschweig  
 siegfried.schittenhelm@jki.bund.de

DIPL.-MET. DENNIS SÖHL  
 Technische Universität Dresden  
 Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung  
 Piennner Str. 23  
 01737 Tharandt  
 dennis.soehl@tu-dresden.de

DR. UWE SPANK  
 Institut für Hydrologie und Meteorologie  
 TU Dresden  
 Piennner Str. 23  
 01737 Tharandt  
 uwe.spank@tu-dresden.de

PROF. DR. HANS-JOACHIM WEIGEL  
 Thünen-Institut für Biodiversität  
 Bundesallee 50  
 38116 Braunschweig  
 hans.weigel@ti.bund.de

PROF. DR. KARL-OTTO WENKEL  
 Institut für Landschaftssystemanalyse  
 Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF)  
 Eberswalder Str. 84  
 15374 Müncheberg  
 wenkel@zalf.de

DR. KLAUS-HERMANN VON WILPERT  
 Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt  
 Baden-Württemberg (FVA)  
 Wonnhaldestr. 4  
 79100 Freiburg  
 Klaus.Wilpert@forst.bwl.de

DR. KLAUS-PETER WITTICH  
 Deutscher Wetterdienst  
 Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung (ZAMF)  
 Bundesallee 50  
 38116 Braunschweig  
 klaus-peter.wittich@dwd.de

DR. CHAOFANG YUE  
 Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt  
 Baden-Württemberg (FVA)  
 Wonnhaldestr. 4  
 79100 Freiburg  
 Chaofang.Yue@forst.bwl.de

- Flugmeteorologie I und II (Fachredaktion: Prof. Dr. T. Hauf)
- Meteorologische Aspekte regenerativer Energien (Fachredaktion: Dr. D. Heinemann)