

**Berichte des Meteorologischen Institutes
der Universität Freiburg**

Nr. 16

Andreas Matzarakis und Helmut Mayer (Hrsg.)

**Proceedings
zur 6. Fachtagung BIOMET
des Fachausschusses Biometeorologie
der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e.V.**

Freiburg, März 2007



ISSN 1435-618X

Alle Rechte, insbesondere die Rechte der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung vorbehalten.

Eigenverlag des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Druck: Druckerei der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Herausgeber: Prof. Dr. Helmut Mayer

Meteorologisches Institut der Universität Freiburg

Werderring 10, D-79085 Freiburg

Tel.: 0049/761/203-3590; Fax: 0049/761/203-3586

e-mail: meteo@meteo.uni-freiburg.de

Dokumentation: Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg Nr. 16, 2007, 249 S.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Vorwort	6
<i>C. Koppe und P. Becker</i>	7
Vergleich der Hitzewellen 2003 und 2006	
<i>G. Jendritzky, G. Havenith und R. de Dear</i>	12
Stand der Entwicklung beim Universellen Thermischen Klimaindex UTCI	
<i>B. Tinz und G. Jendritzky</i>	19
Die thermischen Umgebungsbedingungen des Menschen auf der globalen Skala	
<i>E. Rudel, A. Matzarakis and E. Koch</i>	25
Bioclimate and mortality in Vienna	
<i>L. Katzschner</i>	31
Erfassung und Bewertung des thermischen Komforts im städtischen Mikroklima für die Projekt und Freiraumplanung	
<i>L. Katzschner, M. Bruse, C. Drey und H. Mayer</i>	37
Untersuchung des thermischen Komforts zur Abpufferung von Hitze mittels eines städtebaulichen Entwurfs (Verbundprojekt KLIMES)	
<i>P. Becker und J. Pfafferott</i>	43
Die Relevanz der Innenraumverhältnisse für Hitzewarnsysteme	
<i>S. Dorn</i>	48
Entwicklung eines astronomischen Verfahrens zur Langzeitprognose von zyklonalen und antizyklonalen Luftströmungen	
<i>E. Wanka, B. Werner, M. Pfeifer, R.A. Jörres und Dennis Nowak</i>	55
Zusammenhang zwischen meteorologischen Parametern und Lungenfunktionsmessungen bei Patienten mit chronisch obstruktiver Lungenerkrankung (COPD)	
<i>U. Kaminski, U. Wolf-Benning, P. Becker, M. Fricker und V. Dietze</i>	61
Feinstaubkonzentrationen (PM2.5) in deutschen Kurorten - Gesundheitliche Relevanz und Minderungspotentiale	
<i>C. Brandenburg und A. Matzarakis</i>	67
Das thermische Empfinden von Touristen und Einwohnern der Region Neusiedler See	
<i>A. Matzarakis</i>	73
Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Integration von Wetter- und Klimabedingungen im Tourismus	

<i>E. Koch, A. Matzarakis und E. Rudel</i>	80
Anpassung des Sommertourismus an den Klimawandel in Österreich. StartClim 2006.D2: erste Ergebnisse	
<i>H. Heinrichs, J. Jetzkowitz, E. Kreilkamp, A. Matzarakis, A. Möller und G. Michelsen</i>	87
KUNTIKUM: Klimatrends und nachhaltige Tourismusedwicklung in Küsten- und Mittelgebirgsregionen: Produkt und Infrastruktur-Innovation durch kooperative Lernprozesse und strategische Entscheidungsfindung	
<i>H. Mayer, D. Schindler, U. Kohnle, S. Hein, C. Kottmeier, M. Kunz und B. Ruck</i>	94
RESTER - ein Verbundprojekt zur Reduzierung des Sturmschadenrisikos für Wälder in Baden-Württemberg vor dem Hintergrund des regionalen Klimawandels	
<i>D. Schindler</i>	100
Baumreaktionen auf Windlasten	
<i>O. Panferov, A. Olchev, K. Radler, D. Fellert and G. Gravenhorst</i>	104
Influence of gap size and orientation on distribution and spectral composition of solar radiation	
<i>V. Goldberg, B. Fischer und C. Bernhofer</i>	111
Kopplung von Bodenwasser und Baumtranspiration im Vegetations-Grenzschichtmodell HIRVAC	
<i>M. Herbst, J. M. Roberts und D. D. Gowing</i>	117
Der Einfluß von Randeffekten auf die Verdunstung von fragmentierten Waldbeständen	
<i>C. Bernhofer, U. Eichelmann, J. Franke, V. Goldberg, T. Grünwald, J. Häntzschel, B. Köstner, H. Prasse, R. Queck, A. Schreiber, J. Seegert und U. Spank</i>	123
The Influence of Climate Change and Land-use on the Water Budget of a Forested Catchment	
<i>B. Fischer, V. Goldberg und Ch. Bernhofer</i>	128
Modellierung des Bestandes-Innenklimas in Abhängigkeit klimabedingt veränderter Bestandesstruktur – Modellergebnisse vom Kranzberger Forst (Freising) und der Dübener Heide	
<i>J. Holst, D. Schindler, L. Jaeger und H. Mayer</i>	135
Komponenten des CO ₂ -Haushalts bei temporärer Trockenheit	
<i>T. Müller, K.-P. Wittich und W. Durner</i>	141
Glasscherben als Ursache von Waldbränden?	
<i>J. Lüers, J. Smaczny, A. Kies und J. Bareiss</i>	147
Dynamik der Austauschprozesse von CO ₂ und Radon-Isotopen zwischen Waldböden, Waldbestand und Atmosphäre (WALDATEM-2006)	
<i>L. Zimmermann, T. Rötzer, U. Hera, H. Maier, Ch. Schulz und Ch. Kölling</i>	153
Konzept zur Erstellung neuer hochaufgelöster Klimakarten für die Wälder Bayerns als Bestandteil eines forstlichen Standortinformationssystems	

<i>T. Rötzer</i>	160
Modellierung der klimabedingten Wachstumsdynamik von Waldbeständen	
<i>M. Horn, S. Raabe und M. Wilsdorf</i>	167
Prognose des Diasporentransports in einer turbulenten Atmosphäre	
<i>M. Zygmuntowski, D. Viville, G. Najjar, L. Jaeger and P. Kastendeuch</i>	173
Determining of turbulent CO ₂ and H ₂ O fluxes over a wheat field in the Upper Rhine Valley by using the eddy-covariance-method (Project INTERREG IIIa 3c.10)	
<i>I. Lehner, R. Vogt und E. Parlow</i>	180
Natürliche Variabilität des CO ₂ -Flusses in einem Maisbestand	
<i>K.-D. Buchwald</i>	186
Verifikation des Wasserhaushaltsmodells AMBAV mit Hilfe der TDR-Messtechnik	
<i>F.-J. Löpmeier</i>	193
Agrarmeteorologische Aspekte beim Anbau von Energiemais	
<i>A. Schaldach und K.-P. Wittich</i>	199
Untersuchungen zur Spritzwasserdynamik	
<i>H. Braden und C. Fröhlich</i>	205
Modifikationen eines ein-dimensionalen SVAT-Modells für die Verwendung im Rahmen der agrarmeteorologischen Beratung für den Weinbau	
<i>C. Fröhlich, D. Hoppmann, U. Sievers, P.-H. Voss und H. Jagoutz</i>	212
Das Weinanbaugebiet Luxemburg - Klassifizierung der Weinbergslagen	
<i>C. Defila</i>	217
Zur Geschichte der Phänologie in der Schweiz	
<i>Y. Henniges und F.-M. Chmielewski</i>	224
Trends phänologischer Phasen von Obstgehölzen unter Berücksichtigung sortenspezifischer Aspekte	
<i>F.-M. Chmielewski und Y. Henniges</i>	229
Phänologische Modelle – Grundlage zur Abschätzung des Klimaimpakts	
<i>J. Nekovar, M. Mozny und D. Bares</i>	236
Selbstsuchendes Lesen der phänologischen Phasen durch die Fotokamera im Meteorologischen Observatorium Doksany	
<i>R. Bagar and J. Nekovar</i>	240
Spruce, Beech, Linden and Strawberry phenophases in different Forest Vegetation Layer	
<i>E. Koch und R. Neumcke</i>	244
Phänologisches Monitoring in Österreich - das neue Internetportal der ZAMG	

VORWORT

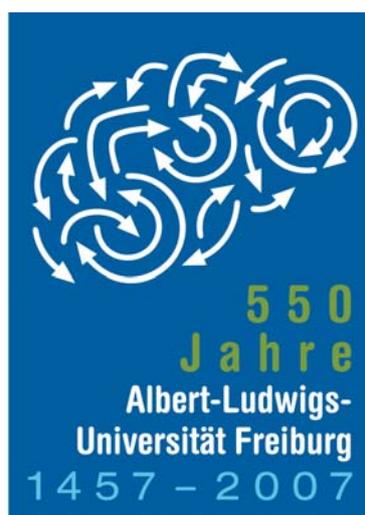
Der Fachausschuss Biometeorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e.V. hat seine Tradition fortgesetzt und die 6. Fachtagung vom 26. bis zum 28. März 2007 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg abgehalten. Sie fand im Rahmen des 550-jährigen Jubiläums der Universität statt. Die ganze Bandbreite der Biometeorologie wurde über Vorträge und Poster abgedeckt. Die Langfassungen der Beiträge sind in diesem Bericht zusammengestellt.

Die Tagung wurde durch das Meteorologische Institut der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, der Gesellschaft zur Förderung Medizin-Meteorologischer Forschung in Deutschland e.V. und den Deutschen Wetterdienst unterstützt.

Allen Mitwirkenden, die bei der Organisation und Durchführung der 6. Fachtagung BIOMET mitgeholfen haben, sei hier herzlichst gedankt.

Ανδρέας Ματζαράκης

Vorsitzender des FA BIOMET



Vergleich der Hitzewellen 2003 und 2006

Christina Koppe und Paul Becker

Deutscher Wetterdienst – Medizin-Meteorologie

Zusammenfassung

Im Jahr 2003 verursachten mehrere Phasen mit außergewöhnlich hohen Temperaturen mehrere zehntausend hitzebedingte Todesfälle in Europa. Besonders betroffen waren dabei der Westen Europas, der Mittelmeerraum sowie die Schweiz und der Süden Deutschlands. Aufgrund der Auswirkungen dieses Hitzesommers wurden in vielen der betroffenen Länder Hitze-Gesundheits-Warnsysteme eingerichtet. Diese Systeme haben zum Ziel durch rechtzeitige Information der Bevölkerung und Aktivierung unterschiedlichster Interventionsmaßnahmen, die Folgen von Hitze auf die menschliche Gesundheit abzumildern.

Nach zwei Sommern ohne größere Hitzeereignisse, gab es 2006 vielerorts wieder längere Phasen mit überdurchschnittlich hohen Temperaturen. In dieser Studie werden die Hitzewellen der Jahre 2003 und 2006 bezüglich ihres räumlichen und zeitlichen Auftretens sowie ihrer Andauer und Intensität miteinander verglichen. Es soll so abgeschätzt werden, ob eine potentielle Verringerung in der thermisch bedingten Mortalität in 2006 alleine auf die nach 2003 eingeführten Hitzewarnsysteme zurückzuführen sein kann, oder ob Unterschiede in der meteorologischen Situation eine Rolle gespielt haben könnten.

Comparison of the heat waves in 2003 and 2006

Abstract

Several heat waves in 2003 with very high temperatures caused several thousands of heat related deaths in Europe. Western Europe, the Mediterranean, Switzerland and southern Germany were especially affected. Due to this heat waves many of the affected countries implemented Heat Health Warning Systems (HHWS). These systems aim at reducing heat related health impacts by informing the population timely and by activating a set of intervention strategies.

After two summers without significant heat events in 2006 another heat wave occurred in Europe. In this paper the heat waves of 2003 and 2006 are compared with respect to their spatial and temporal extend and their intensity. The aim is to estimate whether a potential decrease in mortality was caused by the effectiveness of the HHWS or if it is caused by the differences in the meteorological situation.

1. Einführung

Hitzewellen können zu negativen gesundheitlichen Auswirkungen führen. Dies wurde nach den Hitzewellen im Sommer 2003 in Europa besonders deutlich. Schätzungen gehen davon aus, dass europaweit etwa 35,000 Menschen der Hitzewelle im August 2003 zum Opfer gefallen sind (LARSON, 2003). Die Anzahl der Todesfälle erhöht sich nochmals deutlich, wenn der gesamte Sommer 2003, der mehrere Hitzewellen hervorbrachte, betrachtet wird. Diese hohe Anzahl von Todesfällen veranlasste viele europäische Länder als Reaktion auf diese Hitzeereignisse, Hitze-Gesundheits-Warnsysteme (engl.: Heat Health Warning Systems HHWS) einzuführen.

Über die Effektivität solcher Systeme, die im Falle einer drohenden Hitzewelle die Bevölkerung warnen und die Umsetzung von zuvor festgelegten Interventionsmaßnahmen veranlassen, ist jedoch wenig bekannt. Daher kann ein Vergleich der Hitzewellen in den Jahren 2003 (i.d.R. keine HHWS) und 2006 (viele Länder haben HHWS) Aufschluss über die Effektivität von Hitze-Gesundheits-Warnsystemen geben.

Dazu müssen sowohl die meteorologischen Charakteristika der Hitzewellen verglichen werden, als auch die Auswirkungen dieser Hitzewellen auf die Gesundheit. Zusätzlich beeinflussen sozio-ökonomische Faktoren das Risiko an hitzebedingter Morbidität oder Mortalität zu erkranken (STAFOGGIA et al., 2006). Diese Studie wird sich hauptsächlich auf den Vergleich der meteorologischen Charakteristika der beide Hitzewellen beschränken, da europaweite Informationen über die Gesundheitsauswirkungen der beiden Hitzewellen nur unvollständig vorhanden sind.

Ein generelles Problem bei dem Vergleich von Hitzewellen ist, dass der Begriff "Hitzewelle" noch nicht quantitativ definiert wurde (ROBINSON, 2001). Im Allgemeinen versteht man unter einer Hitzewelle eine „andauernde Periode mit außergewöhnlich heißem Wetter“. Der Hitzewellenbegriff ist immer relativ zu den normalen Wetter- und Klimabedingungen für einen Ort und eine Zeit des Jahres.

Aufgrund des Fehlens einer quantitativen Hitzewellendefinition werden in dieser Studie die statistischen Eigenschaften einer Hitzewelle wie Temperatur oder die Differenz der Temperatur, des Gesamtbedeckungsgrades, der Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit während der jeweils wärmsten 10-Tages-Perioden in beiden Jahren betrachtet.

Auch wenn in dieser Studie die meteorologischen Hauptparameter, welche den Wärmeaustausch des Menschen mit seiner Umgebung beeinflussen, berücksichtigt werden, so zielt diese Arbeit doch nicht auf eine physiologisch relevante Bewertung der thermischen Situation in beiden Sommern ab. Das Ziel dieser Arbeit ist es vielmehr, die Regionen zu identifizieren, die in beiden Jahren von Hitzewellen betroffen waren und Aussagen über die relative Stärke der Ereignisse in den betroffenen Regionen zu machen. Da es oftmals sehr lange dauert bis Aussagen über die hitzebedingte Mortalität erhältlich sind, kann ein meteorologischer Vergleich ein Werkzeug sein, um die Auswirkungen der 2006 Hitzewelle relativ zur 2003 Hitzewelle abzuschätzen.

2. Datengrundlage

Um auf eine einheitliche Datengrundlage zurückgreifen zu können, basiert diese Studie auf der operationellen Analyse des EZMW (Europäisches Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage). Die Daten wurden für das Gebiet zwischen dem 30. und 80. Breitengrad sowie zwischen dem -15. und 45. Längengrad auf ein Gitternetz mit einer Maschenweite von 0.5° extrapoliert. Die Klimatologie wurde für die selbe Region und die selbe räumliche Auflösung basierend auf den ERA40 Daten der Jahre 1971 – 2000 des EZMW für jeden Tag des Jahres berechnet.

Die meteorologischen Parameter, welche in dieser Studie berücksichtigt wurden, sind die Lufttemperatur sowie die Taupunkttemperatur in 2m über Grund, die horizontale Windkomponente in 10m über dem Erdboden und der Gesamtbedeckungsgrad. Für alle Parameter wurden die Werte um 12 UTC zur Charakterisierung der Tagesbedingungen und die Werte um 0 UTC zur Charakterisierung der Nacht verwendet. Da für die Tagesmaximum und die Tagesminimum Temperatur keine Analysen vorliegen, wurden diese nicht berücksichtigt.

Heiße Tage für einen Gitterpunkt wurden über das 90%-Perzentil und sehr heiße Tage über das 95%-Perzentil definiert. Bei der Berechnung von Perioden über einem Schwellenwert wurden einzelne Tage die unter diesem Wert liegen zugelassen.

3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse dieser Studie sind in Abbildung 1 zusammengefasst. Regionen, in denen die mittlere Lufttemperatur mindestens Monat 1°K (2°K , 3°K) über dem klimatologischen Mittelwert lag, sind farbig dargestellt. In diesen Regionen wurde zusätzlich die wärmsten 10-Tages-Perioden der beiden Sommer miteinander verglichen. Die kräftigeren Farben zeigen an, dass in diesen Regionen während der wärmsten 10-Tages-Periode die Taupunkttemperatur über 15°C lag. Dies deutet auf einen potentiellen zusätzlichen thermischen Stress hin. Die Regionen, die basierend auf dieser Auswertung 2003 stärker betroffen waren, sind in gelb, orange und rot dargestellt. Regionen, die in blau bzw. violett Tönen dargestellt sind, waren 2006 stärker betroffen.

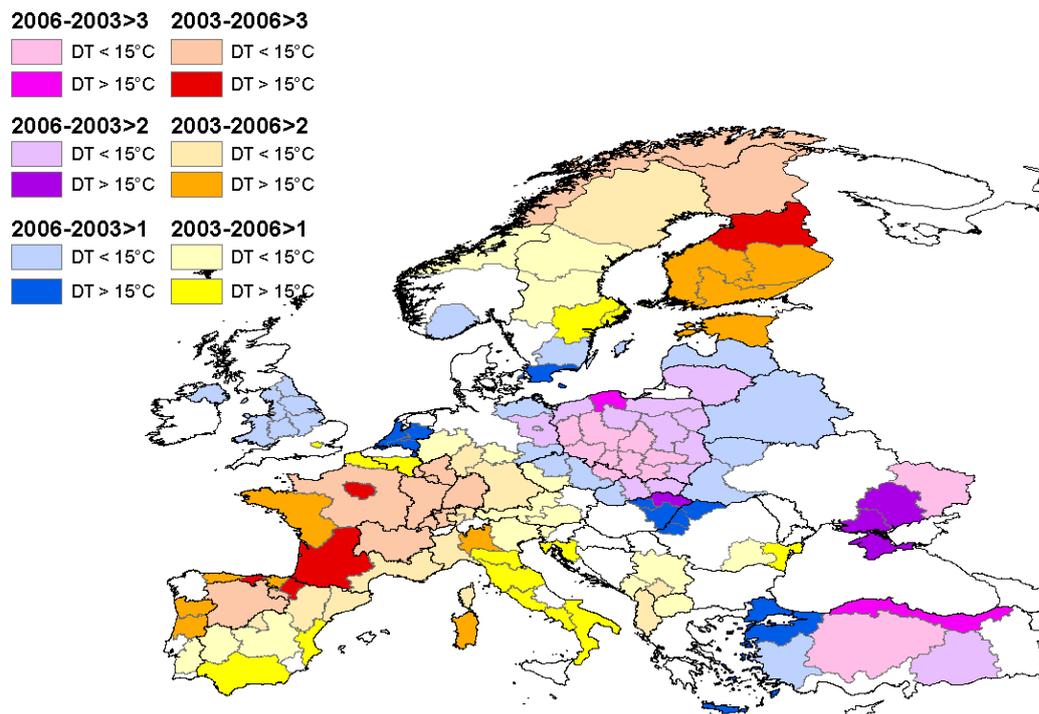


Abb. 1: Vergleich der Lage der wärmsten 10 Tages-Periode der Sommer 2003 und 2006 (DT: Taupunkttemperatur).

Fig. 1: Comparison of the location of the hottest 10 day periods in 2003 and 2006 (DT: dewpoint temperature)

Basierend auf der Analyse der monatlichen Abweichung der Temperatur vom klimatologischen Mittelwert alleine ist es sehr schwer zu beurteilen, welche Regionen in Europa im Jahr 2003 stärker von Hitze betroffen waren als 2006 und umgekehrt. Beide Sommer wiesen Monate mit einer überdurchschnittlichen Anzahl von Tagen über dem 90% sowie über dem 95%-Perzentil auf (nicht dargestellt).

Deutlichere Unterschiede ergeben sich beim Vergleich der wärmsten 10-Tages-Perioden (Abb. 1). Dieser Vergleich zeigt dass die Temperaturen während der wärmsten 10-Tages-Periode in England, den Niederlanden, Südschweden und Südnorwegen sowie in Teilen Osteuropas im Jahre 2006 höher waren als in 2003.

Die Persistenz der Hitzewelle, welche über die maximale Anzahl von Tagen über dem 90%-Perzentil definiert wurde, war 2006 im Süden Portugals und den angrenzenden Regionen in

Spanien höher als im Jahre 2003. Die Temperaturen während der wärmsten 10-Tages-Periode waren jedoch geringer, was eine geringere Intensität des Hitzeereignisses anzeigt.

Abgesehen von den küstennahen Regionen waren die wärmsten Perioden in beiden Jahren als eher trocken einzustufen (nicht dargestellt). Auch bezüglich des Gesamtbedeckungsgrades während der wärmsten 10-Tages-Periode gab es nur geringe Unterschiede zwischen den beiden Jahren (Abb. 2). In den Gebieten, die 2003 wärmer waren als 2006 war die Windgeschwindigkeit in der Regel geringer als während der wärmsten 10-Tages-Periode im Jahre 2006. Das kann ein Indikator dafür sein, dass die Hitzewelle 2003 insgesamt stärker war als die Hitzewelle 2006. Daher ist es möglich, dass auch die Gesundheitsauswirkungen der Hitzewellen 2003 stärker waren als 2006.

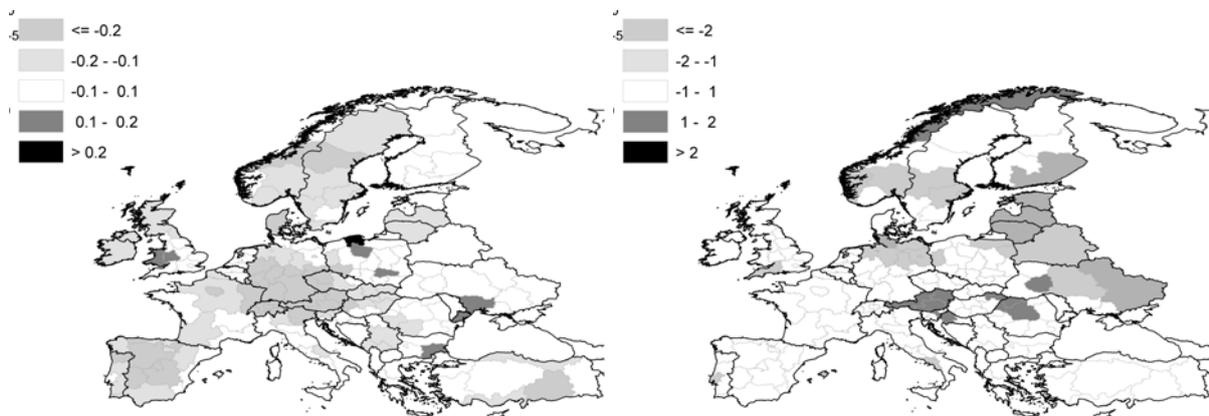


Abb. 2: Unterschiede im mittleren Gesamtbedeckungsgrad um 12 UTC (links) und den mittleren Windgeschwindigkeiten um 12 UTC (rechts) zwischen den Jahren 2003 und 2006.

Fig. 2: *Difference in the mean total cloud cover (ratio) at 12 UTC (left) and the mean wind speed (m/s) at 12 UTC (right) during the 10 hottest days between 2003 and 2006*

Es gab zwei Gebiete, die 2003 stärker von der Hitze betroffen waren als 2006: eines über Skandinavien und das andere über dem Westen Europas mit Ausnahme von England (ohne London) (Abb.1). Die Hitzewelle im Jahre 2006 hingegen war in England, den Niederlanden, den Regionen südlich der Ostsee und um das Kaspische Meer ausgeprägter. Es kann daher erwartet werden, dass in diesen Regionen auch die hitzebedingte Morbidität und Mortalität im Jahr 2006 höher war als im Jahr 2003 falls keine zusätzlichen Vorkehrungen zur Reduktion der negativen Gesundheitsauswirkungen während Hitzewellen getroffen wurden. Es sollte jedoch beachtet werden, dass in einigen dieser Regionen der relative thermische Stress durch höhere Windgeschwindigkeiten verringert wurde.

Diese Studie zeigt auch, dass die Hitzewelle in Frankreich und im Norden Spaniens 2006 schwächer war als 2003. Diese Gebiete hatten 2006 eine geringere Temperatur während der jeweils wärmsten 10-Tages-Periode und auch die Persistenz der Hitze war dort geringer. In diesen Regionen kann daher die geringere Anzahl von hitzebedingten Todesfällen (z.B.: Frankreich 2003: ~16000 und 2006: ~2000) nicht allein auf das in der Zwischenzeit eingeführte Hitzewarnsystem zurückgeführt werden. Die hier durchgeführten Auswertungen erlauben keinen Aufschluss darüber welche der beiden Hitzewellen in Südportugal und dem Südwesten Spaniens die stärkere war. Die Hitzewelle im Jahr 2003 hatte zwar eine etwas höhere Intensität dafür hatte die 2006 Hitzewelle eine längere Andauer. Um beurteilen zu können,

welcher der Faktoren für die Auswirkungen auf die Gesundheit von größerer Bedeutung ist, sind weitere Untersuchungen nötig.

Danksagung

Diese Studie wurde von der Europäischen Kommission DG SANCO im Rahmen des Euro-HEAT Projektes finanziert (Agreement No. 2004322).

Literaturverzeichnis

LARSON, J. (2003) Record heat wave in Europe takes 35 000 lives – Far greater losses may lie ahead. Washington, Earth Policy Institute. [http://www.earth-policy.org/Updates/ Update29.html](http://www.earth-policy.org/Updates/Update29.html).

ROBINSON, P.J., 2001: On the definition of a heat wave. - J Appl Meteor 40, 762–775.

STAFOGGIA, M., FORASTIERE, F., AGOSTINI, D., BIGGERI, A., BISANTI, L., CADUM, E., CARANCI, N., DE'DONATO, F., DE LISIO, S., DE MARIA, M., MICHELOZZI, P., MIGLIO, R., PANDOLFI, P., PICCIOTTO, S., ROGNONI, M., RUSSO, A., SCARNATO, C., PERUCCI, C.A., 2006: Vulnerability to Heat-Related Mortality: A Multicity, Population-Based, Case-Crossover Analysis. - Epidemiology 17(3):315-323, May 2006.

Anschrift der Autoren

Dr. Christina Koppe, Deutscher Wetterdienst – Medizin-Meteorologie, Stefan-Meier-Straße 4-6, 79104 Freiburg

Dr. Paul Becker, Deutscher Wetterdienst - Medizin-Meteorologie, Stefan-Meier-Straße 4-6, 79104 Freiburg

Stand der Entwicklung beim Universellen Thermischen Klimaindex UTCI

Gerd Jendritzky¹, George Havenith² and Richard de Dear³

¹Meteorologisches Institut, Universität Freiburg

²Environmental Ergonomics Research Centre, Loughborough University, U.K.

³Division of Environmental & Life Sciences, Macquarie University, Sydney, Australia

Zusammenfassung

Die Bewertung und Vorhersage der thermischen Umweltbedingungen des Menschen in einer physiologisch korrekten, wirkungsvollen und praktischen Weise stellt eines der wichtigsten Fragestellungen in der Human-Biometeorologie dar. Dies ergibt sich aus der Notwendigkeit, den Wärmehaushalt des Menschen den thermischen Umweltbedingungen anzupassen, um Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit zu gewährleisten. Ausgehend von der Wärmebilanz des Menschen einschließlich der thermophysiologischen Prozesse wird die Entwicklung des „Universellen thermischen Klimaindex UTCI“ im Rahmen der COST Action 730 dargestellt. Ausgewählte Anwendungen sollten die Relevanz der thermischen Bewertung im Bereich Wetter/ Klima und Gesundheit verdeutlichen.

Status of the development of the Universal Thermal Climate Index UTCI

Abstract

One of the fundamental issues in human biometeorology is the assessment and forecast of the thermal environment in a sound, effective and practical way. This is due to the need for human beings to balance their heat budget to a state very close to his/her thermal environment in order to optimise his/her comfort, performance and health. Based on the human heat budget and physiological requirements the development of the “Universal Thermal Climate Index” within COST Action 730 is described. Selected applications from the weather/ climate and human health field should make clear the significance of a thermal assessment.

1 Thermophysiologische Grundtatsachen

1.1 Die Wärmebilanz

Wärmeproduktion im Organismus und Wärmeabgabe an die Umgebung müssen, zumindest über einen längeren Zeitraum („steady state“), im Gleichgewicht stehen, um die Körperkern-temperatur auf konstantem Niveau (37°C) zu halten und damit optimale Funktionen der inneren Organe und des Gehirns zu gewährleisten. Die Temperatur der Körperschale, Haut und Extremitäten, kann dagegen in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen stark schwanken und ist eines der Mechanismen, sich an wechselnde Bedingungen anzupassen. Vom Komfort abweichende Bedingungen werden bewusst und führen so zu Anpassungen des Verhaltens, z. B. durch Veränderung des Isolationswertes der Kleidung, durch Erhöhung, bzw. Verminderung der Aktivität und ggf. durch das Aufsuchen von Schutz, wie klimatisierten Räumen. Wärme wird über den Stoffwechsel (Metabolismus = M) aufgrund der Aktivität des Menschen erzeugt, ein – häufig nur geringer – Anteil davon wird zur Erbringung mechanischer Arbeit (W) aufgewendet, z. B. beim Bergsteigen. Die überschüssige Wärme muss an die Umgebung abgegeben werden. Der Körper tauscht Wärme über die Haut durch Konvektion (sensibler Wärmefluss), Strahlung (kurz- und langwellig. sensibel), Verdunstung z. B. von Schweiß und Diffusion von Wasserdampf durch die Haut (latente Wärmeflüsse), und über die Atmung (latent and sensibel) aus. Ein weiterer Mechanismus ist Wärmeleitung (Kontakt mit festen Flächen), der in der Biometeorologie jedoch i.a. nicht berücksichtigt wird. Der Wärme-

austausch zwischen dem Körper des Menschen und seiner thermischen Umgebung kann in Form einer Energiebilanzgleichung beschrieben werden, der Anwendung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik:

$$M - W - [Q_H(Ta, v) + Q^*(Tmrt, v)] - [Q_L(e, v) + Q_{SW}(e, v)] - Q_{Re}(Ta, e) \pm S = 0 \quad \text{Gl. 1}$$

M Metabolische Rate (Gesamtaktivität)

W Mechanische Leistung (Art der Aktivität)

S Speicherung (Änderung im Wärmehalt des Körpers)

Haut:

Q_H Turbulenter Fluss sensibler Wärme

Q* Strahlungsbilanz

Q_L Turbulenter Fluss latenter Wärme (Diffusion von Wasserdampf durch die Haut)

Q_{SW} Turbulenter Fluss latenter Wärme (Verdunstung von Schweiß)

Atmung:

Q_{Re} Wärmefluss über Atmung (sensibel and latent)

Die meteorologischen Einflussgrößen sind Lufttemperatur T_a , Wasserdampfdruck e , Windgeschwindigkeit v und mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} , über die die kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse auf den Menschen bezogen werden. T_{mrt} ist, bezogen auf einen Menschen in festgelegter (hier aufrechter) Körperhaltung, gegebenen Werten von Albedo und Emissionskoeffizient der Bekleidung, definiert als diejenige einheitliche Temperatur einer schwarz strahlenden Umgebung, bei der der gleiche Strahlungsverlust bzw. -gewinn auftritt, wie unter den aktuellen Umgebungsbedingungen. Zusätzlich werden die metabolische Rate (entsprechend der Aktivität und ggf. durch Kältezittern) und die Bekleidungsisolations (Verhaltensanpassung!) benötigt. In Gl.1 sind die erforderlichen meteorologischen Variablen den relevanten Wärmeflüssen in Klammern zugeordnet, nicht jedoch die in Wechselwirkung stehenden internen (physiologischen) Variablen wie Hauttemperatur, Kerntemperatur, Schweißrate, Hautbenetzungsgrad. Zur Realisierung einer ausgeglichenen Wärmebilanz verfügt der Organismus über ein komplexes Regulationssystem, dessen zentrales steuerndes System im Hypothalamus des Gehirns lokalisiert ist.

1.2.1 Thermoregulation

Von einem mathematischen Standpunkt aus kann der Organismus des Menschen in zwei gekoppelte Thermoregulationssysteme eingeteilt werden: (1) das steuernde aktive System, das die thermophysiologischen Reaktionen wie die Verteilung des peripheren Blut- (und damit Wärme-) Flusses von unakklimatisierten Personen, die zusätzliche Wärmeproduktion durch Kältezittern und Schweißproduktion beinhaltet, und (2) das gesteuerte passive System mit den anatomischen Eigenschaften und den Wärmetransportphänomenen innerhalb des Organismus und an seiner Oberfläche (Abb. 1). Damit werden die lokalen Wärmeflüsse von den verschiedenen Oberflächensegmenten über freie und erzwungene Konvektion, langwelliger Strah-

lungsaustausch mit der Umgebung, kurzweiliger Strahlungsgewinn, Verdunstung von Wasser auf der Haut, sowie Wärme- und Massen-Transfer durch uneinheitliche Bekleidung erklärbar.

1.2.2 Thermisches Empfinden

Die Wärmebilanzgleichung bestimmt die einzelnen Energieflüsse in thermophysiological korrekter Weise, beinhaltet jedoch keine Bewertung des thermischen Empfindens. Das thermische Empfinden ist eine subjektive Bewertung der Auswirkung der

Physiologisches Modell (Passives System)

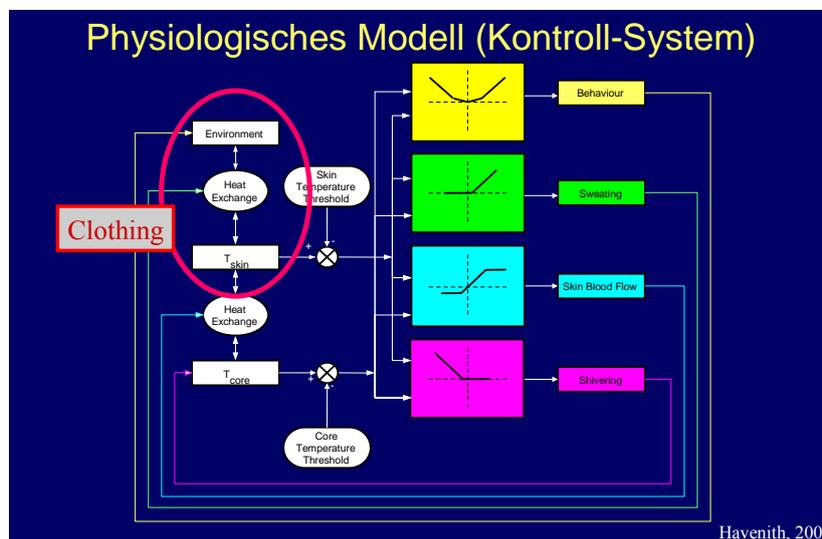
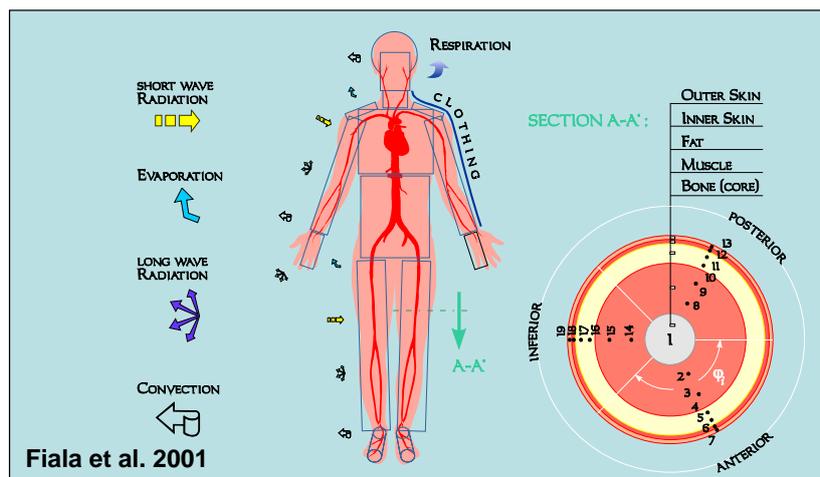


Abb. 1a,b: Schematische Darstellung eines physiologischen Modells der Thermoregulation des Menschen (Fiala et al. 2001, Havenith, 2001). (a) das steuernde System, (b) das passive System.

Fig. 1a,b: Schematic presentation of a physiological model of human thermoregulation (Fiala et al. 2001, Havenith 2001). (a) Control system, (b) passive system.

Umgebungsbedingungen in Hinsicht auf den Zustand von Komfort oder Art und Stärke von Diskomfort. Diskomfort wird bewusst und provoziert Verhaltensanpassungen mit dem Ziel, thermischen Komfort wieder herzustellen. Aufgrund des unterschiedlichen Metabolismus (hier der Grundumsatz) kann das thermische Empfinden außerhalb des Komforts in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht variieren. Das thermische Empfinden ist ein Integral des thermischen Zustandes der einzelnen Körperabschnitte. Asymmetrische Strahlungsverteilung, Zug, warme oder kalte Böden sowie vertikale Temperaturgradienten können das thermische Empfinden zusätzlich beeinflussen.

2 Wärmebilanzmodelle

Die mathematische Modellierung des Wärmeaustausches des Menschen mit seiner Umgebung begann vor etwa 70 Jahren (BÜTTNER, 1938). In den letzten 4 Dekaden wurden dann detailliertere Modelle entwickelt, die sich spannen über Modelle für Komfort und „steady state“ (FANGER, 1970), zu Modellen des Gesamtkörpers, die den thermophysologisch geregelten Wärmeübergang vom Körperkern zur Haut und von der Haut durch die Kleidung zur Atmosphäre (2-Segment-Modelle) für den instationären Zustand, d.h. in der zeitlichen Entwicklung (GAGGE et al., 1986; BLAZEJCZYK, 1994; PICKUP und DE DEAR 2000; DE DEAR und PICKUP 2000; MALCHAIRE et al., 2001) oder den „steady state“ beschreiben (STEADMAN 1984 und 1994; HÖPPE 1984 und 1999, HORIKOSHI et al. 1995 und 1997) oder für ausgewählte Körperareale ausgelegt sind, wie für den Fuß (LOTENS et al., 1989) oder für Erfrierungen im Gesicht die Wind-Chill-Temperatur (TIKUISIS und OSCZEWSKI 2002, 2003; SHITZER, 2006), (Abb. 3). Multi-Segment-Modellen der menschlichen Thermoregulation beschreiben die Wärmeflüsse für den Körper in einer Auflösung bis zu 340 Segmenten (STOLWIJK 1971; KONZ et al. 1977; WISSLER 1985; FIALA et al. 1999, 2001, HUIZENGA et al. 2001; TANABE et al., 2002).

In den letzten Jahren hat es wesentliche Fortschritte in der Modellierung des dynamischen Verhaltens der Wärmeregulation des Organismus (einschließlich Schwitzen und Kältezittern) über einen weiten Bereich vorkommender thermischer Bedingungen mit Hilfe von Multi-Segment-Modellen gegeben, die dreidimensional den Wärmetransport innerhalb des Körpers und an seiner Oberfläche simulieren. Die Wärmeabgabe von Teilen der Körperoberfläche wird unter Berücksichtigung der inhomogenen Verteilung von Hauttemperatur und thermophysio-physiologischer Reaktion über die Oberfläche des Organismus modelliert. Multi-Segment-Modelle sind damit in der Lage, nicht nur die integralen Werte der physiologischen Variablen zu berechnen, sondern auch deren lokale Ausprägungen, z.B. der Hauttemperatur beim der Kälte exponierten Gesicht. Validierungsstudien haben gezeigt, dass die neuesten Multi-Segment-Modelle über einen weiten Bereich vorkommender thermischer Bedingungen das dynamische Verhalten der Wärmeregulation (einschließlich Schwitzen und Kältezittern) gut reproduzieren (FIALA et al. 2001, 2003; HUIZENGA et al. 2001). Z. B. ist das passive System des IESD-Fiala Modells (FIALA et al. 1999, 2001) eine multi-segmentale, mehrschichtige Darstellung des menschlichen Körpers. Jedem der inzwischen 340 Untergliederungen werden geeignete physikalische und thermophysio-physiologische Eigenschaften zugeordnet. Die Daten beziehen sich bzgl. Gewicht, Fettanteil und Oberfläche auf eine Durchschnittsperson. Die physiologischen Daten ergeben den basalen Wärmeeinfall und die basale Herzleistung für einen aufrechtstehenden Erwachsenen in thermisch neutraler Umgebung von $T_a = 30\text{ °C}$. Verifikations- und Validierungsarbeiten im Rahmen der COST Action 730 durch Vergleich von Daten aus unabhängigen Experimenten mit Expositionen gegenüber Kältestress, Kühle, Behaglichkeit, Wärme, Wärmebelastung sowie Aktivitäten unterschiedlicher Intensität ergaben in einem weiten Bereich gute Übereinstimmungen mit Messdaten zu physiologischen Reaktionen, mittleren und lokalen Hauttemperaturen und weiteren physiologischen Reaktionen.

3 Der Universelle Thermische Klimaindex UTCI

Die Entwicklung des “Universellen Thermischen Klimaindex UTCI (Arbeitstitel)” innerhalb einer ISB Kommission und seit 2005 verstärkt durch eine COST Action 730 der Europäischen Forschungsgemeinschaft ESF nutzt diese neuen Möglichkeiten der Modellierung (www.utci.org). Ziel ist ein internationaler Bewertungsstandard für die thermischen Umweltbedingungen. Die Entwicklung läuft unter dem Dach von WMO-CCI.

Der Universelle Thermische Klima-Index UTCI (Arbeitstitel) muss folgenden Anforderungen genügen:

- 1) Thermophysiologisch relevant im gesamten Bereich des Wärmeaustausches
- 2) Anwendbar für Betrachtungen des Gesamtorganismus wie für lokale Abkühlungen (Erfrierungen)
- 3) Gültig in allen Klimaten, Jahreszeiten, und Skalen
- 4) Einsetzbar in den Kernanwendungen in der Humanbiometeorologie

Anwender aus den folgenden Bereichen werden insbesondere angesprochen:

- 1) Wetterdienste (Vorhersagen). Warnungen vor extremer thermischer Belastung, die Teil eines integrierten HHWS darstellen. Information und Beratung der Bevölkerung der Bevölkerung für Freizeitaktivitäten, Verhalten, Klimatherapie.
- 2) Öffentliches Gesundheitswesen. Zwecks Verminderung nachteiliger Gesundheitseffekte durch extreme Wetterereignisse (hier Hitzewellen und Kältewellen) sind Notfallpläne mit geeigneten Interventionsmaßnahmen zu entwickeln, die bei Warnungen aktiv werden.
- 3) Vorsorgeplanung. UTCI Bewertungen liefern die Basis für einen weiten Bereich öffentlicher und privater Vorsorgeplanung, wie Stadt- und Regionalplanung, im Tourismus, für Klimawirkungsforschung. Die langsam zunehmende Nutzbarkeit von monatlichen und saisonalen Vorhersagen wird auch für eine UTCI Anwendung interessant.
- 4) Klimawirkungsforschung im Bereich der Gesundheit. Das zunehmende Erkenntnis einer Klimaänderung und der damit zusammenhängenden Auswirkungen auf die Gesundheit erfordert ursache-wirkungsbezogene epidemiologische Untersuchungen. UTCI ist hier das geeignete Bewertungsmodell. Dies gilt auch für die Bewertung der Ergebnisse von Klimaänderungsszenarien incl. Down-Scaling im Hinblick auf die Gesundheit des Menschen.

4 Schlussfolgerungen

Die Experten der AG "Thermophysiological Modellierung" der COST Action 730 haben aufgrund von Modellvergleichen mittlerweile festgelegt, das UTCI Verfahren auf dem 340 Segmente umfassenden Modell von Fiala zu gründen, welches dazu in Gemeinschaftsarbeit unter zu Hilfenahme bisher nicht genutzter Daten aus unabhängigen Experimenten substantiell weiterentwickelt wird, um valide die „Wahrheit“ zu beschreiben. Aus praktischen Gründen wird das äußerst komplexe Fiala-Modell nicht explizit auf Routinebasis angewendet werden können. Deshalb wird das zukünftige UTCI Verfahren aus einem vereinfachten Modell bestehen, das an das Fiala-Modell angeeicht ist und das für alle denkbaren Kombinationen von Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte, mittlerer Strahlungstemperatur und Bekleidung die für die Anwendung relevanten Informationen mit hinreichender Genauigkeit und akzeptablem Rechenzeitverhalten liefert.

UTCI wird nach Beschluß von WMO-CCI 2009 in einer WMO Richtlinie „The Assessment of the Thermal Environment of Human Beings“ mit Anwendungsbeispielen aus den Bereichen Vorhersage und Warnungen, öffentlicher Gesundheitsbereich, Vorsorgeplanung und Klimawirkungsforschung im Bereich der Gesundheit sowie Lösungen für den Umgang mit den unterschiedlichen meteorologischen Datengrundlagen frei verfügbar gemacht. Dann kann jeder, der sich mit humanbiometeorologischen Bewertungen befasst, wie insbesondere Wetterdienste, aber auch Universitäten, Einrichtungen des öffentlichen Gesundheitswesens, Epidemiologen, Umweltagenturen, städtische Behörden, Planer etc. für seine spezifischen Zwecke ein Verfahren anwenden, das dem Stand der Wissenschaft entspricht. Die WMO Richtlinie soll neben den zahlreichen Anwendungsbeispielen auch Lösungen für den Umgang mit den unterschiedlichen meteorologischen Datengrundlagen enthalten.

Literaturverzeichnis

- COST UTCI, 2004: Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for Assessing the Thermal Environment of the Human Being. MoU of COST Action 730. www.utci.org, pp. 17.
- DE DEAR, R.J., BRAGER, G.S., 2002: Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55 - Energy Bldgs **34**, 549-561.
- FANGER, P.O. (1970) Thermal Comfort, Analysis and Application in Environmental Engineering. - Danish Technical Press, Copenhagen.
- FIALA, D., LOMAS, K.J., STOHRER, M., 1999: A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: The passive system. - Journal of Applied Physiology **87**, 1957-1972.
- FIALA, D., LOMAS, K.J., STOHRER, M., 2001: Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. - Int. J. Biometeorol. **45**, 143-159.
- GAGGE, A.P., FOBELETS, A.P., BERGLUND, P.E., 1986: A standard predictive index of human response to the thermal environment. - ASHRAE Trans. **92**, 709-731.
- HÖPPE, P., 1999: The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. - Int. J. Biometeorol. **43**, 71-75.
- JENDRITZKY, G., SÖNNING, W., SWANTES, H.J., 1979: Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt- und Landschaftsplanung ("Klima-

Michel-Modell"). - Beiträge d. Akad. f. Raumforschung und Landesplanung, 28, Hannover.

KOPPE, C., JENDRITZKY, G., 2005: Inclusion of short-term adaptation to thermal stresses in a heat load warning procedure. - Meteorol. Z. **14**: 271-278.

PARSONS, K.C., 2003: Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance. – Taylor & Francis, London, New York, pp. 527.

WMO, 2004: Proceedings of the Meeting of Experts to Develop Guidelines on Heat/Health Warning Systems. - WCASP- No. **63**, WMO-TD No. 1212.

Anschrift der Autoren

Prof. Dr. Gerd Jendritzky, Meteorologisches Institut, Universität Freiburg, Werderring 10, 79085 Freiburg

Prof. Dr. George Havenith, Environmental Ergonomics Research Centre, Loughborough University, U.K.

Prof. Dr. Richard de Dear, Division of Environmental & Life Sciences, Macquarie University, Sydney, Australia

Die thermischen Umgebungsbedingungen des Menschen auf der globalen Skala

Birger Tinz¹ und Gerd Jendritzky²

¹Deutscher Wetterdienst Hamburg, ²Meteorologisches Institut der Universität Freiburg

Zusammenfassung

Die thermophysiological relevante Bewertung der thermischen Umgebungsbedingungen erfolgt hier mit dem Klima-Michel-Modell über die Gefüllte Temperatur, wobei mit dem HeRATE-Ansatz die kurzfristige Adaptation an die vergangene Witterung berücksichtigt wird.

Die Weltkarten basieren auf zwei Zeitscheibenexperimenten vom Klimamodell ECHAM4/T106. Im Referenzzeitraum 1971-1980 (Kontrolllauf) tritt thermischer Komfort am häufigsten in den maritim beeinflussten mittleren Breiten auf. Die Häufigkeit der Tage mit mindestens leichtem Kältestress beziehungsweise leichter Wärmebelastung zeigt eine zonal angeordnete Struktur mit fast ausschließlichem Kältestress auf den Eisschilden der Antarktis und von Grönland sowie andauernder Wärmebelastung in den feuchten Tropen. Die Differenz der Zeitscheiben 2041-50 (Klimaänderungsexperiment IS92a) und 1971-80 zeigt erwartungsgemäß eine Abnahme von Kältestress und eine korrespondierende Zunahme der Wärmebelastung, während bei der Zahl der Tage mit thermischer Behaglichkeit regional unterschiedliche Trends ersichtlich werden.

Die Beziehungen der Analyseergebnisse zu den bisherigen Vorstellungen über die Vulnerabilität von Bevölkerungen werden diskutiert.

Thermal environment of the human being in the global scale

Abstract

The thermo physiologically relevant assessment of climate data is based on HeRATE (Health Related Assessment of the Thermal Environment) which combines a heat budget model of the human being (Klima-Michel-model with the outcome Perceived Temperature PT) with an approach that considers short-term adaptation.

The global bioclimate maps are based on the results of climate simulation models with coupled AOGCMs. Here the time-slice experiment with ECHAM4 in T106-resolution (ca. 100 km in middle latitudes) has been used. Comfortable conditions mainly occur in the maritime influenced middle latitudes. The frequency of at least slight cold stress or slight heat load, respectively, shows a zonal pattern with almost permanent cold stress in Antarctica and Greenland and permanent heat load in the humid tropics. The comparison of the global maps 1971 – 1980 (control run, assumed as status-quo) and future climate 2041 – 2050 for “business-as-usual” shows, as expected, basically a clear decrease in cold stress and a corresponding increase in heat load while in the change of thermal comfort conditions different trend are obvious.

In particular the climate change scenario makes clear in which areas the need for adaptation is pronounced albeit the confidence in climate change simulations is still small in particular on a regional scale.

1 Einleitung

Für verschiedene Anwendungen in der Human-Biometeorologie wie Vorsorgeplanung, Tourismus und Klimafolgenforschung ist die räumliche Darstellung der thermischen Umgebungsbedingungen des Menschen in Form von Bioklimakarten ein anschauliches Hilfsmittel.

Die betrachtete Skala, Auflösung und Inhalt solcher Karten hängt von der speziellen Problemstellung ab. Für Europa wurden von TINZ und JENDRITZKY (2005) Karten der thermischen Umgebungsbedingungen des Menschen auf der Basis von Beobachtungen von Wetterstation vorgestellt. Diese enthalten die Anzahl der Tage pro Jahr mit Kältereiz, thermischer Behaglichkeit und Wärmebelastung. Entsprechende Karten im globalen Maßstab fehlen bisher; sie werden hier erstmals gezeigt. Damit ergibt sich die Möglichkeit eines direkten Vergleichs der Europa- mit den Weltkarten.

2 Daten und Methoden

Für die Untersuchungen wurden zwei Zeitscheibenexperimente des globalen Klimamodells ECHAM4 (ROECKNER et al. 1996) in der relativ hohen Auflösung T106 (etwa 100 km Gitterpunktabstand in den mittleren Breiten) verwendet. Die Klimamodelldaten sind zu den Terminen 00, 06, 12 und 18 UTC verfügbar.

Im ersten Experiment (Kontrolllauf) entspricht die Konzentration der Treibhausgase dem beobachteten Niveau von 1971-80. Es kann als Abschätzung des bisherigen Klimas angesehen werden. In einem zweiten Experiment Konzentration erhöht sich die Treibhausgaskonzentration gemäß dem IPCC-Szenario IS92a auf die entsprechenden Werte von 2041-50 (s. KATTENBERG et al., 1996). Diese Zeitscheibe repräsentiert die Situation im Falle des erwarteten anthropogenen Klimawandels. Die Differenz zwischen den beiden Zeitscheiben kann als Klimaänderungssignal interpretiert werden.

Für die physiologisch relevante Bewertung der für den Wärmehaushalt des Menschen bedeutsamen meteorologischen Variablen Lufttemperatur T_a , Wasserdampfdruck e , Windgeschwindigkeit v und mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} wird das Klima-Michel-Modell (JENDRITZKY et al., 1990) mit der Gefühlten Temperatur GT als beschreibender Größe eingesetzt. Durch den Ansatz HeRATE (Health Related Assessment of the Thermal Environment) (KOPPE und JENDRITZKY, 2005) kann zusätzlich Akklimatisation und kurzfristige verhaltensgesteuerte Anpassung quantitativ berücksichtigt werden, d.h. die verbesserte Tolerierbarkeit einer meteorologischen Umgebung, die man nicht frei wählen kann. HeRATE modifiziert die festen GT Schwellenwerte für die unterschiedlichen Belastungsintensitäten durch die (relativen) Erfahrungen der Bevölkerung mit den thermischen Bedingungen (GT) der vergangenen Wochen. Damit ist das Klima-Michel-Modell in der letzten Version in der Lage — ohne künstliche Festlegungen von Jahreszeiten oder Kalibrierung an das Klima von bestimmten Orten — in unterschiedlichen Klimaregionen und zu unterschiedlichen Jahreszeiten mit entsprechend angepassten Schwellenwerten eingesetzt zu werden.

Für eine direkte Vergleichbarkeit der Werte untereinander (unterschiedlicher Sonnenstand zu festen UTC-Zeiten) wurden die Daten der Gefühlten Temperatur von 00, 06, 12 und 18 UTC mit Hilfe eines multiplen quadratischen Interpolationsverfahrens auf 12:00 Uhr mittlere Ortszeit (MOZ) umgerechnet. Nach der Simulation der kurzfristigen Adaptation mittels des HeRATE-Ansatzes konnte für jeden Gitterpunkt und Tag die thermische Klasse bestimmt werden. Abweichungen vom thermischen Komfort werden als Kältereiz oder Wärmebelastung (jeweils leicht, mäßig, stark oder extrem) bezeichnet.

3 Thermische Behaglichkeit im globalen Maßstab

3.1 Kontrolllauf

Für den Kontrolllauf ergibt sich ein mosaikartiges Muster der Anzahl der Tage mit thermischem Komfort. Während diese thermische Klasse in den Bereichen der großen Eisschilde der Antarktis und Grönlands sowie in den feuchten Tropen praktisch nicht besetzt ist, liegt das Maximum im Bereich der ozeanisch beeinflussten gemäßigten Gebiete. In großen Teilen von Großbritannien, Tasmanien und Neuseeland kann an etwa 330 Tagen mit thermischem Komfort gerechnet werden. Dies entspricht den Erfahrungen mit der Europakarte, wo die Station Malin Head (Insel nördlich von Irland) als europäischer Spitzenreiter einen Beobachtungswert von 346 Tagen hat (TINZ und JENDRITZKY, 2007). Weitere Gebiete mit einer hohen Anzahl von Tagen mit Behaglichkeit sind Teile Argentiniens und Chiles, Kaliforniens sowie die unteren Bereiche des Himalajas. Dieses entspricht nach der bekannten effektiven Klimaklassifikation nach KÖPPEN-GEIGER (z.B. in GEIGER, 1954; Neuberechnung von KOTTEK et al., 2006) dem warmgemäßigten immerfeuchten Regenklima mit einer Mitteltemperatur des wärmsten Monats zwischen 10 und 22 °C (Cfb). Auf der Nordhalbkugel nimmt die Anzahl der thermisch behaglichen Tage in den gemäßigten Breiten mit zunehmender Kontinentalität nach Osten in recht schnell ab.

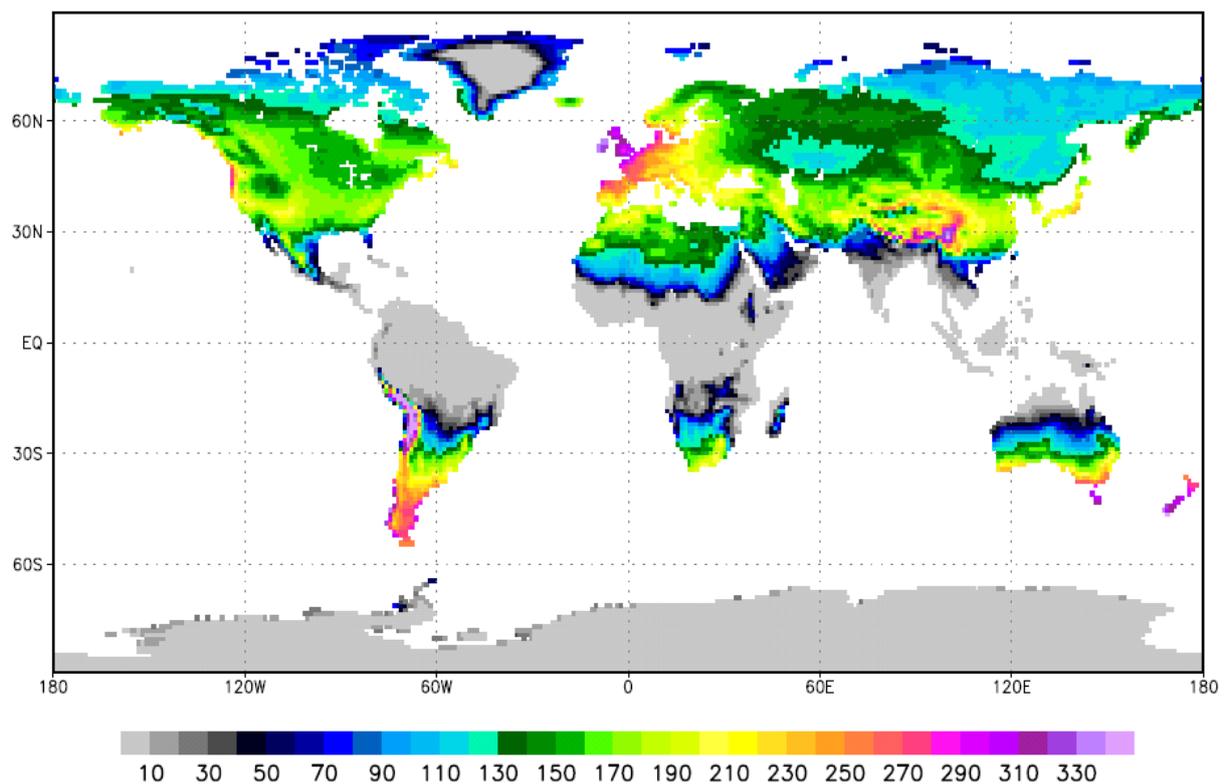


Abb. 1: Anzahl der Tage pro Jahr mit thermischem Komfort gemäß dem HeRATE-Ansatz auf der Basis von ECHAM4/T106-Daten (Deutsches Klimarechenzentrum Hamburg) 1971/80

Fig. 1: Number of days per annum with comfortable conditions according to acclimation approach HeRATE based on ECHAM4/T106-data (Deutsches Klimarechenzentrum Hamburg) 1971/80

Beim Kältestress sowie bei der Wärmebelastung zeigt sich jeweils eine zonal angeordnete Struktur der Häufigkeit des Auftretens. Kältestress ist der ausschließliche thermische Zustand auf den Eisschilden von Grönland und der Antarktis. Dies deckt sich nach der Köppen-Geiger-Klimaklassifikation mit dem EF-Klima (ewiger Frost). Auf der Nordhalbkugel schließt sich in Richtung niedriger Breiten breitenkreisparalleles Muster an, wobei mit zunehmender Kontinentalität der Kältestress weiter nach Süden ausgereift. Auf der Südhalbkugel kann dies auf Grund der Land-Meerverteilung nur teilweise in den südlichen Bereichen von Südamerika beobachtet werden.

Wärmebelastung tritt in den feuchten Tropen nahezu ausschließlich auf (Abb. 2). Gemäß der KÖPPEN-GEIGER-Klimaklassifikation entspricht das den tropischen Regenklimate Af, Am, As und Aw. Zu höheren Breiten hin nimmt die Häufigkeit recht schnell ab. Das gilt für größere Gebirge ebenfalls mit zunehmender Höhenlage, wobei angemerkt werden muss das auch in der recht hohen Auflösung T106 die höheren Lagen der Gebirge in der Modellorographie nicht hinreichend dargestellt sind.

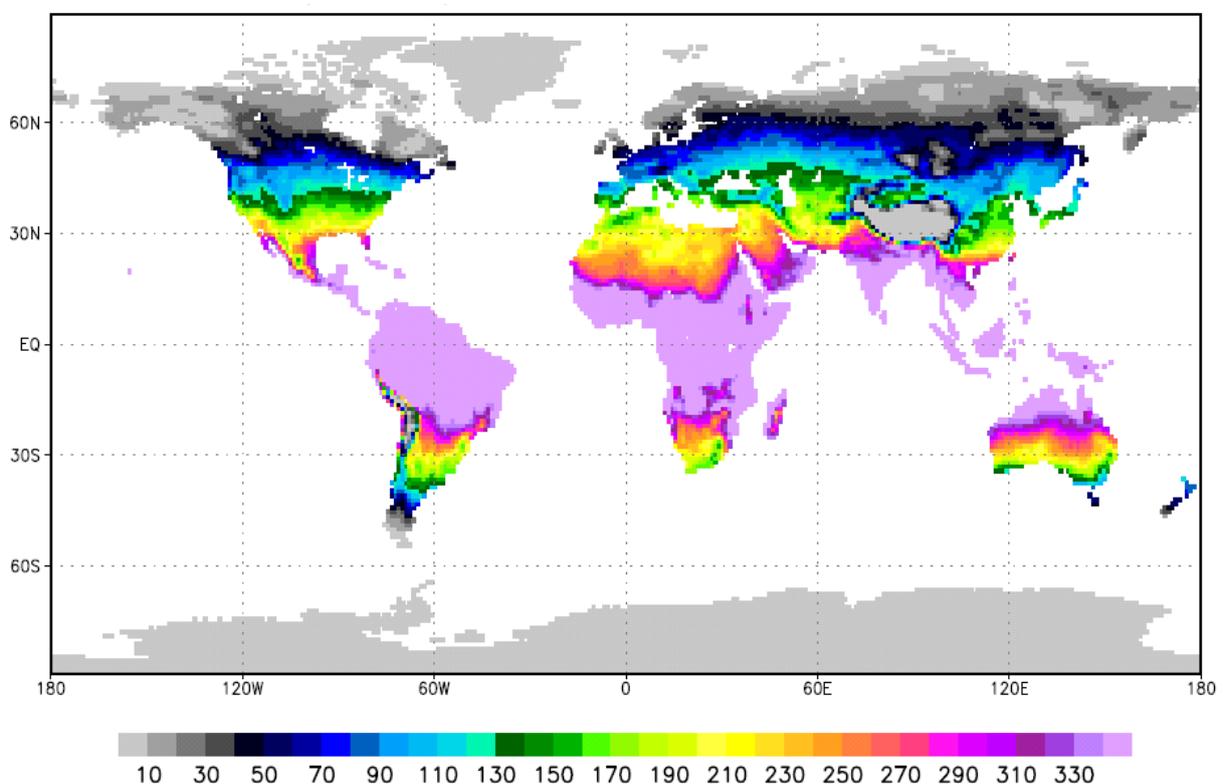


Abb. 2: Anzahl der Tage pro Jahr mit Wärmebelastung gemäß dem HeRATE-Ansatz auf der Basis von ECHAM4/T106-Daten (Deutsches Klimarechenzentrum Hamburg) 1971/80

Fig. 2: Number of days per annum with heat load according to acclimation approach HeRATE based on ECHAM4/T106-data (Deutsches Klimarechenzentrum Hamburg) 1971/80

3.2 Klimaänderung

Die im Kapitel 3.1 beschriebene Grundstruktur der globalen Verteilung der thermischen Bedingungen bleibt auch im Treibhausgasszenario IS92a erhalten. Allgemein ergibt sich erwar-

tungsgemäß eine Zunahme der Wärmebelastung, die auf Kosten des Kältereizes erfolgt, während beim thermischen Komfort kein einheitliches Trendverhalten erkennbar ist.

Thermischer Komfort tritt in großen Gebieten von Nordwestamerika, Grönland, Nord- und Osteuropa, Nordrussland sowie Feuerland an 20 bis 35 Tagen häufiger auf. Wenig Änderung gibt es in den feuchten Tropen sowie in der Antarktis. Eine deutliche Abnahme um etwa 30 Tage ergibt sich in Teilen der Subtropen, wie im Mittelmeergebiet.

Bei der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung ergeben sich fast nur positive Abweichungen (Abb. 3). In den feuchten Tropen ist kaum eine Zunahme zu erkennen, da hier bereits das mögliche Maximum erreicht ist. Eine detaillierte Untersuchung zeigt, dass sich in diesen Gebieten die Häufigkeit der starken und extremen Wärmebelastung deutlich erhöht. Demgegenüber kommt es in den trockenen Tropen und in den gemäßigten Gebieten zu einer deutlichen Zunahme der Wärmebelastung von 20 bis 40 Tagen, wobei 40 Tage große Teile Süd- West- und Mitteleuropa betreffen.

Der Kältestress tritt in den gemäßigten und subpolaren Gebieten deutlich seltener auf, der stärkste Rückgang findet im südlichen Ostseeraum und Teilen des Himalajas und der Rocky Mountains mit etwa 30 Tagen statt, während sich an der Antarktischen Halbinsel sogar eine Zunahme von bis zu 10 Tagen ergibt.

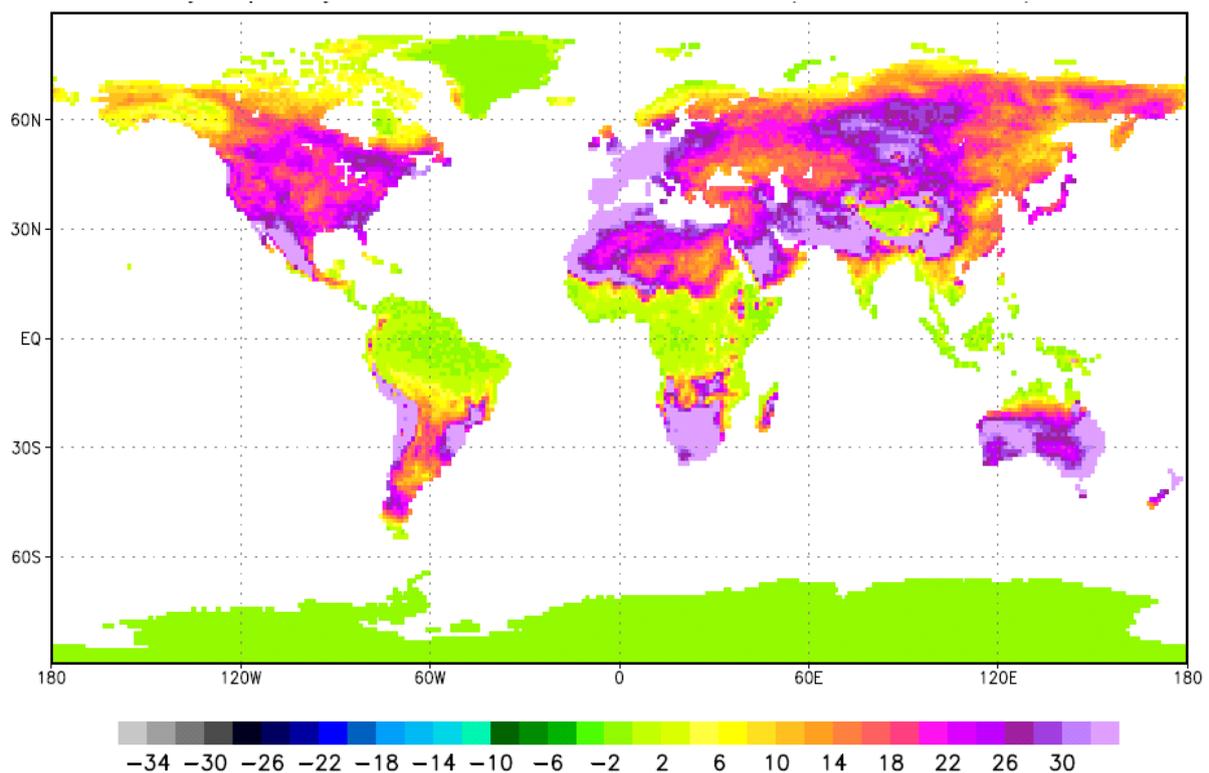


Abb. 3: Änderung der Anzahl der Tage pro Jahr mit mindestens schwacher Wärmebelastung gemäß dem HeRATE-Ansatz auf der Basis von ECHAM4/T106-Daten (Deutsches Klimarechenzentrum Hamburg) 2041/50 - 1971/80

Fig. 3: Change in number of days with heat load according to acclimation approach HeRATE based on ECHAM4/T106-data (Deutsches Klimarechenzentrum Hamburg) 2041/50-1971/1980

4 Schlussfolgerungen

Die vorgestellten ersten Ergebnisse bestätigen die deutlichen Veränderungen der thermischen Umweltbedingungen des Menschen durch den Klimawandel weltweit. Eingedenk des dramatischen Anstiegs der Hitzetoten im Sommer 2003 in Europa muss deshalb insbesondere in den jetzt noch sog. gemäßigten Klimaten von extremen Gesundheitsbelastungen ausgegangen werden, worauf im Sinne der Vorsorge mit geeigneten Anpassungsmassnahmen (Hitzewarnsysteme, Stadtplanung) reagiert werden muss.

Literatur

- GEIGER, R., 1954: Landolt-Börnstein – Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik, alte Serie Vol. 3, Ch. Klassifikation der Klimate nach W. Köppen. --Springer, Berlin, 603–607.
- JENDRITZKY, G., 1990: Bioklimatische Bewertungsgrundlage der Räume am Beispiel von mesoskaligen Bioklimakarten. In: JENDRITZKY, G., SCHIRMER, H., MENZ G, SCHMIDT-KESSEN W: Methode zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). Akad. f. Raumforschung u. Landesplanung, Hannover, Beiträge 114:7–69
- KATTENBERG, A., GIORGI, F., GRASSL, H., MEEHL, G.A., MITCHELL, J.F.B., STOUFFER, R.J., TOKIOKA, T., WEAVER, A.J., WIGLEY, T.M.L., 1996: Climate models–projections of future climate. – In: HOUGHTON, J.T., MEIRAFILHO, L.G., CALLANDER, B.A., HARRIS, N., KATTENBERG, A., MASKELL, K., (eds): Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Cambridge University Press, New York, pp. 285–357
- KOPPE, C., JENDRITZKY, G., 2005: Inclusion of short-term adaptation to thermal stresses in a heat load warning procedure. - Meteorol. Z. **14**, 271-278
- KOTTEK, M., GRIESER, J., BECK, C., RUDOLF, B., RUBEL, F., 2006: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. - Meteorologische Zeitschrift **15**, 259-263
- ROECKNER, E., ARPE, K., BENGTTSSON, L., CHRISTOPH, M., CLAUSSEN, M., DÜMENIL, L., ESCH, M., GIORGETTA, M., SCHLESE, U., SCHULZWEIDA, U., 1996: The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate. - Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report **218**, 90 pp.
- TINZ, B., JENDRITZKY, G., 2005: Macro- and mesoscale maps of the thermal environment. - Annalen der Meteorologie 41, Vol. 2, 17th International Congress of Biometeorology, 641-643
- TINZ, B., JENDRITZKY, G., 2007: Meso- and Macro-Scale Maps of the Thermal Environment of the Human Being. - Climate Research, in prep.

Anschrift der Autoren

Dr. Birger Tinz, DWD, Bernhard-Nocht-Str. 76, 20359 Hamburg

Prof. Dr. Gerd Jendritzky, Met. Inst., Universität Freiburg, Werderring 10, 79085 Freiburg

Bioclimate and Mortality in Vienna

Ernest Rudel¹, Andreas Matzarakis² and Elisabeth Koch¹

¹Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna

²Meteorological Institute, University of Freiburg

Abstract

In order to find a relationship between meteorological and biometeorological factors on one hand and mortality in Vienna on the other hand this paper presents statistically correlations between them. The meteorological (daily minimum air temperature) and biometeorological (physiological equivalent temperature = PET) conditions are analysed and statistically correlated with the mortality values. Furthermore based on Gaussian filters the minimum air temperature and the PET at noon have been used to analyse the inter-annual variability of thermal comfort and heat stress. The analysis shows that the combination of minimum air temperature and maximum PET during the day can explain and quantify the relationship between human-biometeorological conditions and health implications accurately.

Bioklima und Sterblichkeit in Wien

Zusammenfassung

Die Arbeit untersucht die Beziehungen zwischen meteorologischen und biometeorologischen Faktoren und der Mortalität in Wien.. Auf der Grundlage vom Tagesminimum der Lufttemperatur und den human-biometeorologischen Index (PET= Physiologisch Äquivalente Temperatur) werden die Mortalitätsdaten analysiert und statistisch korreliert. Zusätzlich werden die Daten von Tagesminimum der Lufttemperatur und PET für die Mittagsbedingungen einen Gaussfilter für die Analyse und Bestimmung einer interannualen Variabilität des thermischen Komforts und Hitze Stress, unterzogen. Aus der Kombination von Tagesminimum der Lufttemperatur und die PET-Bedingungen während der Mittagszeit können die Wechselbeziehungen zwischen den Human-biometeorologischen Bedingungen und Gesundheitsimplikationen erklärt werden.

1 Introduction

Extreme meteorological conditions like e.g. heat waves can affect human health leading to an increase of mortality (ROBINSON, 2001). To quantify the impact of heat waves on humans not one single factors like air temperature is important but synergetic effects of several meteorological, atmospheric and other parameters (KOPPE, 2004; MATZARAKIS et al., 1999; VDI, 1998). The PET (Physiologically Equivalent Temperature) allows the assessment of the effect of the thermal environment based on the energy balance of humans including thermo-physiological information (MATZARAKIS and MAYER, 1991, 1997; MATZARAKIS, 2006). The extreme heat waves of the summer 2003, with the high implications of human health showed that there is a need of explanation of the relationship between the atmospheric conditions and human health (RUDEL et al., 2005; KOCH et al., 2005, 2006).

2 Method

The analysis is based on daily meteorological data of air temperature, relative humidity, wind velocity and mean cloud cover as the necessary inputs for Physiologically Equivalent Temperature and mortality data of the area of Vienna for the period 1996-2005. Additionally the minimum temperature of each day of the period has been included in the analysis

In order to quantify the short time or inter annual adaptation of humans to the thermal component of the climate, the following analysis was carried out. A two fold Gaussian filter of 41 days, which corresponds to a filter of 81 days was applied. This one side filter has 30 significant filter weights (SCHÖNWIESE, 1992), which is in accordance of a time frame, where physiological changes are still active concerning the heat effect on humans. The 41 days filter represent the variable part (short time adaptation) the daily PET and daily Tamin values have been applied. The PET values represent the upper limit of the thermal perception and the daily minimum temperature the lower limit. The adapted values PET_a and Tamin have been calculated using the following formula.

$$PET_a = \text{limit} + (\text{PET}_{\text{gauss}} - \text{limit}) * 1/3 \text{ with limit of PET}=30 \text{ }^\circ\text{C and PET}=35 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$Tamina = \text{limit} + (\text{Tamingauss} - \text{limit}) * 1/3 \text{ with limit of Tamin}=18 \text{ }^\circ\text{C and Tamin} = 20 \text{ }^\circ\text{C.}$$

where, PET_a is the PET value with short time adaptation, PET_{gauss} is the PET with Gaussian filter and limit is the upper of the PET limit. Tamin is the Tamin value with short time adaptation, Tamingauss the Tamin with Gaussian filter and limit the upper of the Tamin limit.

The formula expresses the constant part of thermal stress and a variable part which represents the short time thermal adaptation

3 Results

Figure 1 illustrates the variability of the daily PET values, the Gaussian filtered PET-values PET_{gauss}, the PET for a limit of 35 °C (PET30) and 35 °C (PET35), for 1996 to 2005 in Vienna. The courses of PET30 and PET35 showed that there is a pattern, which describes the variability of the thermal adaptation. It can also be described as a memory of thermal perception or heat stress of humans.

Besides, the inter annual variability of the daily T_{amin} values, the Gaussian filtered T_{amin}-values Tamingauss, the Tamin for a limit of 20 °C (Tamin20) and 18 °C (Tamin18) for 1996 to 2005 in Vienna are presented in Figure 2. The courses of Tamin20 and Tamin18 are similar to those of PET30 and Heatwave35 of Figure 1.

In Figure 3 the variability of the values of PET for 14 CET and Tamin and the amount of deaths caused by cardiovascular diseases (with a ten day sum) is illustrated. Respectively, in Figure 4 are illustrated the mortality data again with the by Gaussian filtered data of PET for the limit value of 35 °C and for Tamin of 20 °C.

From the mortality data it can be extracted that during the summer period (May to September), during days with thermal load, the values of mortality are varying from 37 to 48 % of the annual mortality. The female mortality is all the year higher and during the summer again higher (up to 2 %). Looking on Fig. 3 and 4 in a first view the data of mortality and bioclimate, seem to be not directly correlated.. Even the extreme hot summer 2003 does not illustrate a relation between heat load and mortality. The pictures changes if one analyses the data based only the days over the threshold of Tamin>18 and PET > 35 °C and the mortality of these days or episodes (Table 1).

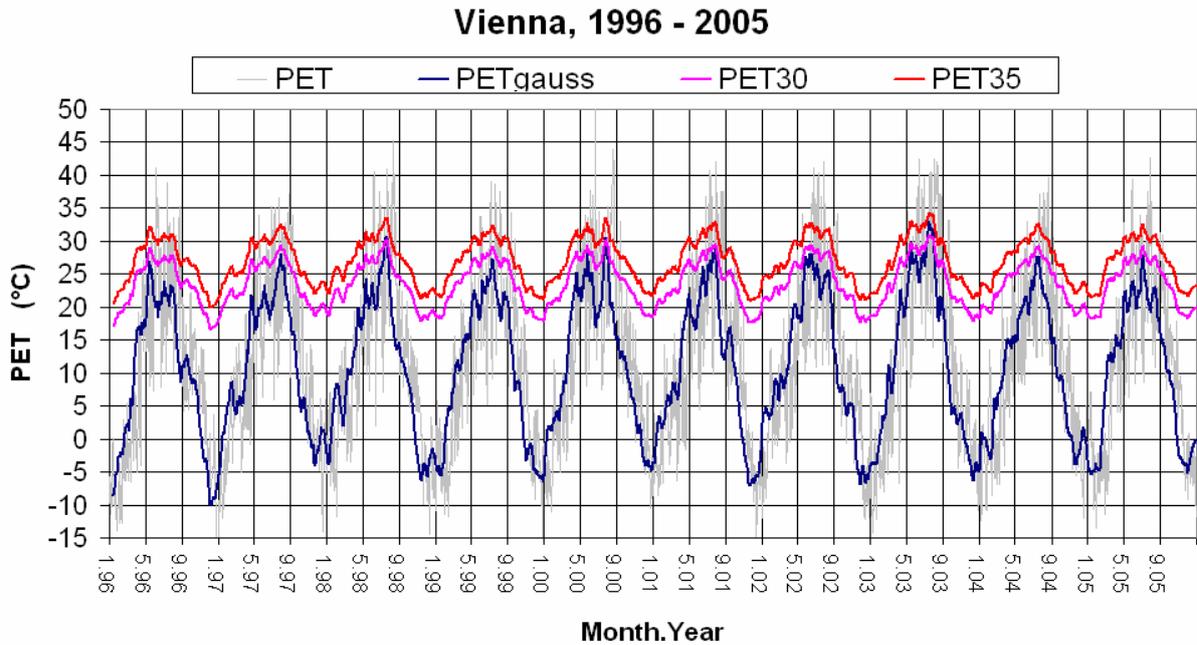


Fig. 1: Temporal development of PET, PETgauss, PET30 and PET35 in Vienna for the period 1996-2005

Abb. 1: Zeitliche Entwicklung von PET, PETgauss, PET30 and PET35 in Wien für den Zeitraum 1996-2005

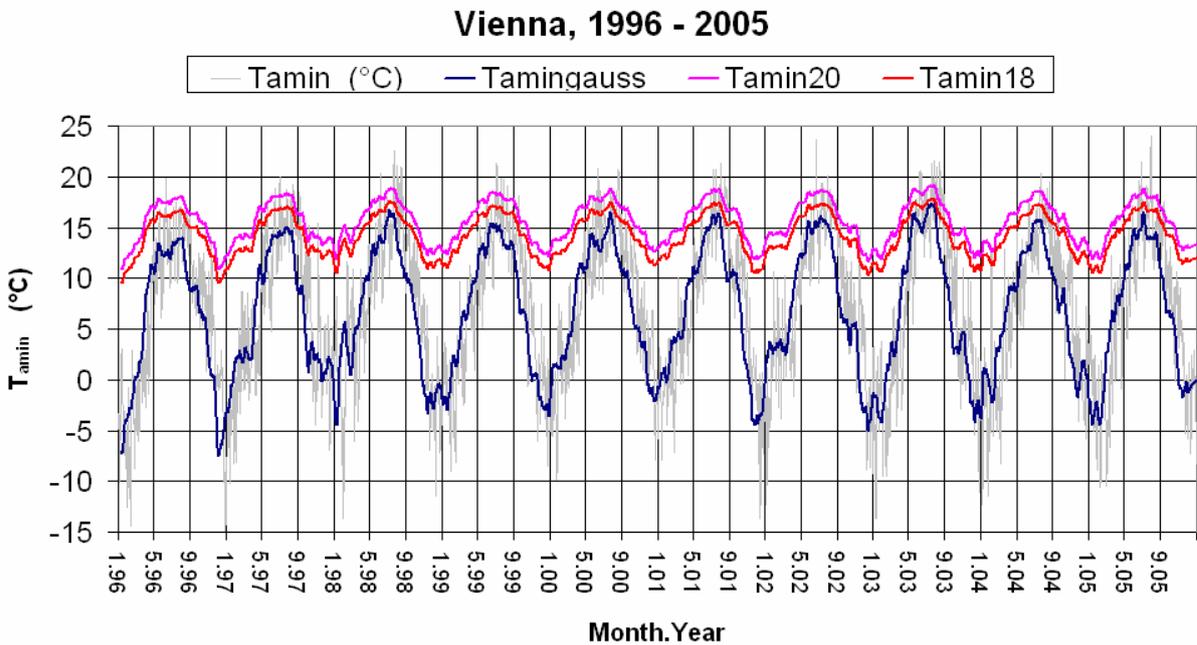


Fig. 2: Temporal development of Tamin, Tamingauss, Tamin20 and Tamin18 in Vienna for the period 1996-2005

Abb. 2: Zeitliche Entwicklung von Tamin, Tamingauss, Tamin20 and Tamin18 in Wien für den Zeitraum 1996-2005

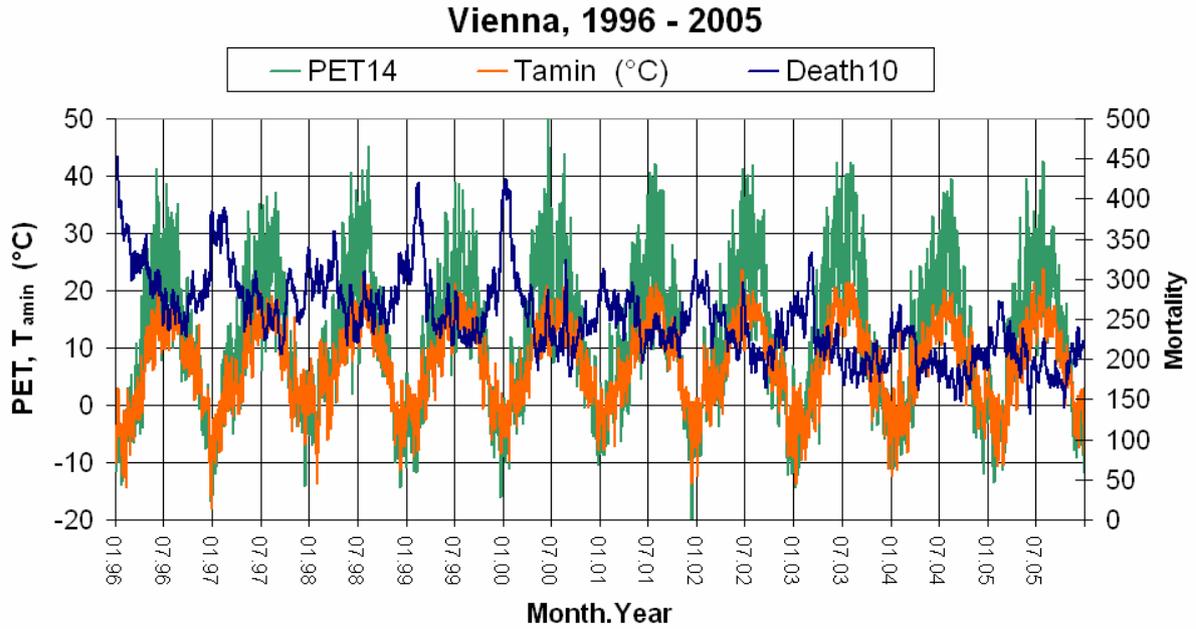


Fig. 3: Temporal development of PET14, Tamin and Mortality in Vienna for the period 1996-2005

Abb. 3: Zeitliche Entwicklung von PET14, Tamin und Mortalität in Wien für den Zeitraum 1996-2005

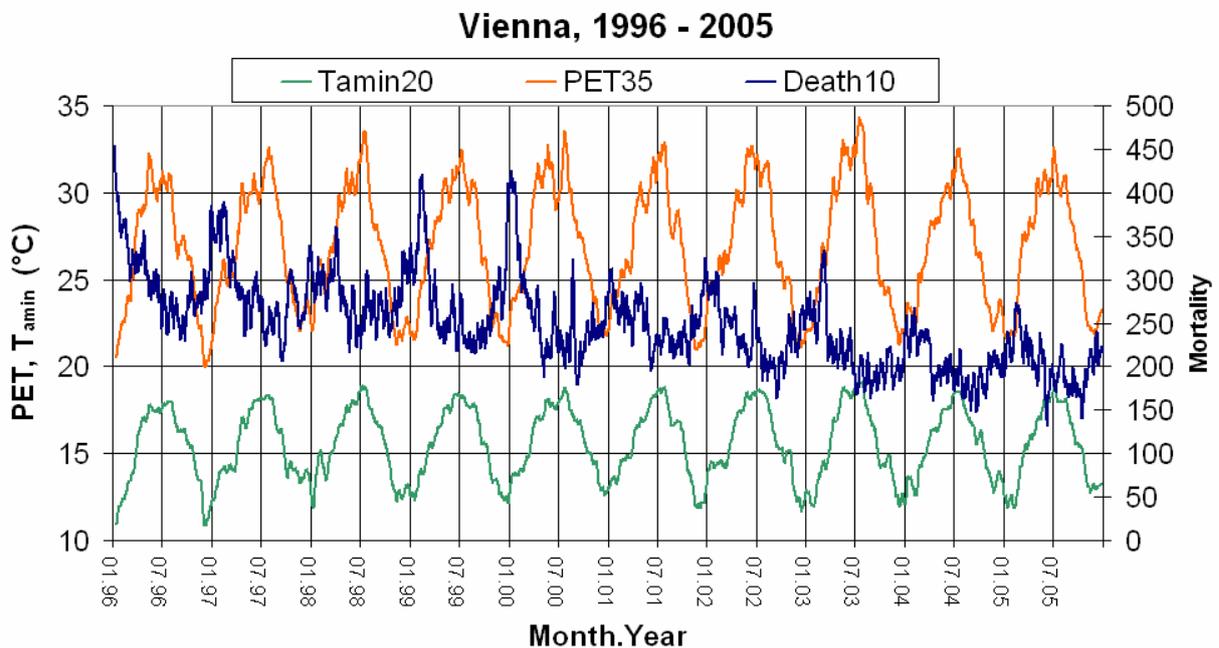


Fig. 4: Temporal development of Tamin, PET35 and Mortality in Vienna for the period 1996-2005

Abb. 4: Zeitliche Entwicklung von Tamin, PET35 und Mortalität in Wien für den Zeitraum 1996-2005

Table 1: Mortality values for days with PET > 35 °C, Tamin > 18 °C and the amount of days with PET > 35 °C and Tamin > 18 °C

Tab. 1: Mortalität für Tage mit PET > 35 °C, Tamin > 18 °C und Anzahl der Tage mit PET > 35 °C und Tamin > 18 °C

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Mortality with PET > 35	201	110	464	141	390	344	352	600	109	201
Days with PET > 35 °C	7	4	16	5	14	15	13	30	6	9
Mortality with Tamin > 18	68	318	475	255	505	375	426	681	196	247
Days with Tamin > 18 °C	2	11	15	9	17	15	16	32	10	11

The table shows quite clear that a high amount of days with PET > 35 °C brings also a high amount of mortality values (Fig. 5). During the summer 2003 the mortality and the amount of days with PET > 35 °C is much higher than in the other years. A clear picture can be obtained also for the years 1998, 2000, 2001 and 2002. Also the Tamin > 18 °C pattern shows the correlation quite evidently (Fig. 5).

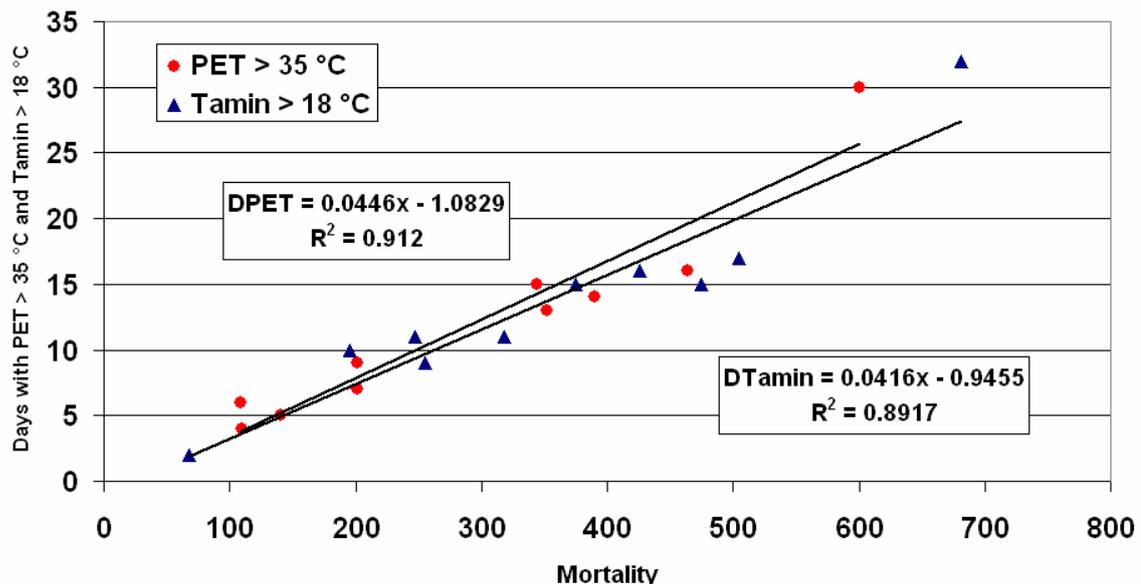


Fig. 5: Correlation between PET > 35 °C and Tamin > 18 °C and Mortality in Vienna (1996-2005)

Fig. 5: Korrelation zwischen PET > 35 °C und Tamin > 18 °C und Mortalität in Wien (1996-2005)

4 Conclusions

From this preliminary study it can be extracted that the selected two parameters PET for the noon and Tamin for the night conditions show that there is a clear picture between heat related mortality and the selected conditions.

Further steps are to include also air pollution conditions in the analysis and to look also on the complete mortality figures not only related to heart and cardiovascular diseases and general mortality data.

References

- KOCH, E., MARKTL, W., MATZARAKIS, A., NEFZGER, H., RUDEL, E., SCHUNDER-TATZBER, S., ZYGMUNTOWSKI, M., 2005: Klimatherapie in Österreich. - Broschüre zu den Potentialen der Klimatherapie in Österreich. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit.
- KOCH E., A. MATZARAKIS, E. RUDEL, 2006: Increase of human heatstress, one of the most serious extreme events due to Global Warming. - Proceedings of the conference on adaptation of the society to the extreme climate change, Moscow, 2006
- KOPPE, C., 2005: Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse. - Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 226.
- MATZARAKIS, A., 2006: Weather and climate related information for tourism. - *Tourism and Hospitality Planning & Development* **3**, 99-115.
- MATZARAKIS, A., DE FREITAS, C., SCOTT, D., 2004 (eds.): *Advances in tourism climatology*. - Ber. Meteorol. Inst. Univ. Freiburg Nr. 12.
- MATZARAKIS, A., MAYER, H., 1991: The extreme heat wave in Athens in July 1987 from the point of view of human biometeorology. - *Atmospheric Environment* **25B**, 203–211
- MATZARAKIS, A., MAYER, H., 1997: Heat stress in Greece. - *Int. J. Biometeor.* **41**, 34-39.
- MATZARAKIS, A., MAYER, H., IZIOMON, M.G., 1999: Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. - *Int. J. Biometeorol.* **43**, 76-84.
- ROBINSON, P.J. 2001: On the definition of heat waves. - *J. Appl. Meteorology* **40**, 762–75.
- RUDEL, E., MATZARAKIS, A., KOCH, E., 2005: Potential increase of heat load on humans in a changing climate. - *World Resource Review* **17**, 32-44.
- SCHÖNWIESE, C.D., 1992: *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. 2. Auflag. - Berlin, Stuttgart, Gebrüder Borntraeger.
- VDI, 1998: *Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil I: Klima*. - VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2.

Anschrift der Autoren

Dr. Ernest Rudel, Dr. Elisabeth Koch, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hohe Warte 38, A-1190 Wien

Prof. Dr. Andreas Matzarakis, Meteorologisches Institut, Universität Freiburg, D-79085 Freiburg

Microclimatic thermal comfort analysis in cities for urban planning and open space design

Lutz Katzschner

Fachgebiet Umweltmeteorologie, Universität Kassel

Abstract

Urban planners and architects need detailed information about the thermal conditions of open spaces for their design. For the use of open spaces it is essential, that they have a detailed knowledge of urban climate effects, thermal sensations as the actual use of open spaces is very much dependent from that. The possibilities for adequate activities within the city structure also depend from thermal conditions. Meteorological measurements were carried out in an urban city structure of the city Kassel to evaluate urban climate in respect thermal comfort to and compare these results with the behaviour of people. Fundamental knowledge for thermal sensations came out of a European investigation project, which was carried out in 6 countries. As thermal index the physiological equivalent temperature (PET) was used. For the thermal comfort analysis with measurements a simplified methodology was developed for the thermal comfort conditions and the presentation in urban climate maps. In a well defined city fabric measurements were carried out to compare different sensors and transferred to the mean radiation temperature.

Mikroklimatische Analyse des thermischen Komforts für Freiraumplanungen

Zusammenfassung

Der thermische Aspekt wird zunehmend, auch vor dem Hintergrund einer Klimaerwärmung, auch in der Stadtplanung als bedeutsamer Faktor anerkannt. Zur besseren Berücksichtigung des thermischen Komforts in der Planung sind qualitative und quantitative Bewertungen notwendig. Dies geschieht auf Grundlage von Messungen und Modellierungen mit den thermischen Indices.

Auf Basis mehrerer meteorologischen Messungen im städtischen Freiraum bei gleichzeitiger durchgeführten Beobachtungen und mit Interviews lassen sich Rückschlüsse auf das thermische Empfinden und die parallel erhobenen Messergebnisse ziehen. Untersuchungsgebiete waren Plätze und Straßenräume in Kassel mit hoher Benutzungsdichte. Berechnet wurde der thermische Komfort durch PET, wobei die mittleren Eingabeparameter auch durch vereinfachte empirische Annahmen abgeleitet wurden. Weiterhin wurden verschiedene Globetemperaturen verwendet, um die mittlere Strahlungstemperatur zu bestimmen. Dabei stellte sich eine hohe Windabhängigkeit des Globethermometers heraus.

Ergebnis ist eine Tabelle mit PET Klassen und thermischen Empfinden. Dabei war die Reaktion der Menschen weniger auf die kurzzeitigen thermischen Bedingungen ausgerichtet, sondern eher auf mittlere Tageswerte.

1 Introduction

There is strong public interest in the quality of open urban spaces and it is acknowledged that they can contribute to the quality of life within cities, or contrarily enhance isolation and social exclusion. This relates to the thermal physical as well as social environment. In the frame of many discussions about a new urbanity the issue becomes more and more important to revitalize cities. Therefore, in order to increase use of outdoor space and follow the idea of revitalising cities, the environmental conditions and thermal comfort, which effect people using these spaces, have to be considered and improved.

The paper is based on a European project, which has aimed to produce a guideline for urban design that provides urban designers, planners and other decision makers with the appropriate means for thermal comfort conditions. This is achieved by the investigations of thermal comfort measurements with parallel interviews and presentations to municipalities and technical representatives.

Problem was to establish a common evaluating for thermal conditions of open spaces as people showed a quite different behaviour depending on activities and expectations. Open space planning need a precise microclimatic analysis which also evaluates people's behaviour in dependence of the thermal situation. Therefore a methodology was developed for mapping comfort conditions in the urban context results from measurements and observations. Moreover city planning needs an evaluation of analysis and a translation to planning.

2 Thermal Comfort Discussion

To evaluate thermal comfort many different comfort standards and indices are use. Main purpose of these papers is to describe the influencing parameters and their input factors, so that any measurements and calculation of thermal comfort can be used for planning. The behaviour of people of urban spaces in dependence of the meteorological parameters are therefore used and developed towards a planning tool. The underlying thermo logical and physical processes based on heat balances of man described by HÖPPE (1999). The Physiological Equivalent Temperature (PET) is used here. It is known that the main influencing parameter are wind velocity, long- and short wave radiation, humidity and air temperature.

Another factor which should be considered in open space planning and urban design is activity. Thermal comfort conditions can be different depending from these activities ranging from a PET value of 28 °C with strong movement to 20 °C with calm activities. So any social activities, cultural activities or breaks need warmer conditions than playing grounds. From table 1 and 2 the different behaviour of people in different climatic regions can be seen. Calculations of the physiological equivalent temperature (PET) and the neutral temperature were used to calibrate thermal sensations. These results were correlated with observation of people in their open space behaviour and finally brought to a specified calibration of thermal sensations.

Measurements of thermal comfort and parallel interviews in Germany show in the case of calm activities like sitting and slow walking that the neutral conditions are with a PET value of 18 to 21 °C and air temperatures around 19 to 21 °C. This is similar to the neutral temperature out of the RUROS project with mean temperatures of 18 °C, knowing that the neutral temperature does not include the wind speed, which is important for the thermal aspect of being in thermal comfort. Over all one can learn from table 2, which is a conclusion out of a European project and a comparison between different cites, that there are different thermal sensations depending on regional climates (NIKOLOPOULOU et al., 2005).

All predictive errors between calculated thermal comfort values and behaviour have been mentioned already by Fanger, who explained it with mechanical cooling. Later investigations (NICOL, 2004) indicate that also the expectation in temperature influences thermal comfort. For planning purposes it is important to consider and calibrate thermal standards with the subjective thermal comfort feeling. For evaluation in planning processes the tended use of a place also influences the expectation and thermal sensation.

Tab. 1: Thermal evaluation from interviews in Kassel / Germany in dependence of PET, temperature and wind speed

Tab. 1: Thermisches Empfinden aus Interviews in Kassel in Abhängigkeit von PET, T_a und v

values 13:00	PET °C	thermal sensation with five categories	T air °C	wind m/s
10.5.05	10,1	cool	13,5	0,6
18.5.05	13,5	slightly cool	14	0,8
7.6.05	14,8	slightly cool	16,5	0,9
3.5.05	18,0	Neutral	23,2	1,8
13.5.05	20,1	Neutral	18,2	0,8
19.5.05	21,0	Neutral	20,2	0,3
21.5.05	25,0	Warm	24,7	1,2

Tab. 2: Neutral temperature in °C (neutral feeling) in different air European cities (after NIKOLOPOULOU 2005 et al. and RUROS, 2004)

Tab. 2: Neutrale Temperatur verschiedener europäischer Städte (nach NIKOLOPOULOU et al., 2005 und RUROS 2004)

Neutral air temperature year summer - winter		cities
22,8	28-21	Athen
25,3	29-15	Thessaloniki
12,9	16-11	Fribourg
18,3	24-21	Mailand
17,8	17-11	Cambridge
15,3	16-11	Sheffield
18,5	22-15	Kassel

3 Method

Two steps were taken to discuss thermal comfort results for open spaces. First a one day experiment was carried out in a well defined urban area to measure different meteorological values in the course of the day and seconds an 11 weeks from April to June 2005 observation to study the behaviour of people in open spaces in connection to thermal comfort conditions. It is important to mention, that the local situation of investigation area is within the heat island with reduced ventilation of the city Kassel, which were taken out from the urban climate analysis as seen in figure 2 on the right. So the investigation deals with periods of heat stress and reduced cooling during the investigation period in June. The destination of thermal conditions is used to calibrate thermal sensations by an observation of the behaviour of people using the open spaces near a bistro. More detailed information also could be reached by counting people visiting the bistro inside or outside in dependence of the thermal surroundings.

I could be seen from the discussion in chapter 2 that thermal comfort has to be considered in a height spational, daily and seasonal variation, together with use of open spaces. Therefore any information needed for urban design to improve thermal comfort conditions have to combine physical results with subjective behaviour and well feeling of people. To do these simple measurements were used with parallel interviews. Especially the first parameter is sometimes difficult to derive. Calculations can not be done by everybody. To get the mean radiation temperature globe temperature measurement results are used with different correction factors in dependence of radiation and wind.

Results from Measurements

For one day 20th June 2005 meteorological measurements were recorded in a well defined area with a mobile system (figure 1). The recorded meteorological parameters in the investigation site were global radiation R_g [W/m^2], air temperature T_a [$^{\circ}C$], surface temperatures T_s [$^{\circ}C$], wind speed v [m/s], globe temperature big and small T_{Gb} and T_{Gs} and the correspondent PET values all in [$^{\circ}C$].



Fig 1: Mobile system and investigation area and urban climate map Kassel

Abb.1: Mobile Messwerterfassung und die Untersuchungsräume Kassel

Tab. 3: Correction factors to derive the mean radiation temperature (T_{mrt}), from air temperatures and globe temperature (TG)

Tab. 3: Korrekturfaktoren zur Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur aus TG, T_l und v

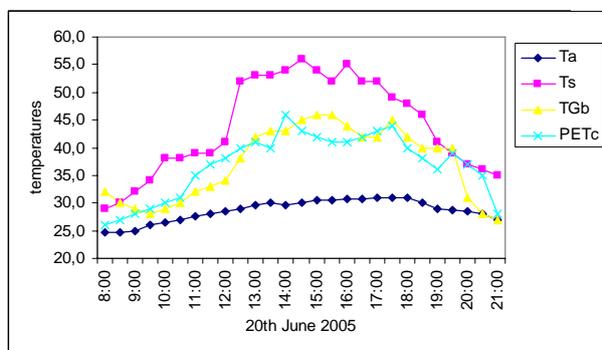


Fig. 2: Daily variation of air temperature (T_a), surface temperature (T_s), globe temperature (TG_b) and PET (PET_c) in $^{\circ}C$

Abb. 2: Tagesgang der Lufttemperatur (T_a),

Oberflächentemperatur (T_s), globeTemperatur (TG_b) und dem PET Werte in $^{\circ}C$

T_l	T_{mrt}	TG + Radiationfactor	$T_{mrt} = TG + \text{windfactor}$	
	= Sunny factor		half cloudy factor 4/8	v m/s
< 5	2	0	< 1	0
10	4	1,5	1-2	+1
15	6	3	2-3	+ 2
20	8	6	3-4	+ 3
25	10	7,5	4-5	+ 4
30	12	9	> 5	+ 5
> 30	14	10,5		

The results from a one day of measurements show that globe temperatures react very similar, with a slight faster response time of the small instrument depending on wind speed but equalised in a half hourly average. Globe thermometers react slowly against the change of global radiation, but in terms of the calculated PET value wind and radiation influence thermal conditions directly. In figure 2 one can see the course of air temperatures surface temperatures and globe temperature in connection to the calculations of PET. This should discuss weather it is possible to use simple temperature results for thermal conditions. Here the daily course of temperatures only represents the tendency but not the important short time changes. Surface temperatures there give a better understanding of the thermal situation.

With all that in mind, and with a focus on thermal sensations on half hourly averages the mean radiation temperature can be used from globe thermometers and weighting factors similar. Therefore in table 3 very simple weighting factors to get the mean radiation temperature were developed. It has to be said that this is mainly based on a one day experiment together with the experience from different studies about heat island and city structures (Katzschner, 1995). With this simple assumption for the mean radiation temperature from globe or air temperatures PET easily can be calculated as all other parameters can be taken directly from

measurements. Even if there was only one day experiment in a well defined urban situation the results are considerable and show the possible use of simple transformations to analyse thermal comfort for open space design.

4 Use of open spaces with thermal comfort conditions

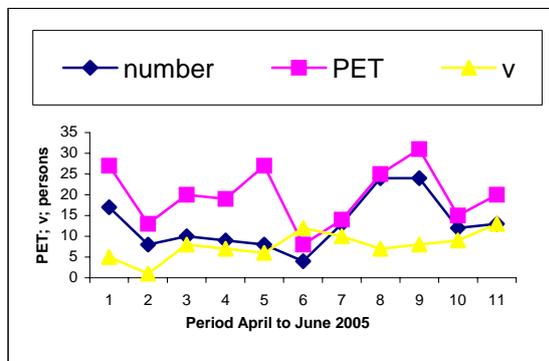


Fig. 3: Thermal comfort, wind speed and frequency use of open spaces

Abb.3: Thermischer Komfort und Freiraumnutzung

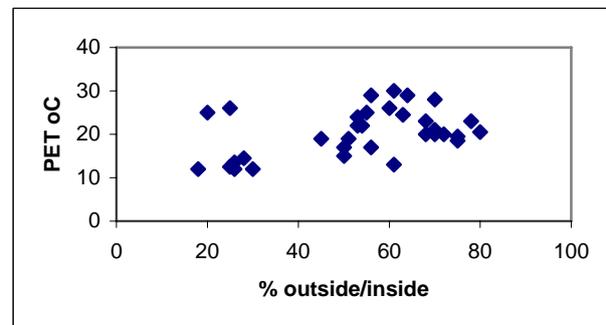


Fig. 4: Percentage of people inside / outside in dependence from PET

Abb.4: Prozentualer Anteil der Menschen im freien in Abhängigkeit von PET

Results from chapter 3 were used to calculate thermal comfort and combine this with observation how people react on thermal comfort conditions in their open space behaviour. As thermal index again PET was taken. During 11 weeks all people were counted using a specific place just before a bistro. Parallel to that measurements were taken and PET was calculated from that. In figure 3 the weekly averages of PET, wind speed and the absolute number of people using that place are shown. First observation which was made is that more people like sitting outside with increasing PET values. In this example of a moderate but urban climate in the city of Kassel this is even true if the thermal heat stress occurs with more than 24 °C, which can be judged as neutral. Especially those people using the place during midday for a working break seek for warm thermal conditions, especially if they come out of a air conditioned office. The windy situations during the 5th week immediately lead to discomfort.

The same result can be derived from another observation concerning the outside or inside use of the bistro. Figure 4 demonstrates that behaviour, by a comparison between outside or inside sitting people. Even during the observations of a warm summer day with PET values above 24 °C not all people look for shadow places inside the bistro, which was much cooler than, but want to be outside with warm or even heat stress conditions. This behaviour is very much in accordance to the expectation of the usual warm summer. Disturbing factor for this knowledge is mainly the activity shortly before, as here a thermal compensation is dominating. So business jobs in surrounding offices can stand warmer conditions than shopping. Warm sensation is correlated very much with high solar radiation and low wind speed.

The observations from figure 4 were taken from a bistro, where it was possible to choose between outside and inside. The bistro was mainly used for short breaks during work or shopping. During the 11 week's investigation period from April to June the normal behaviour was an increasing outdoor use with increasing PET. The two exception weeks were combined with rain and higher wind speeds. One can see that the absolute values of PET often exceed neutral conditions but still people were looking for sun in the outside. A significant correlation between PET and outside use of space could not be found.

5 Conclusions

The paper shows that people's behaviour is very much dependent on the thermal outside conditions, but is influenced from the expectation of weather and the activities why open spaces are used. Also the paper shows that more simplified measurements and assumption meet the accuracy of results needed. With that planners have a more easy capability to use the urban climate tools for their evaluation. The description of the thermal conditions have to be easily understood and also easily to get. In terms of this evaluation of the thermal conditions it seems possible to use simple assumption to classify thermal sensations. People react on climate objectively in accordance with the calculated thermal indices, but their thermal sensations are combined with individual expectations. Especially as the results are used in an open space design the accuracy must be adapted to that perspective and the accuracy showed here are enough to implement thermal comfort into open space design and urban planning processes. More investigations and information are needed for windy weather situations, as here the mean radiation temperature is not as dominant for the thermal sensations as wind speed.

References:

- EU RUROS PROJECT, 2004: Design guideline open space planning and comfort. - CRES, Athen.
- HÖPPE, P., 1999: The physiological equivalent temperature – a universal index for biometeorological assessment of the thermal environment - *Int. J. Biometeorol* **43**, 71-75.
- KATZSCHNER, L., 1995: Stadtklima und Stadtstrukturen, Arbeitsberichte der Gesamthochschule Kassel.
- KATZSCHNER, L., 2002: Bioclimatic Characterisation of Urban Microclimates for the Usage of Open Spaces, Ecole d'Architecture de Nantes (CERMA), International Workshop on Architectural an Urban Ambient Environment, Nantes, Proceedings 6 –8 February (2002).
- NICOL, F., 2004: Adaptive thermal comfort standards in hot humid tropics, *Energy and Buildings*, 36, 628 ff.
- NIKOLOPOULOU, M., BAKER, N., STEEMERS, K. 1998: Improvement of the globe thermometer for outdoor use - *Architectural Science Review*, Vol. **42** pp 2734.

Address of the author

Prof. Dr. Lutz Katzschner, Fachgebiet Umweltmeteorologie, Universität Kassel, Henschelstr. 2, D-34127 Kassel

**Untersuchung des thermischen Komforts
zur Abpufferung von Hitze mittels eines städtebaulichen Entwurfs
(BMBF Verbundprojekt KLIMES)**

Lutz Katzschner¹⁾, Michael Bruse²⁾, Christl Drey³⁾ und Helmut Mayer⁴⁾

¹⁾ Fachgebiet Umweltmeteorologie, Universität Kassel

²⁾ AG Geomatik, Geographisches Institut, Ruhr-Universität Bochum

³⁾ Fachgebiet Städtebau, Universität Kassel

⁴⁾ Meteorologisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund einer globalen Klimaerwärmung wird auch in der Stadtplanung die zunehmende Bedeutung des thermischen Komforts für Menschen erkannt. Zur besseren Berücksichtigung dieses Aspektes in der Stadtplanung werden neben qualitativen vor allem quantitative Bewertungsverfahren benötigt.

In dem vom BMBF im Rahmen der Initiative „Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ (klimazwei) geförderten Verbundprojekt KLIMES werden in ausgewählten Stadtquartieren in Freiburg (SW Deutschland) Untersuchungen zum thermischen Komfort in Außen- und Innenräumen durchgeführt. Sie bestehen aus (1) experimentellen Untersuchungen einschließlich von Befragungen zur Nutzung von urbanen Freiräumen und zum thermischen Empfinden sowie (2) numerischen Simulationsberechnungen zur thermischen Belastung unter der Annahme der derzeitigen und zukünftigen regionalen Klimabedingungen.

Der Mehrwert des interdisziplinären Forschungsverbunds KLIMES besteht darin, dass human-biometeorologische Erkenntnisse zum thermischen Komfort bei Hitze mit den Ergebnissen von soziologischen Befragungen korreliert und in einer hohen räumlichen Auflösung in städtebauliche Entwürfen für Stadtquartiere umgesetzt werden.

**Investigation of the the thermal comfort to mitigate extreme heat
by means of an urbanistic concept
(BMBF cooperative project KLIMES)**

Abstract

In the face of global warming, human thermal comfort has become an increasing important aspect in applied urban planning. For a better consideration of this aspect in the planning process, qualitative and especially quantitative assessment tools are required.

The joint project KLIMES is funded by the BMBF inside the research framework „Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ (klimazwei). Within KLIMES several investigations into thermal comfort in outdoor and indoor spaces are carried out in selected city quarters in the city of Freiburg (SW Germany). These studies consist of (1) experimental investigations including field interviews about usage of urban open spaces and thermal sensa-

tion and (2) numerical simulations on thermal comfort under recent as well as future regional climate conditions.

The added-value of the interdisciplinary research project KLIMES is based on the correlation of findings from human-biometeorology with the outcomes from sociologic questionnaires which will be used to plan and design structures in a high spatial resolution.

1. Problemstellung

Nach neuesten Simulationsrechnungen zum Klimawandel ist in Mitteleuropa mit einer deutlichen Zunahme von extremen Hitzeperioden im Sommer zu rechnen. Die Hitzewellen im Juni und August 2003 sowie im Juli 2006 sind dafür eindrucksvolle Beispiele.

Vor dem Hintergrund der großräumigen Hitze werden insbesondere in Städten Hitzestressperioden für Menschen ansteigen, intensiver werden und länger andauern. Ausschlaggebend dafür sind die Phänomene des Stadtklimas, die sich unter urbaner Wärmeinsel bzw. urbanem Wärmearchipel zusammenfassen lassen. Damit Leistungsfähigkeit, Wohlbefinden und Gesundheit von Menschen in Städten auch zukünftig gesichert sind, muss die Stadtplanung schon heute städtebauliche Planungen so optimieren, dass die thermischen Belastungen auch unter extremen Hitzebedingungen sowohl im Freien als auch in den Innenräumen auf ein erträgliches Maß reduziert werden.

Um die in diesem Bereich bestehenden Fragestellungen zu beantworten, wird das Verbundprojekt KLIMES (Planerische Strategien und städtebauliche Konzepte zur Reduzierung der Auswirkungen von **kl**imatischen **Extremen** auf Wohlbefinden und Gesundheit von Menschen in **St**ädten) von einer interdisziplinären Arbeitsgruppe aus den Bereichen Stadtklimatologie, Städtebau und Geoinformatik durchgeführt, das in die BMBF Förderinitiative „Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ (klimazwei) eingebunden ist.

2. Zielsetzung

Das generelle Ziel von KLIMES ist die Erstellung eines praxistauglichen Planungsleitfadens mit Entwurfsbausteinen für den klimawandelgerechten Städtebau. Er wird Konzepte beinhalten, auf welche Weise in bestehenden städtischen Strukturen der Hitzestress für Menschen minimiert werden kann, so dass ihr thermischer Komfort nur in erträglichem Ausmaß beeinträchtigt ist.

Die generelle Zielsetzung von KLIMES baut auf den Zielsetzungen der vier KLIMES Teilvorhaben auf. Sie sind auf der KLIMES Homepage (www.klimes-bmbf.de) detailliert angegeben.

3. KLIMES Teilvorhaben

Das Verbundprojekt KLIMES besteht aus folgenden vier Teilvorhaben (Abb. 1):

- KLIMES ALUF-1 (Projektleiter: Prof. Dr. Helmut Mayer, Meteorologisches Institut der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg): Koordination des Verbundvorhabens KLIMES
- KLIMES ALUF-2 (Projektleiter: Prof. Dr. Helmut Mayer, Meteorologisches Institut der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg): Planungsrelevante human-biometeorologische Bewertung von städtischen Strukturen bei thermischen Stressbedingungen hinsichtlich der Anpassung an Extremwetter

- KLIMES KAS-1 (Projektleiter: Prof. Dr. Lutz Katzschner, Fachgebiet Umweltmeteorologie der Universität Kassel): Planerische Bewertung der kleinräumigen Stadtklimaanalysen zur Umsetzung der Maßnahmen „Anpassung an Klimaextreme“

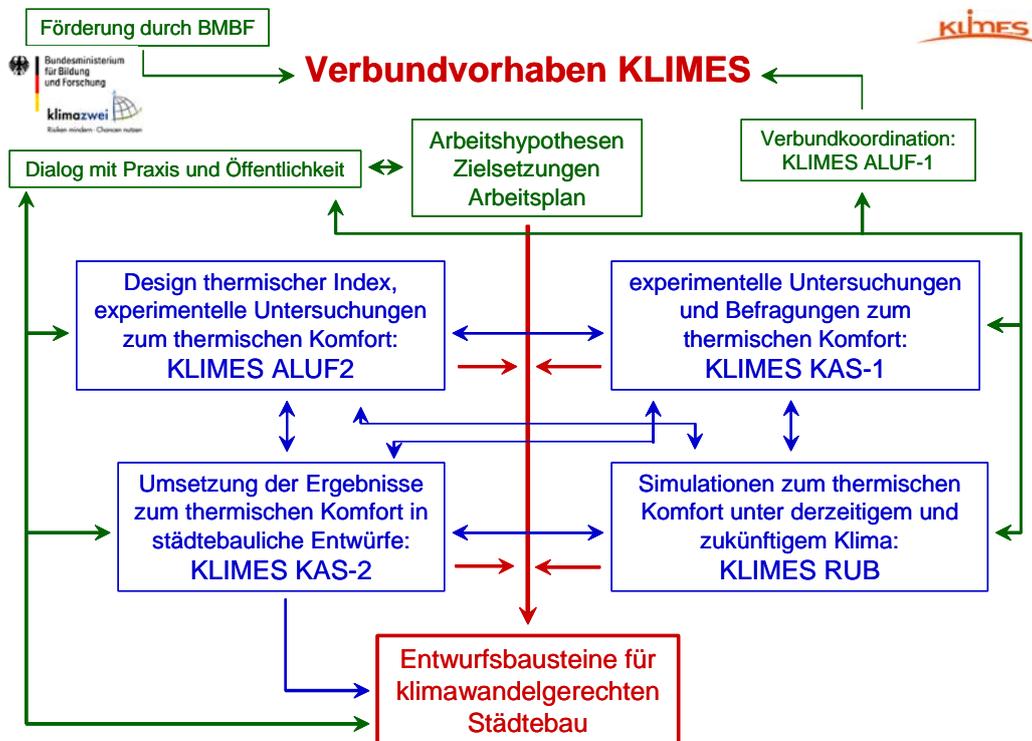


Abb. 1: Vernetzung im BMBF Verbundprojekt KLIMES

Fig. 1: Cross-linking in the joint research project KLIMES

- KLIMES KAS-2 (Projektleiterin: Prof. Christl Drey, Fachgebiet Städtebau der Universität Kassel): Planerische Operationalisierung stadtklimatischer Analysen und Modelle zur Entwicklung human-biometeorologischer Entwurfsbausteine für nachhaltige Konzepte des Stadtumbaus
- KLIMES RUB (Projektleiter: PD Dr. Michael Bruse, AG Geomatik, Geographisches Institut der Ruhr-Universität Bochum): Numerische Simulation des Mikroklimas und des thermischen Komforts in unterschiedlichen städtischen Strukturen unter thermischen Stressbedingungen, hervorgerufen durch Hitzeperioden

Um den Anwendungsbezug der Ergebnisse aus KLIMES sicherzustellen, findet ein permanenter Dialog mit kommunalen Experten vom Stadtplanungsamt Freiburg und Stadtplanungsamt Kassel sowie der Öffentlichkeit statt.

Als Untersuchungsstandort dient Freiburg. Aufgrund der Lage am Ostrand der in N-S Richtung verlaufenden, südlichen Oberrheinebene ist Freiburg die wärmste Stadt in Deutschland. Nach Resultaten aus regionalen Klimasimulationen werden in der südlichen Oberrheinebene zukünftig Hitzeperioden im Sommer besonders ausgeprägt sein.

In Freiburg wurden nach verschiedenen Kriterien Stadtquartiere als Untersuchungsobjekt ausgewählt:

- a) typische zukünftige planerische Aufgabenstellungen in unserer Klimaregion,

- b) laufende bzw. abgeschlossene Planungen im Zeitraum des derzeitigen Klimawandels,
- c) typische Stadtstrukturen in mitteleuropäischen Städten.

4. Methodik

Methodisch werden in KLIMES verschiedene aufeinander abgestimmte Verfahren in den ausgewählten Stadtquartieren angewendet, um Aussagen zum thermischen Komfort zu erzielen:

- a) experimentelle Untersuchungen zur Analyse der Wahrnehmung der thermischen Umgebungsbedingungen durch ein Kollektiv von Menschen unter Verwendung des thermischen Indexes PET* (Fortschreibung der international angewandten physiologisch äquivalenten Temperatur PET; (u.a. ALI-TOUDERT et al., 2005; ALI-TOUDERT und MAYER, 2006, 2007; KATZSCHNER, 2004; RUROS, 2004),
- b) parallel zu a) Interviews mit Passanten über ihre subjektive Wahrnehmung der thermischen Umgebungsbedingungen, um mit den daraus erzielten Resultaten die Ergebnisse für PET* graduell abzustufen,
- c) mikroskalige Simulation des thermischen Komforts von Menschen unter den Schwerpunkten Stadtstruktur (Modell ENVI-met) und menschliches Verhalten (Modell BOTworld), wobei das derzeitige und zukünftige regionale Klima die Randbedingung darstellt.

Diese Verfahren werden primär auf Freiräume in den vorgesehenen Stadtquartieren angewendet. Sie werden aber auch in ausgewählten Innenräumen eingesetzt, die parallel zu den Freiraumuntersuchungen analysiert werden. Die Ergebnisse aus den Verfahren a) bis c) bilden die Grundlagen zur Entwicklung human-biometeorologischer Entwurfsbausteine für nachhaltige Konzepte des Stadtumbaus.

Um die anhand des Untersuchungsstandorts Freiburg erzielten Ergebnisse auf ihre generelle Anwendbarkeit zu überprüfen, finden Testuntersuchungen in Kassel statt.

5. Modellierung

Bei der Bewertung der thermischen Situation in urbanen Räumen aus der Sicht von Fußgängern stellt sich das spezielle Problem, dass diese durch ihre Bewegung durch die Struktur meist innerhalb kurzer Zeit sehr unterschiedlichen Mikroklimabedingungen ausgesetzt sind. Der thermische Zustand und damit die Bewertung des Mikroklimas an einem einzelnen Punkt hängen somit stark von den Klimabedingungen ab, denen die Fußgänger vorher ausgesetzt waren (BRUSE, 2003). Um diese Zusammenhänge analysieren zu können, wird in KLIMES das Simulationsmodell BOTworld eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein so genanntes Multi-Agenten System, bei dem jeder virtuelle Fußgänger durch einen Softwareagenten repräsentiert wird, der sich autonom durch die Stadtstruktur bewegt. Hierbei werden nicht nur die kürzeste Route, sondern auch Komfortaspekte, wie beispielsweise die Bevorzugung von schattigen Wegen bei Hitzestress, berücksichtigt (BRUSE, 2005).

Neben den morphologischen und strukturellen Parametern des Untersuchungsgebietes wird zudem das mit dem Modell ENVI-met simulierte Mikroklima in das BOTworld System geladen. Somit kann jederzeit festgestellt werden, welchen Mikroklimabedingungen die virtuellen Fußgänger auf ihrer Reise durch die Modellstadt ausgesetzt sind. Verschiedene nach geschaltete, human-biometeorologische Berechnungsverfahren simulieren dabei kontinuierlich die thermische Reaktion des Agenten auf das Mikroklima und geben Rückmeldung darüber, wo er oder sie ist, wie das allgemeine thermische Befinden ist und ob der Agent mit seiner Umwelt zufrieden ist. Ist er es nicht, versucht er, alternative, angenehmere Wege zu seinen Zielen

zu finden – falls es sie gibt. Aggregiert man diese zeitlich und räumlich verteilten Daten über eine gewisse Zeitspanne, lassen sich Karten über den thermischen Komfort im Untersuchungsgebiet ableiten, die sowohl die Trägheit der thermischen Wahrnehmung als auch die Nutzungsmuster des Raumes berücksichtigen.

6. Operationalisierung - Planungsfibel

In der großräumigen und gesamtstädtischen Flächenplanung steht den Planungspraktikern vor Ort bereits ein fundiertes Instrumentarium für eine stadtklimatische Optimierung zur Verfügung. Defizite hingegen bestehen bei der Stadtteil- und Quartiersplanung einerseits und im aktuellen Aufgabenfeld des Stadtumbaus andererseits, also im Praxisfeld der dreidimensionalen Planung, im Städtebau.

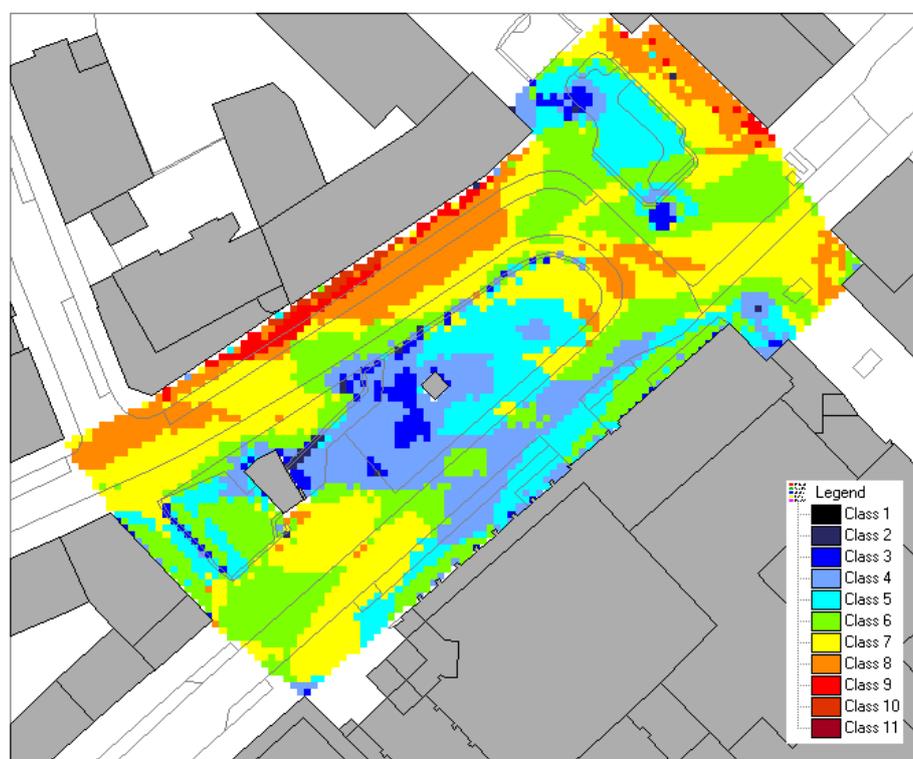


Abb. 2: Mikroklimatische Kartierung und thermische Bewertung eines Freiraums in der Stadt, Klassifizierung nach thermischen Gesichtspunkten von „kalt“ zu „warm“

Fig. 2: Microclimatic mapping and thermal classification of an open space within a city, classification according to the thermal sensations from “warm” to “cold”

Die siedlungsstrukturelle und architektonische Optimierung neu geplanter Quartiere für eine maximale Nutzung solarer Strahlung zur passiven Energiegewinnung - also zur Wärmenutzung - ist bereits breit beforscht und wird in zahlreichen Modellvorhaben und alltäglichen Anwendungen praktisch erprobt und weiterentwickelt. In Ergänzung hierzu wird KLIMES im kooperativen Verbund von Wissenschaftlern und Praktikern städtebauliche Entwurfsbausteine entwickeln, die der Wärme- und Hitzereduktion speziell im Stadtraum, aber auch in Übergangsbereichen ins Innere der Bebauung dienen. Hierzu wird KLIMES im engen Dialog der kooperierenden Disziplinen und der praktischen Planer und Städtebauer räumlich-klimatische Analysen, Szenarien und Entwürfe für den Quartiersumbau und den Siedlungsneubau erarbei-

ten. Mikroklimatische Kartierungen städtischer Freiräume ihres Ist-Zustandes (Abb. 2) werden in planerischen Einzelschritten so umgestaltet, dass eine klimawandelgerechte Situation entsteht, welche sich auch auf die Innenräume auswirkt. Die Ergebnisse werden anwendungstauglich in einer Planungsfibel zusammengefasst. Somit steht der Begriff des "Human-biometereologischen Entwurfs" auch für eine kreative, anwendungsbezogene Zusammenarbeit von Theorie und Praxis bei der Klimaforschung.

Literaturverzeichnis

- ALI-TOUDERT, F., M. DJENANE, R. BENSALÉM, H. MAYER, 2005: Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria. - *Clim Res* **28**, 243-256
- ALI-TOUDERT, F., H. MAYER, 2006: Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. - *Building and Environment* **41**, 94-108.
- ALI-TOUDERT, F., H. MAYER, 2007: Thermal comfort in an east-west oriented street canyon in Freiburg (Germany) under hot summer conditions. - *Theor. Appl. Climatol* **87**, 223-237.
- BRUSE, M., 2003: Assessing urban microclimate using multi-agent simulations: A new approach to answer an old problem? - In: Klyzik et al. (eds.): Fifth International Conference on Urban Climate, Lodz, Poland, 2003 - Vol. 2, 23-26.
- BRUSE, M., 2005: Assessing urban microclimate from the user's perspective - Multi-agent systems as a new tool in urban biometeorology. - *Ann. Meteorol. B* **41**, 137-140.
- KATZSCHNER, L., 2004: Open space design strategies based on thermal comfort analysis. *Proc. PLEA 2004*, NL Technische Universität Eindhoven, Vol. 1, 47-52.
- RUROS 2004: Designing open spaces in the urban environment: a bioclimatic approach. Key Action 4, City of Tomorrow, Fifth Framework Programme EU, CRES Athen.

Anschrift der Autoren

Prof. Dr. Lutz Katzschner, Fachgebiet Umweltmeteorologie, Universität Kassel, Henschelstr. 2, D-34127 Kassel

PD Dr. Michael Bruse, AG Geomatik, Geographisches Institut, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, D-44780 Bochum

Prof. Christl Drey, Fachgebiet Städtebau, Universität Kassel, Henschelstr. 2, D-34109 Kassel

Prof. Dr. Helmut Mayer, Meteorologisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Werderring 10, D-79085 Freiburg

Die Relevanz der Innenraumverhältnisse für Hitzewarnsysteme

Paul Becker¹ und Jens Pfafferott²

¹Deutscher Wetterdienst, Medizin-Meteorologie, Freiburg, Germany

²Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg, Germany

Zusammenfassung

Eine prinzipielle Einschränkung des zur Zeit beim Deutschen Wetterdienst eingesetzten Hitzewarnsystems besteht darin, dass nur Aussagen über die Verhältnisse im Freien gemacht werden können. Die häufig sehr stark abweichende Innenraumsituation wird nicht berücksichtigt. Die nachfolgende Studie versucht daher, das Hitzewarnverfahren um ein thermisches Gebäudesimulationsmodell zu erweitern. Es soll so die gefühlte Temperatur in Innenräumen in Abhängigkeit von den vorhergesagten meteorologischen Außenbedingungen abgeschätzt werden, um so die Hitzewarnung durch relevante Zusatzaussagen bezogen auf das Raumklima zu ergänzen.

The relevance of indoor conditions for heat warning systems

Abstract

A principle restriction of the heat warning system used at the Deutscher Wetterdienst at present is that statements can only be made on the conditions outdoors. Indoor conditions, which often differ considerably from those outdoors, are not taken into account. The following study is an attempt to expand the heat warning method by adding a thermal building simulation model. This would estimate the perceived indoor temperature in dependence on the meteorological conditions forecast for outdoors, thus supplementing the heat warning with additional statements relating to the indoor climate.

1 Einführung

Die Hitzewelle 2003 mit mehr als 35000 Toten in Westeuropa zeigte deutlich die Gefahr, die von einer lang andauernden Wärmebelastung ausgehen kann und führte in einer Reihe von europäischen Ländern zu einem Aufbau von Hitzewarnsystemen. Unterstützt wurden diese Bemühungen durch die derzeit vorliegenden Studien zur Klimaentwicklung, welche auf eine Zunahme derartiger Ereignisse hindeuten.

Bereits in 2006 konnten die Hitzewarnverfahren ihre Bewährungsprobe im Wesentlichen ablegen. Das in Deutschland eingeführte Hitzewarnsystem (BECKER, 2004) versorgt im Bedarfsfall derzeit u.a. mehrere tausend Alten- und Pflegeheime. Darüber hinaus werden alle Warnungen im Internet dargestellt.

Das zur Zeit beim Deutschen Wetterdienst eingesetzte Hitzewarnsystem macht nur Aussagen über die Verhältnisse im Freien. Die häufig sehr stark abweichende Innenraumsituation wird nicht berücksichtigt. Es soll daher versucht werden, dass Hitzewarnsystem um ein thermisches Gebäudesimulationsmodell zu erweitern, welches die gefühlte Temperatur in den unterschiedlichen Innenräumen in Abhängigkeit von den meteorologischen Außenbedingungen abschätzt.



Abb. 1: Darstellung der Hitzealarm-situation vom 16.06.06 auf den Warnseiten des Deutschen Wetterdienstes

Fig. 1: Representation of the heat warning situation on 16.06.06 on the warning pages of the Deutscher Wetterdienst

Es soll so die gefühlte Temperatur in unterschiedlichen Innenräumen in Abhängigkeit von den vorhergesagten meteorologischen Außenbedingungen abgeschätzt werden und die Hitzealarm-warnung um relevante Zusatzaussagen bezogen auf das Raumklima ergänzt werden.

2 Das Gebäudesimulationsmodell

Die Gebäudetypologie in einem Baubestand zeigt naturgemäß ein äußerst heterogenes Bild. Auch das Nutzerverhalten der Bewohner weist erhebliche Variationsmöglichkeiten auf. Unterschiedliches Nutzerverhalten kombiniert mit den verschiedenen Gebäudetypen ergibt daher sehr verschiedene Wärmebelastungssituationen, die eine Hitzealarm-welle bei Menschen hervorrufen kann.

Ein Hitzealarm-system erfordert jedoch aus Gründen der Praktikabilität eine starke Verdichtung der Information. Diese ist nur über bestimmte Annahmen und Wichtungen bzgl. der Raumsituation und des Nutzerverhaltens zu erreichen. In einem ersten Schritt soll daher bzgl. der Gebäudesituation bei sommerlichen Wetterlagen nur ein realistisches „worst case-Szenario“ betrachtet werden. Um dieses Szenario bestimmen zu können, wurden zunächst typische Gebäude für verschiedene Baualterstufen beschrieben.

Danach wurde für jeweils einen Raum innerhalb der typischen Gebäude mit dem Gebäudesimulationsprogramm ESP-r (CLARKE, 2001) die zu erwartenden operativen Raumtemperaturen (arithmetischer Mittelwert von Lufttemperatur und Strahlungstemperatur der Raumumschließungsflächen) für den Sommer berechnet, (PFAFFEROTT, 2004). Verwendet wurde hierfür das Testreferenzjahr 12 für warmes Sommerklima.

	Außenwand [W/m ² K]	Außenfenster [W/m ² K]	Oberste Geschossdecke [W/m ² K]	Zimmergröße [m ²]
Jahrhundertwende	0.9	2.5	1.0	30
1920er	1.1	2.5	1.4	18
1950er	1.3	5.2	3.0	21
1960er Flachdach	1.4	5.2	0.9	15
Plattenbauten Flachdach	0.6	2.8	0.6	12
1980er Flachdach	0.7	2.6	0.3	16
1990er Flachdach	0.3	1.6	0.2	16
Passivhaus	0.15	0.8	0.15	16

Abb. 2: Gebäudetypologie, wenn das oberste Stockwerk durch das Dach und nicht durch ein (unbewohntes) Dachgeschoss abgeschlossen wird, ist dieser Gebäudetyp mit „Flachdach“ beschrieben. Die oberste Geschossdecke entspricht dann dem Dach

Fig. 2: Building typology - when the uppermost storey is topped by the roof and not by an (unoccupied) attic, then this type of building is described as being flat-roofed. The ceiling of the uppermost storey is then the roof

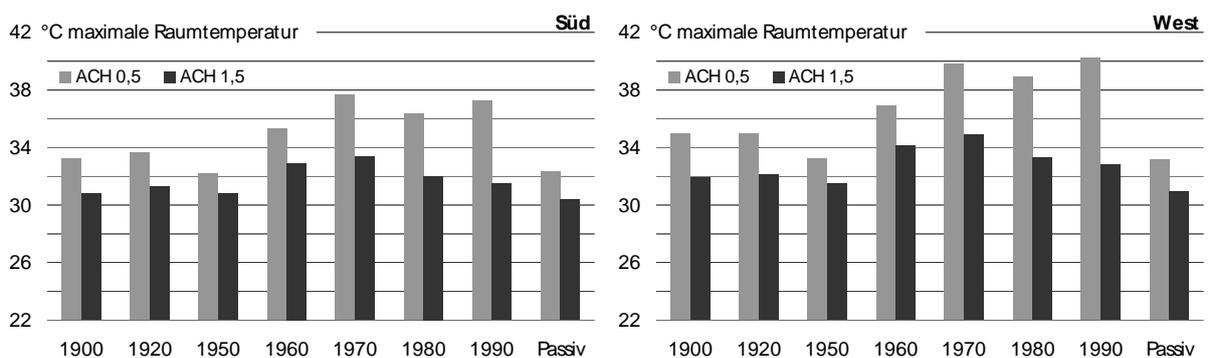


Abb. 3: Maximale operative Raumtemperatur im Sommer für die verschiedenen Baualterstufen und Orientierungen Süd und West

Fig. 3: Maximum operational room temperature in summer for the different ages of the buildings and orientation towards the south and west

Die höchsten Raumtemperaturen stellten sich für die nach Westen ausgerichteten Räume in den Plattenbauten der 70er Jahre und in den Gebäuden aus den 80er und 90er Jahren ein. Ab 1970 sind die Gebäude wärme gedämmt. Das bedeutet, dass hier die Lüftung beim Abtrans-

port der Wärme aus dem Gebäude eine große Rolle spielt. Darüber hinaus sind die Fensterflächenanteile größer als in den früheren Baualterstufen. Fehlender Sonnenschutz bedeutet also höhere solare Wärmelasten und steigende Raumtemperaturen.

Als kritischster Gebäudetyp mit den höchsten zu erwartenden Raumtemperaturen im Sommer wurden die Plattenbauten der 1970er Jahre bewertet. Diese haben charakteristisch die schlechtesten U-Werte (Wärmedurchgangskoeffizient) bei Fenstern und wegen der relativ kleinen Räume einen niedrigeren absoluten Luftwechsel als die Gebäude aus späteren Baualterstufen.

2.1 Test des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell wurde anhand der Berechnung der Innenraumtemperatur für eine Wohnung in Freiburg (Dachgeschoss-Wohnung, innerstädtische Lage) für eine Periode im Sommer 2006 getestet.

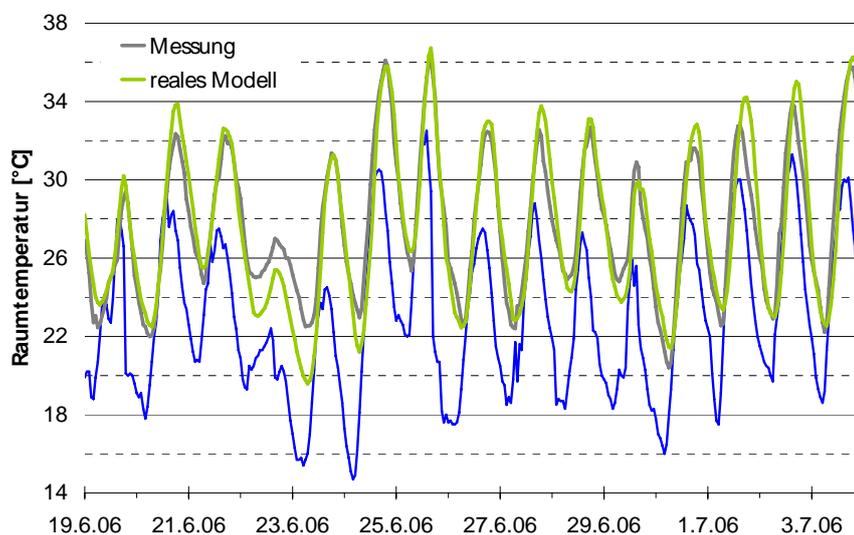


Abb. 4: Messung und Simulation („reales Modell“) der Raumtemperatur in einer Experimentalwohnung

Fig. 4: Measurement and simulation ("realistic model") of the room temperature in an experimental dwelling

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das thermische Raumverhalten in dem Experimentalgebäude ausreichend gut abgebildet wird.

Das „reale Modell“ einer Dachgeschoss-Wohnung wurde mit dem Gebäudetyp „1970er Jahre“ aus der Gebäudetypologie zu einem „operationellen“ Gebäude für das Heizwärmesystem zusammengefasst.

Mit der vorgestellten Vorgehensweise erscheint die Vorhersage von Innenraumtemperaturen in Abhängigkeit von den meteorologischen Außenbedingungen auch unter Berücksichtigung der praktischen Erfordernisse eines operationellen Heizwärmesystems möglich.

Schlußfolgerungen und Ausblick

Das Hitzewarnsystem des Deutschen Wetterdienstes sollte um ein Gebäudesimulationsmodell erweitert werden. Das hierfür verwendete Modell kann die Innenraumtemperatur in Gebäuden in Abhängigkeit von der Außentemperatur berechnen.

Aus Praktikabilitätsgründen wurde mit Hilfe der Aufstellung und Bewertung einer Gebäudeklimatologie sowie der Nutzung eines Datensatzes aus einer Dachgeschoss-Wohnung ein „operationelles“ Gebäude definiert, welches bzgl. der Gebäudesituation in sommerlichen Lagen für die Betrachtung eines „worst case-Szenarios“ geeignet erscheint.

Verknüpft mit der operationellen 3-Tages Wettervorhersage des Deutschen Wetterdienstes soll das System für das v.g. „operationelle“ Gebäude ab Sommer 2007 Vorhersagen der gefühlten Temperatur für Bewohner mit ungünstigem und intelligentem Nutzerverhalten liefern. Es stellt damit eine bedeutende Ergänzung für das bestehende Hitzewarnsystem dar.

Literatur

BECKER, P., 2005: Das Hitzewarnsystem des Deutschen Wetterdienstes: Notfallvorsorge. - Zeitschrift für Katastrophenmanagement und Humanitäre Hilfe: 22-23.

CLARKE, J., 2001: Energy Simulation in Building Design, Butterworth-Heinemann.

PFAFFEROTT, J., 2004: Enhancing the Design and Operation of Passive Cooling Concepts, Fraunhofer IRB Verlag.

Anschrift der Autoren

Dr. Paul Becker, Deutscher Wetterdienst, Medizin-Meteorologie, Stefan-Meier-Str. 4-6,
79104 Freiburg

Dr. Jens Pfafferott, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Heidenhofer Str. 2,
79110 Freiburg

Entwicklung eines astronomischen Verfahrens zur Prognose von zyklonalen und antizyklonalen Strömungen über SW-Deutschland

Sylvia Dorn

Private Forschungsarbeit

Zusammenfassung

Das astronomische Verfahren gründet auf der Korrelation zyklonaler und antizyklonaler Wetterphasen mit den wechselnden Raumordnungszuständen des Sonnensystems aus geozentrischer Sicht. Die Raumordnung wird durch 438 ausgewählte Winkelbildungen (Aspekte) von jeweils zwei Planeten bzw. Raumpunkten zur Erde definiert. Im nächsten Schritt wurde die Häufigkeit des Auftretens dieser Winkel während Hoch- oder Tiefdruckwetterlagen über SW-Deutschland untersucht. Dafür stand ein Datenzeitraum von knapp 14 Jahren zur Verfügung. Rund 26% der Winkel (T-Aspekte) traten gehäuft während zyklonaler, 17 % (H-Aspekte) während antizyklonaler Witterungsperioden auf, und 57 % der Winkel (A-Aspekte) verhielten sich ambivalent. Die zeitliche Dichte des Auftretens der T- und H- Aspekte während zyklonaler und antizyklonaler Wetterphasen wurde anschließend in verschiedenen Wetterabläufen außerhalb ihres Entwicklungszeitraumes statistisch evaluiert. Es zeigte sich eine signifikante Korrelation, so dass diese Aspekte als eine Art „Kosmischer Wetterschlüssel“ aufgefasst werden können und in einem Prognoseversuch seit April 06 erprobt werden. Die ersten 300 Tage des Versuchs wurden ausgewertet und es zeigt sich ebenfalls eine signifikante Korrelation zwischen den prognostizierten und tatsächlich eingetroffenen Atmosphärenströmungen. So könnte die Weiterentwicklung des astronomischen Verfahrens zu einem wichtigen Planungsinstrument für die Forst- und Agrarwirtschaft werden.

Development of an astronomic method for the prediction of cyclonal and anticyclonal flows over SW-Germany

Abstract

The astronomic method is based on the correlation of cyclonal and anticyclonal weather periods with the solar system's changing space states of order, viewed from the earth. The state of order was defined by 438 chosen angles (aspects), which were each built by two planets or space points in relation to the earth. Following, the frequency of their occurrence was investigated during high- or low-pressure phases in the area of SW-Germany. For this purpose data of a 14-year-period were available. Approximately 26 % of the angles (T-aspects) occurred during cyclonal, 17 % (H-aspects) during anticyclonal weather periods and 57 % of the angles (A-aspects) were ambivalent. Subsequently the temporal density of occurrence of the T- and H-aspects was statistically evaluated in different weather periods beyond their developing data. This led to a significant correlation. Hence the examined aspects can be understood as a kind of „cosmic weather-key“ and are right now tested in a forecast experiment since April 06. The first 300 days of the test have already been evaluated and the data also show a significant correlation between predicted and real atmospheric flows. Therefore the further development of this astronomic method could be a chance to achieve an important instrument for planning in forestry and rural economy.

1. Einleitung: Die Erde – ein lebender Organismus

Die Erde ist als einziger Himmelskörper unseres Sonnensystems mit einer biologisch lebendigen Natur ausgestattet, die sich von der mineralisch festen Oberfläche über die Gewässer bis in die atmosphärische Lufthülle hinein ausbreitet. Für lebendige Organismen ist es typisch Entitäten zu bilden, die an ihre Umgebung angepasst sind und mit dieser in Wechselwirkung

stehen. So wie für Pflanzen, Tiere und Menschen z.B. die Lufthülle die natürliche Umgebung darstellt, mit der sie durch die Atmung in lebensnotwendigem Austausch stehen, so bildet der planetare Raum des Sonnensystems die natürliche Umgebung des Erdorganismus. Dieser Raum ist hauptsächlich durchdrungen von den Teilchenemanationen der Sonne, sowie von elektromagnetischen und Gravitationsfeldern, die durch die stetigen Bewegungen der Planeten ein ständig sich änderndes Strukturmuster bilden. Die Atmosphäre der Erde geht in 500 bis 1000 km Höhe kontinuierlich in den Weltraum über und es wäre durchaus denkbar, dass ihre Strömungen zu der wechselnden Raumordnung des Sonnensystems in Korrelation stehen.

2. Zusammenhang der Konstellationen des Sonnensystems mit zyklonalen und antizyklonalen Wetterlagen über einem bestimmten Ort

Um zu überprüfen, ob ein Zusammenhang der Konstellationen des Sonnensystems mit den Wetterverhältnissen über SW-Deutschland besteht, wurde ein Winkelsystem zu Grunde gelegt, das schon KEPLER (1602) benutzte und dessen Winkel in der Geometrie des Kreises harmonische Verhältnisse bilden: 0° , 30° , 45° , 60° , 72° , 90° , 120° , 135° , 144° , 150° , 180° . Diese Winkel wurden angewendet auf die geozentrisch bestimmten, ekliptikalen Koordinaten der Raumkörper bzw. -punkte Sonne, Merkur, Venus, Mars, Jupiter, Saturn, Chiron, Uranus, Neptun, Pluto, mittleres Mondapogäum, sowie ab- und aufsteigender mittlerer Mondknoten. Diese Winkel werden als Aspekte bezeichnet.

Bildet man alle angegebenen Winkel mit allen genannten Raumkörpern und -punkten, so ergeben sich 823 verschiedene Aspekte, von denen aber nur die 438 Winkel der Sonne und der schnell laufenden Planeten (bis Mars) mit allen Raumkörpern und -punkten untersucht wurden. Diese Schnellläufer-Aspekte treten mindestens alle ein bis zwei Jahre auf. Die Langsamläuferaspekte (ab Jupiter) wiederholen sich dagegen meist erst in mehrjährigen Abständen und wurden daher noch nicht in die Untersuchung einbezogen.

Die genauen Zeitpunkte, an denen die geozentrischen Winkel exakt sind, wurden in dieser Arbeit über ein Computerprogramm (WARM, 2005) errechnet, das mit den NASA-Daten der Planetenbahnen arbeitet und die Lichtlaufzeit, die Aberration und die Nutation der Erde berücksichtigt.

2.1 Problematik der Ermittlung des Zusammenhangs der Konstellationen mit den Wetterlagen

Jeden Tag treten in der Regel mehrere Aspekte auf, d.h. ein einzelner Aspekt erscheint meist in Kombination mit anderen Aspekten, und er kommt nicht ausschließlich nur bei zyklonalen oder antizyklonalen Luftströmungen vor.

Zur Überprüfung des Zusammenhangs der Konstellationen des Sonnensystems mit den Wetterverhältnissen müsste nun bei jedem einzelnen Aspekt ermittelt werden, ob er signifikant häufiger zusammen mit zyklonalen oder mit antizyklonalen Luftströmungen auftritt. Hierzu bräuchte man von jedem Aspekt eine ausreichend große Stichprobe, um die Zuordnung des Aspektes zu Hoch- oder Tiefdruckgebieten zufallskritisch abzusichern. Dies bedeutet in der Praxis, dass man mehrere Jahrhunderte an Wetteraufzeichnungen an einem bestimmten Ort benötigen würde, da die Aspekte, wie bereits erwähnt, sich zu selten wiederholen und in immer wieder anderen Kombinationen.

Es standen für diese Arbeit 14 jährige Wetteraufzeichnungen in Durbach/SW-Deutschland zur Verfügung mit vier täglichen Luftdruckwerten, den täglichen Temperaturminima und -maxima, tägliche kurze Wetterbeschreibungen, sowie eine (meist) tägliche Notiz zur Großwetterlage über Europa.

Eine direkte zufallskritische Bestimmung des Zusammenhangs einzelner Konstellationen mit den zyklonalen oder antizyklonalen Luftströmungen ist bei diesem Zeitraum, wie oben begründet, nicht möglich. Daher wurden nun in einem ersten Schritt die einzelnen Aspekte aus dem zur Verfügung stehenden Zeitraum den Luftströmungen durch Handanalyse zugeordnet, um dann erst in einem zweiten Schritt, über ihr gemeinsames Auftreten in zyklonalen und antizyklonalen Wetterphasen, den Zusammenhang der Konstellationen mit den Wetterverhältnissen statistisch zu evaluieren.

2.2 Ermittlung der H- und T-Aspekte

Es sollte nun im ersten Schritt an dem Standort Durbach (die nächste DWD-Station ist Lahr) die Frage beantwortet werden, ob es bestimmte Aspekte gibt, die bevorzugt gemeinsam mit zyklonaler oder antizyklonaler Witterung auftreten.

Zur Verfügung stand ein Wetteraufzeichnungszeitraum in Durbach von August 1991 bis Mai 2005. Jeder der 438 Schnellläufer-Aspekte wurde während des fast 14-jährigen Zeitraumes, soweit möglich, im Durchschnitt etwa 20 mal an seinen Erscheinungstagen aufgesucht und durch Handanalyse auf die Strömungsart der Wetterlage, die Luftdruckhöhe und den Luftdruckverlauf überprüft. Bei bevorzugtem Auftreten der Aspekte zusammen mit zyklonalem Strömungsverhalten der Atmosphäre wurde der Winkel als **T**-Aspekt bezeichnet, mit antizyklonalem Strömungsverhalten als **H**-Aspekt. Winkel, die keine deutliche Präferenz zu einem bestimmten Strömungsverhalten aufwiesen, wurden als ambivalente **A**-Aspekte notiert.

Von den 438 Aspekten ergaben sich 56,6 % als A-, 26,3 % als T- und 17,1 % als H-Aspekte (Stand Juli 06).

In Tabelle 3 sind die H-, T- und A-Aspekte des Planeten Merkur als Auszug aus dem „Kosmischen Wetterschlüssel SW-Deutschland“ aufgeführt (Stand Juli 06)

Tab. 1: Auszug aus dem Kosmischen Wetterschlüssel für SW-Deutschland

Tab. 1: Extract of the Cosmic Weather Key of SW-Germany

Aspekt	0°	30°	45°	60°	72°	90°	120°	135°	144°	150°	180°
	Merkur										
Venus	A	T	T	A	A(T)						
Sonne	H										
Mars	A(T)	A	H	A	A	H	T	H	H	A	A(T)
Jupiter	T	A	A	A	H	A	A	A	T	T	A
Saturn	A	A	A	H	H	H	A	A	H	T	H
Uranus	A	A	T	T	H	H	T	A	T	H	T
Neptun	H	T	T	T	A	H	A	A	T	A	A
Pluto	H	A	A	T	A	A	A	A(T)	A	A	T K
Chiron	A	A	T	A	H	A	T	T	A	A(T)	A(T)
Mondapogäum	A	A	A	T	A	T	T	H	T	A	T
Mondk. aufst.	A	A	A	H	A	A	A	A	A	A	A
Mondk. abst.	A	A	A	A	A	A	H	A	A	A	A

2.3 Evaluation der H- und T-Aspekte

Wenn die T- und H-Aspekte tatsächlich in Zusammenhang stehen mit zyklonalen oder antizyklonalen Wetterphasen über SW-Deutschland, dann muss im Mittel die Dichte des Auftretens der H-Aspekte in Hochwetterlagen größer sein als in Tiefwetterlagen, und es muss das Umgekehrte gelten für die Dichte der T-Aspekte.

Dies wurde überprüft an einem Zeitraum von insgesamt zwei Jahren: von Juni 2005 bis Mai 2006, sowie von Januar bis März 1979, April bis Juni 1976, Juli bis September 1980, Oktober bis Dezember 1982. Die Daten und die Frankfurter Wetterkarten der jeweiligen Monate von 1976 bis 1982 hat Herr Werner Brockhaus von seiner privaten Wetterstation in Horben/SW-Deutschland freundlicher Weise zur Verfügung gestellt. In seinem Beisein wurden diese Monate ausgewählt und zu einem künstlichen Jahr zusammengesetzt, um zu sehen, ob der Zusammenhang in jedem zufällig gewählten Zeitraum sichtbar wird, und nicht der Duktus eines bestimmten Jahres maßgebend ist. Um diesen Zeitraum nachher eventuell mit anderen Jahren vergleichen zu können, wurden genau 12 Monate entsprechend den 4 Jahreszeiten ausgewählt. Die Auswahl der Jahre erfolgte jedoch zufällig.

Es wurde nun für jeden Monat die Anzahl der H- und T-Aspekte in den einzelnen Wetterphasen mit überwiegend zyklonaler oder überwiegend antizyklonaler Strömung über SW-Deutschland festgestellt. Die Anzahl der H- und T-Aspekte wurde dann durch die Gesamtdauer (in Tagen) der zyklonalen bzw. antizyklonalen Witterungsperioden eines Monats dividiert. So erhält man für jeden Monat einen mittleren Dichtewert pro Tag der H- und T-Aspekte in Hoch- oder Tiefwetterlagen.

Tab. 2: Monatliche mittlere Dichte pro Tag der H-Aspekte bei Hoch- und Tiefwetterlagen

Tab. 2: Monthly mean density per day of H-aspects at anticycl. and cyclonal weather periods

Monat	01 79	02 79	03 79	04 76	05 76	06 76	07 80	08 80	09 80	10 82	11 82	12 82
Dichte H-Asp. bei H-Wetter Anzahl/Tag	0,20	0,56	0,83	0,26	0,20	0,32	0,21	0,36	0,35	0,32	0,23	0,42
Dichte H-Asp. bei T-Wetter Anzahl/Tag	0,38	0,19	0,20	0,15	0,26	0,00	0,38	0,30	0,30	0,28	0,19	0,26
Monat	06 05	07 05	08 05	09 05	10 05	11 05	12 05	01 06	02 06	03 06	04 06	05 06
Dichte H-Asp. bei H-Wetter Anzahl/Tag	0,35	0,13	0,31	0,65	0,36	0,36	0,00	0,29	0,31	0,13	0,43	0,65
Dichte H-Asp. bei T-Wetter Anzahl/Tag	0,31	0,13	0,14	0,15	0,24	0,13	0,22	0,30	0,27	0,22	0,00	0,64

Die mittlere Dichte der H-Aspekte beträgt in den Hochwetterlagen 0,34 und in den Tiefwetterlagen 0,24 Aspekte pro Tag. Um zu überprüfen, ob dieser Unterschied bei der gegebenen Datenmenge signifikant ist, wird der für verhältnisskalierte Mittelwerte geeignete t-Test (vgl. SCHÖNWIESE, 2000) durchgeführt. Es ergibt sich, dass der Unterschied mit $t = 2,344$ und $p = 0,023$ bei einem α -Niveau von 5% (2-seitig) signifikant wird.

Errechnet man hierzu den entsprechenden Korrelationskoeffizienten (punkt-biserial), beträgt dieser 0,361.

Tab. 3: Monatliche mittlere Dichte pro Tag der T-Aspekte bei Hoch- und Tiefwetterlagen

Tab. 3: Monthly mean density per day of T-aspects at anticycl. and cyclonal weather periods

Monat	01 79	02 79	03 79	04 76	05 76	06 76	07 80	08 80	09 80	10 82	11 82	12 82
Dichte T-Asp. bei H-Wetter Anzahl/Tag	0,00	0,44	0,33	0,31	0,40	0,41	0,21	0,18	0,45	0,47	0,15	1,00
Dichte T-Asp. bei T-Wetter Anzahl/Tag	0,95	0,81	0,52	0,62	0,26	0,50	0,38	0,80	0,70	0,33	0,75	0,58
Monat	06 05	07 05	08 05	09 05	10 05	11 05	12 05	01 06	02 06	03 06	04 06	05 06
Dichte T-Asp. bei H-Wetter Anzahl/Tag	0,41	0,25	0,31	0,29	0,43	0,21	0,25	0,52	0,54	0,25	0,50	0,55
Dichte T-Asp. bei T-Wetter Anzahl/Tag	0,46	0,61	0,29	0,62	0,65	0,50	0,52	0,90	0,60	0,48	0,63	0,82

Im Mittel beträgt die Dichte der T-Aspekte in den Tiefwetterlagen der 24 Monate 0,60, in den Hochwetterlagen hingegen nur 0,37 Aspekte pro Tag. Dieser Unterschied wird mit $t = 4,144$ und $p = 0,000$ bei einem α -Niveau von 5 % (2-seitig) höchst signifikant.

Der punkt-biseriale Korrelationskoeffizient beträgt 0,575 .

So ist es also sinnvoll, wie in Tab.3 für SW-Deutschland einen kosmischen Wetterschlüssel zu erstellen, der gewissermaßen eine Codierung für die Impulsierung zyklonaler oder antizyklonaler Luftströmungen über dieser Region darstellt, und der für Prognosen verwendet werden könnte.

3. Prognoseversuch mit dem Kosmischen Wetterschlüssel

Ab April 2006 läuft ein Prognoseversuch, der mindestens über ein Jahr durchgeführt werden soll. Die Prognosen ab Mai 2006 wurden vorzeitig auf dem Notariat Offenburg hinterlegt, der erste Prognosemonat April bei dem Physiker D. Weinmann, Universität Strasbourg.

Prognostiziert wurde für jeden Tag die Strömungsart: zyklonal = überwiegend Tiefwetterlage (TWL) oder antizyklonal = überwiegend Hochwetterlage (HWL). Die einzige Prognosegrundlage bildeten die 438 evaluierten Schnellläufer-Aspekte. Die wenigen, in diesem Zeitraum auftretenden Langsamläufer-Aspekte wurden teilweise in die Prognose mit einbezogen, wenn schon Erfahrungen der Autorin mit ihnen vorlagen.

3.1 Auswertung der Prognosen von April 06 bis Januar 07

Die Auswertung für jeden einzelnen Tag erfolgte anhand der Berliner Wetterkarten. Es wurden Statistiken für die Bodenkarten 0 UTC und 12 UTC, sowie für die 500-hpa-Karte erstellt. Der Isobaren- bzw. Isohypsenverlauf über SW-Deutschland wurde als Hauptkriterium für eine Zuordnung zu Hoch- oder Tiefwetterlagen angesehen. Während für die 12-UTC-Bodenkarte und die 0-UTC-500-hpa-Karte nur die Momentaufnahme der Strömung zu diesem

Zeitpunkt in die Statistik eingingen, wurde bei der 0-UTC-Bodenkarte noch zusätzlich darauf geachtet, ob der Tag bei Wetterwechsel überwiegend als HWL oder TWL angesehen werden kann.

Tab.4: Anzahl der richtig prognostizierten Tage pro Monat für die drei Wetterkarten

Tab. 4: Number of the correct predicted days per month for the three weather maps

Monat	04 06	05 06	06 06	07 06	08 06	09 06	10 06	11 06	12 06	01 07
Bodenkarte 0 UTC	21	19	18	21	16	16	19	24	20	20
Bodenkarte 12 UTC	19	17	15	19	19	18	23	20	19	19
500 hpa-Karte 0 UTC	21	23	14	22	16	21	22	21	16	19

Tab.4 ergibt, dass für die 0-UTC-Bodenkarte pro Monat im Mittel 19,4 Tage richtig prognostiziert wurden, für die 12-UTC-Bodenkarte sind es 18,8 Tage und für die 500-hpa-Karte 19,5 Tage.

Die 12-UTC-Karte unterscheidet sich von der 0-UTC-Karte dadurch, dass ihre Isobaren nicht in 5 hpa, sondern in 1 hpa skaliert sind. Besonders im südwestdeutschen Mittelgebirgs- und Voralpenraum bilden sich manchmal klein skalierte Druckgebilde aus, die gegenläufig zur Großwetterlage sind, aber in ihr meist nur eine untergeordnete Wetterwirksamkeit zeigen.

3.2 Evaluation der Prognosen von April 06 bis Januar 07

Um festzustellen, ob bei der gegebenen Datenmenge von rund 300 Tagen ein signifikanter Zusammenhang zwischen den prognostizierten und den tatsächlich eingetretenen Wetterlagen besteht, wurde die punkt-tetrachorische Korrelation errechnet, die aus der Produkt-Moment-Korrelation (vgl. Schönwiese, 2000) ableitbar ist und wie diese bewertet werden kann.

Für alle drei Wetterkarten ergab sich, dass die Korrelation mit Koeffizienten von 0,266 (Boden 0 UTC), 0,264 (Boden 12 UTC) und 0,303 (500 hpa) zwar noch relativ schwach ausgeprägt, aber mit $p = 0,000$ höchst signifikant ist.

4. Schlussfolgerungen

Die dargestellten Ergebnisse zeigen klar, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Wetterverlauf und den auftretenden H- und T- Aspekten gibt. Aus den bisherigen Erfahrungen ist anzunehmen, dass dieser Zusammenhang umso genauer wird, je mehr Aspekte erfasst werden können. Die bisher verwendeten Planetenwinkel machen nur einen Bruchteil der Aspekte aus, die für den weiteren Aufbau einer Kosmometeorologie in Frage kommen. Neueste Überprüfungen haben gezeigt, dass nicht nur die Winkelbildungen mit Pluto, der bereits in die Statistik mit einbezogen wurde, sondern auch die mit einigen anderen Zwergplaneten des Kuiper- sowie des Asteroidengürtels mit Hoch- und Tiefdruckwetterlagen markant korreliert sind.

Die physikalische Raumwirkung auf die Lufthülle der Erde, die mit diesen bestimmten Winkelbildungen einhergeht, ist bisher noch unbekannt. Wahrscheinlich ist es sinnvoll, hier allgemein von einer Impulswelle zu sprechen, die sich beim Exaktwerden eines Aspekts in der Atmosphäre um die Erde herum manifestiert und über bestimmten Regionen die Luftmassen auf- oder absteigen lässt und somit die physikalischen Prozesse von zyklonalen und anti-zyklonalen Strömungen auslöst. Die in dieser Arbeit bisher erfasste Impulszuordnung zu den Planetenwinkeln für SW-Deutschland ist noch verhältnismäßig unscharf, da zunächst einmal das komplizierte Puzzle grundsätzlich für einen Ort gelöst werden musste. Jeder H- oder T-

Aspekt hat im Moment des Exaktwerdens wahrscheinlich ganz bestimmte Regionen, an denen sein Luftdruckimpuls maximal oder minimal wird. Es wäre wichtig, solche genauen Lokalisierungen zu bestimmen.

Ein astronomisches Verfahren zur Langzeitprognose von Hoch- und Tiefdruckwetterlagen könnte bei der zunehmenden Klimaerwärmung zu einem wichtigen Planungsinstrument für die Agrar- und Forstwirtschaft werden. Für die Forschung der Zukunft könnte sich durch diese neuen kosmometeorologischen Erkenntnisse ein ganz neuer Zusammenhang der Biosphäre der Erde mit der dynamischen Raumordnung des Sonnensystems erschließen. Andererseits wird es auch möglich, historische Extremwetterereignisse unter kosmometeorologischen Gesichtspunkten zu untersuchen, um zukünftige Ereignisse besser prognostizieren zu können.

Literaturverzeichnis

KEPLER, J., 1602: Gesammelte Werke Bd.4 (1941). - München: Bayerische Akademie der Wissenschaften.

WARM, H., 2005: Programm Dorn [Computer Software]. - Hamburg: Keplerstern Verlag.

SCHÖNWIESE, C. D., 2000: Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. - Stuttgart: Gebrüder Bornträger

Anschrift der Autorin

Dipl.-Met. Sylvia Dorn, Hespengrund 6, D-77770 Durbach

Zusammenhang zwischen meteorologischen Parametern und Lungenfunktionsmessungen bei Patienten mit chronisch obstruktiver Lungenerkrankung (COPD)

Eva R. Wanka¹, Bernhard Werner², Michael Pfeifer², Rudolf A. Jörres¹ und Dennis Nowak¹

¹Institut für Arbeits- und Umweltmedizin der Ludwig-Maximilians-Universität München,

²Krankenhaus Donaustauf, Fachklinik für Erkrankungen der Atmungsorgane

Zusammenfassung

Es gibt Hinweise, dass der klinische Zustand von Patienten mit chronisch-obstruktiver Lungenerkrankung vom Wetter abhängig ist. Da diese Berichte kein einheitliches Bild zeigen, wurde bei 117 Patienten des telemedizinischen Projektes in Donaustauf die Variation der bis zu viermal täglich über meist mehr als 1,5 Jahre häuslich erfassten Lungenfunktion auf individueller Basis ausgewertet. Nach einer Qualitätskontrolle wurden Langzeittrends eliminiert und individuelle Zeitreihen- sowie Korrelationsanalysen durchgeführt. Einzelne meteorologische Parameter und biometeorologische Wetterklassen beschrieben den Zustand der Atmosphäre, Luftschadstoffe (PM₁₀, NO₂, O₃) wurden als Kovariaten berücksichtigt. Die Auswertungen zeigten eine erhebliche Heterogenität der Beziehung zwischen Lungenfunktions- und verschiedenen meteorologischen Parametern. Die hauptsächlichen Zusammenhänge bestanden mit Temperatur, Jahreszeit und Wetterklassen. Individuelle Kovarianzanalysen der Lungenfunktionsparameter ließen verschiedene unabhängige Variablen als mögliche Ursache für Veränderungen der Lungenfunktion erkennen. Bei einigen Patienten ergaben sich auch Interaktionen zwischen beispielsweise Jahreszeit und Temperatur. Ähnlich unterschiedliche Reaktionen zeigten sich in Bezug auf Luftschadstoffe. Die Ergebnisse zeigen erstmals, dass die Effekte von meteorologischen Parametern und Luftschadstoffen von Patient zu Patient unterschiedlich sind. Somit ist es ratsam, in longitudinalen Studien von Patienten mit COPD individuelle Analysen durchzuführen.

Relationship between meteorological parameters and lung function measurements in patients with chronic obstructive pulmonary disease

Abstract

Current evidence suggests that the clinical state of patients with chronic obstructive pulmonary disease can depend on weather. However, reports by clinicians and patients do not fully agree upon the specific conditions. We hypothesised that the associations might differ between individuals and thus analysed the individual variation of home-based lung function measurements in 117 patients participating in the telemedicine project at the Hospital Donaustauf. Patients measured lung function up to 4 times per day over at least 1.5 years. Insufficient tests were discarded by quality control, long-term trends removed and individual time series and analyses of covariance performed. The actual condition of the atmosphere was described by various parameters and biometeorological weather classes, and air pollutants (PM₁₀, NO₂, O₃) were included as covariates. There was considerable heterogeneity in the relationship between lung function and meteorological parameters (mainly temperature, season and weather classes). Individual analyses of covariance of lung function revealed several variables as independently related to lung function variability, among them season and temperature as well as air pollutants. These data demonstrated for the first time individual differences in the effects of environmental factors. As a consequence, the individual analysis within longitudinal follow-up seems to be most appropriate in patients with COPD.

1 Einleitung

Die klinische Erfahrung zeigt, dass Patienten mit chronischen Atemwegserkrankungen immer wieder über einen Zusammenhang zwischen ihrem akuten Gesundheitszustand und dem Wetter berichten. Das Wetter bewirkt in der Regel nicht unmittelbar Erkrankungen, kann aber an Schwachstellen des Organismus angreifen. Zu diesen Schwachstellen zählen insbesondere chronische Atemwegserkrankungen wie Asthma oder COPD (chronisch-obstruktive Atemwegserkrankung). Besondere Bedeutung sind hierbei Temperatur, Feuchtigkeit und Sauerstoffpartialdruck bzw. Luftdruck beizumessen. Die Beschwerden der Patienten treten vorzugsweise bei kalter, feuchter Witterung oder Nebel auf, aber auch Gewitter scheinen auf den Zustand der Atemwege Einfluss zu nehmen. Studien, welche die Einflussfaktoren auf chronische Atemwegserkrankungen untersuchten, befassten sich in der Regel mit Luftschadstoffen und seltener mit meteorologischen Parametern. Vor allem jedoch wurde in vorangegangenen Studien der Zusammenhang zwischen Wetter und klinischem Zustand bei Patienten mit COPD oder Asthma bronchiale nur für Gruppen von Patienten untersucht. Bei derartigen Analysen gehen der individuelle Krankheitsverlauf und die individuelle Reaktionsbereitschaft, die zwischen den Patienten verschieden sein können, als Analysevariablen verloren. Ferner wurden meteorologische Parameter im Rahmen von Studien, die sich mit dem Einfluss von Luftschadstoffen beschäftigten, lediglich als Kovariate berücksichtigt. Eine Publikation zum Thema COPD und Wetter stammt aus dem Jahr 1999. DONALDSON et al. (1999) untersuchten ein Jahr lang (1995-1996) den Zusammenhang verschiedener Spirometerwerte (PEF, FEV₁ und FVC nach Bronchodilatator-Inhalation) bei 76 Patienten mit mittel- bis schwergradiger COPD in London mit Schlafzimmer- und Außentemperatur, relativer Feuchte und Windgeschwindigkeit. Die Lungenfunktionsparameter waren hier positiv mit der Schlafzimmer- und Außentemperatur korreliert, jedoch nicht mit relativer Feuchte und Windgeschwindigkeit; zwischen FVC und relativer Feuchte war ein negativer Zusammenhang nachweisbar, zwischen PEF und Windgeschwindigkeit ein positiver. Studien, die weitere meteorologische Parameter untersucht und mit Lungenfunktionsparametern korreliert haben, sind zumindest in der publizierten Literatur nicht zu finden. Daher ermittelten wir für jeden Patienten die individuelle Beziehung zwischen der Variabilität der Lungenfunktion und meteorologischen Parametern sowie Luftschadstoffen.

2 Methodik

Um die Zeitskalen der länger- und/oder kurzfristigen Änderungen zu bestimmen, wurde retrospektiv ein longitudinaler Datensatz von 117 Patienten mit COPD des telemedizinischen Projektes des Krankenhauses Donaustauf (Fachklinik für Erkrankungen der Atmungsorgane) ausgewertet. Im Zeitraum vom 1.09.2001 bis 31.08.2005 registrierten die Patienten über meist mehr als 1,5 Jahre bis zu 4mal täglich (morgens und nachmittags/abends jeweils vor und nach Medikation) die Lungenfunktion mit einem elektronischen Spirometer (AM1 der Firma Jaeger/Viasys Healthcare, 2004). Dabei wurden unter anderem die Parameter PEF, FEV₁ und FVC erfasst. Das Telemedizinzentrum stellte neben Daten zu Person und Krankheit sowie Ergebnissen der einschließenden Untersuchungen die Lungenfunktionsmessungen der Patienten anonymisiert bereit. Insgesamt lagen Angaben zu Geschlecht, Alter, Wohnort, Körpergröße und -gewicht, Schweregrad der COPD (GOLD I-IV; GOLD-Guidelines, 2001, 2003, 2004), Medikation und Begleiterkrankungen zu Beginn der Teilnahme, FEV₁ bestimmt bei einer unter Aufsicht durchgeführten Lungenfunktion vor.

Der Zustand der Atmosphäre wurde beschrieben durch biometeorologische Wetterklassen (BUCHER, 2003) und einzelne meteorologische Parameter (Luftdruck, Lufttemperatur, Taupunkttemperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, gefühlte Temperatur als Stundenmittelwerte sowie Gewitter). Diese wurden vom Deutschen Wetterdienst für die Station Re-

gensburg zur Verfügung gestellt. Vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz wurden für 10 Stationen (in der Nähe der Wohnorte der Patienten) die Halbstundenmittelwerte der Luftschadstoffe Stickstoffdioxid (NO₂), Ozon (O₃) und Staub (PM₁₀) zur Verfügung gestellt. Weiterhin wurden an diesen Stationen auch meteorologische Parameter (Luftdruck, Temperatur, relative Feuchte, Windrichtung und Windgeschwindigkeit) erhoben und ebenfalls als Halbstundenmittelwerte zur Verfügung gestellt. Sowohl die Messwerte des Deutschen Wetterdienstes als auch die des Landesamtes für Umweltschutz wurden analog zum Vorliegen der Wetterklassen in zwei Tageshälften (0-12 und 12-24 Uhr) stratifiziert. Für beide Tageshälften wurde jeweils Mittelwert, Minimum und Maximum aus den Halbstunden- bzw. Stundenwerten berechnet. Zusätzlich wurden die Differenzen zwischen zwei Halbtagen berechnet (Abend zu Morgen und Morgen zu Abend).

Bevor eine Auswertung auf individueller Basis durchgeführt werden konnte, musste sichergestellt werden, dass definitiv falsche Fluss-Volumen-Kurven (Lungenfunktionsmessung) nicht mit analysiert werden. Dazu wurde jede einzelne Spirometermessung einer einfachen Plausibilitätskontrolle unterzogen und erkennbar falsche Fluss-Volumen-Kurven gelöscht. Anschließend wurden für die qualitätskontrollierten Daten auf individueller Basis gleitende Mittelwerte berechnet. Zur Trendbereinigung wurde die lineare Regression mit PEF bzw. FEV₁ und FVC als abhängiger und dem Datum als unabhängiger Variable angewendet. Anschließend wurde der Datensatz mit allgemeinen linearen univariaten Modellen analysiert. Wiederum dienten PEF bzw. FEV₁ und FVC als abhängige Variable und meteorologische Parameter und Luftschadstoffe sowie deren Änderungen als Kovariate; Jahreszeit und Wetterklassen gingen als Konstante mit in das Modell ein. Zur Ermittlung signifikanter Zusammenhänge zwischen der Variation der einzelnen Parameter der Lungenfunktion sowie den meteorologischen Parametern und Luftschadstoffen wurde individuell für jeden Patienten eine Kovarianzanalyse (ANCOVA) durchgeführt. Auch hier wurden die meteorologischen Parameter sowie deren Änderungen und Luftschadstoffe als Kovariaten, Jahreszeit und Wetterklassen als Konstante eingeschlossen. Für die Luftschadstoffe wurde zusätzlich eine Zeitverzögerung (lag) von einem Tag untersucht. Interaktionen wurden zwischen Jahreszeit bzw. Wetterklasse und gefühlter Temperatur, Luftdruck sowie relativer Feuchte eingeführt.

3 Ergebnisse

Für den Zeitraum vom 01.09.2001 bis 1.08.2005 lagen von 117 Patienten (90 männlich) häuslich durchgeführte Lungenfunktionsmessungen vor. Im Mittel nahmen die Patienten an 1.138 Tagen am telemedizinischen Projekt teil. Insgesamt führten die Patienten 392.306 Lungenfunktionsmessungen durch, von denen 300.385 in den Zeitfenstern Morgen (6-10 Uhr) und Abend (16-22 Uhr) lagen. Mehrfach hintereinander gemessene Lungenfunktionen wurden eliminiert, so dass 246.253 Messungen der Qualitätskontrolle unterzogen werden konnten. Durch die Qualitätskontrolle musste 1/5 der Messungen vor der Auswertung verworfen werden, so dass 194.136 auswertbare Messungen vorlagen.

Es zeigten sich – insbesondere bei den PEF-Werten – individuell unterschiedliche Variationen der Lungenfunktion auf verschiedenen Zeitskalen. Neben kurzzeitigen Schwankungen, die vermutlich mitarbeitsbedingt waren, traten Variationen auf einer Zeitskala von mehreren Wochen, sowie Langzeitänderungen auf. Einige Patienten wiesen über den Beobachtungszeitraum relativ stabile Werte auf, andere verschlechterten sich stetig oder stufenweise. Die statistische Analyse der Lungenfunktionsmessungen in Bezug zu den biometeorologischen Wetterklassen zeigte ein ebenso heterogenes Bild wie die individuellen Verläufe der einzelnen Lungenfunktionsparameter. Bei einigen Patienten gab es kaum Veränderungen bezüglich der Messwerte während der unterschiedlichen Wetterklassen. Hoch- und/oder Tiefdruckgebiete wiesen individuell unterschiedlich keine, eine positive oder eine negative signifikante Verän-

derung zu den einzelnen Lungenfunktionsparametern auf, aber auch der Durchgang von Warm- und/oder Kaltfronten brachte signifikante Verbesserungen oder Verschlechterungen der Messwerte einzelner Lungenfunktionsparameter. Die Beziehungen zwischen Lungenfunktionsparametern und biometeorologischen Wetterklassen deuteten darauf hin, dass der Gesamtzustand der Atmosphäre einen Einfluss auf die Lungenfunktion der Patienten mit COPD hat.

Mit Hilfe der Kovarianzanalyse konnten mögliche einzelne meteorologische Parameter identifiziert werden, die für Veränderungen von PEF, FEV₁ und FVC verantwortlich waren. Auch bei den Ergebnissen der Kovarianzanalyse zeigte sich eine erhebliche Heterogenität der Beziehung zu verschiedenen meteorologischen Parametern. Hier wurde deutlich, dass sich beispielsweise bei hohen Lufttemperaturen die Lungenfunktionsparameter einiger Patienten verbesserten, wohingegen sie sich bei anderen Patienten verschlechterten oder unbeeinflusst blieben. Ebenso verhielt es sich mit weiteren meteorologischen Parametern. Auch der Zusammenhang mit dem Luftdruck zeigte zu allen Messzeitpunkten auffallend viele statistisch inverse Zusammenhänge für die PEF-Werte. Für FEV₁ und FVC traten dagegen deutlich mehr statistisch signifikante positive Zusammenhänge auf, es kam also bei den Patienten zu einer Verbesserung der Parameter FEV₁ und FVC unter Einfluss von hohem Luftdruck zu allen Messzeitpunkten. Einen großen Einfluss hatte auch die relative Feuchte; hier zeigten sich für alle Lungenfunktionsparameter zu allen Messzeitpunkten fast gleich viele statistisch positive wie negative signifikante Veränderungen. In der Mehrzahl der Fälle war die Lungenfunktion im Frühjahr besser (größere Zahl statistischer Signifikanzen) als in Sommer und Herbst, jedoch kamen auch gegenteilige Beziehungen vor. Individuelle Kovarianzanalysen der Lungenfunktionsparameter ließen verschiedene unabhängige Variablen als mögliche Ursachen für Veränderungen der Lungenfunktion erkennen.

Im Rahmen der Kovarianzanalyse wurden auch die Interaktionen zwischen Jahreszeiten und gefühlter Temperatur sowie Luftdruck oder relativer Feuchte betrachtet. Insbesondere für gefühlte Temperatur und relative Feuchte zeigte sich eine große Anzahl statistisch positiver wie negativer Signifikanzen der drei Lungenfunktionsparameter während der unterschiedlichen Jahreszeiten. Auffallend waren die statistisch positiv signifikanten Zusammenhänge zwischen PEF zu allen Messzeitpunkten und der Interaktion Jahreszeit mit gefühlter Temperatur. Auch für die beiden anderen Parameter überwogen die statistisch positiven Signifikanzen gegenüber den Negativen. Bei einigen Patienten ergab sich beispielsweise im Mittel eine Verbesserung im Sommer, zugleich bestanden jedoch negative oder positive Zusammenhänge mit der gefühlten Temperatur im Sinne der Interaktion zwischen Jahreszeit und gefühlten Temperatur. Im Frühling nahm zusätzlich der Luftdruck Einfluss auf die Lungenfunktionsparameter, und statistisch positive oder negative Signifikanzen traten für alle Parameter zu allen Messzeitpunkten auf. Die relative Feuchte hatte hauptsächlich im Frühling und Sommer einen bedeutenden Einfluss auf die Lungenfunktionsparameter. Im Frühling traten vermehrt statistisch signifikante Verschlechterungen für alle drei Parameter zu allen Messzeitpunkten ein, im Sommer war das Verhältnis zwischen statistisch positiven und negativen Signifikanzen für alle Messzeitpunkte und Parameter ausgeglichen.

Ähnlich individuell unterschiedliche Reaktionen wie für die einzelnen meteorologischen Parameter zeigten sich für die Lungenfunktionsparameter im Rahmen der Kovarianzanalyse in Bezug auf Luftschadstoffe (NO₂, O₃, PM₁₀). Im Vergleich zu den Luftschadstoffen gab es deutlich mehr positive Zusammenhänge als negative. Die Verbesserungen traten bei allen Lungenfunktionsparametern vor allem am Morgen vor Medikation auf. Weiterhin gab es auffallend viele statistisch positive Signifikanzen zwischen PM₁₀ und PEF sowie FEV₁, aber auch negative besonders bei FEV₁ und FVC. Ein ähnliches Bild zeigte sich für die Schad-

stoffe NO₂ und PM₁₀ bei einer Verzögerung von einem Tag für die gleichen Lungenfunktionsparameter.

Allerdings war die Aussagekraft der Analysen durch die eingeschränkte Qualität der Lungenfunktionsdaten (Datenlücken, Arbeitsmängel) sowie das Fehlen zeitlich aufgelöster Angaben zu Medikation und klinischem Zustand der Patienten begrenzt. Hierbei zeigte die Qualität erhebliche Unterschiede zwischen den Patienten. Eine kritische Analyse der Zahl positiver oder negativer Zusammenhänge ließ jedoch die Schlussfolgerung zu, dass die überwiegende Zahl der Korrelationen tatsächliche Beziehungen widerspiegelte.

4 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der Studie erlauben ungeachtet der Einschränkungen eines retrospektiv erhobenen Datensatzes Schlussfolgerungen, die sowohl für die klinische Praxis als auch für die Durchführung von Studien bei Patienten mit COPD von Bedeutung sind. Die Ergebnisse belegten, dass sich die Verlaufskurven der Lungenfunktion von Patient zu Patient deutlich unterscheiden. Die hohe Variabilität der Messungen deutete nach aller Wahrscheinlichkeit darauf hin, dass die Lungenfunktion der Patienten tatsächlich starken Schwankungen von Tag zu Tag unterworfen war. Ferner waren nicht nur die bereits für Gruppen von Patienten mit COPD bekannten Zusammenhänge mit Luftschadstoffen nachweisbar, sondern die Daten belegten auch, dass die von Patienten und Klinikern häufig angegebenen, aber nicht umfassend verifizierten Effekte des Wetters auf den Funktionszustand (und vermutlich auch klinischen Zustand) bei der COPD tatsächlich bestehen. Allerdings schien der dem Wetter zuzuschreibende Effekt im Vergleich zu der Gesamtvariabilität in den meisten Fällen relativ klein. Das Hauptergebnis dieser Studie bestand in der Beobachtung, dass trotz ähnlichem Schweregrad und ähnlichen Charakteristika der Erkrankung die Effekte der Umwelt (meteorologische Parameter und Luftschadstoffe) von Patient zu Patient unterschiedlich ausfielen. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die in Studien übliche Bildung von Gruppen die individuellen Eigenheiten und Reaktionen des Bronchialsystems in unangemessener Weise vernachlässigt. Somit ist es notwendig, in longitudinalen Studien von Patienten mit COPD zur adäquaten Beschreibung individuelle Analysen durchzuführen. Dies setzt natürlich longitudinale Datensätze entsprechender Qualität und adäquaten Umfangs voraus.

Literaturverzeichnis

- BUCHER K., 2003: Kurzbeschreibung zum Berechnungsverfahren biosynoptischer Wetterklassen. - Persönliche Mitteilung, Deutscher Wetterdienst, Freiburg.
- DONALDSON G.C., SEEMUNGAL, T., JEFFRIED, D.J., WEDZICHA, J.A., 1999: Effect of temperature on lung function and symptoms in chronic obstructive pulmonary disease. - Eur Respir J 13, 844-849.
- GOLD-GUIDELINES (GLOBAL INITIATIVE FOR CHRONIC OBSTRUCTIVE PULMONARY DISEASE), 2001, 2003, 2004: Pocket Guide to COPD Diagnosis, Management and Prevention. - <http://www.gold.org>, 09.05.2006.
- JAEGER/VIASYS HEALTHCARE, 2004 : Asthma Monitor AM1 – Gebrauchsanweisung Version 6.5.
- WANKA E.R., 2006: Zusammenhang zwischen meteorologischen Parametern sowie Luftschadstoffen und Variabilität der Lungenfunktion bei Patienten mit chronisch-obstruktiver Lungenerkrankung (COPD). - Dissertation Ludwig-Maximilians-Universität München.

Anschrift der Autoren:

Dr. rer. biol. hum. Dipl.-Met. Eva R. Wanka (corresponding author), Dr. rer. nat. Dipl.-Biol. Rudolf A. Jörres, Prof. Dr. med. Dennis Nowak, Institut und Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin, Klinikum der Ludwig-Maximilians-Universität München, Ziemssenstr. 1, 80336 München, Tel.: 0049-89-5160-7695, Fax: 0049-89-5160-3957

OA Dr. med. Bernhard Werner, Prof. Dr. med. Michael Pfeifer, Krankenhaus Donaustauf, Fachklinik für Erkrankungen der Atmungsorgane, Ludwigstr. 68, 93093 Donaustauf, Tel.: 0049-9403-80-1

Feinstaubkonzentrationen (PM_{2,5}) in deutschen Kurorten - Gesundheitliche Relevanz und Minderungspotentiale.

U. Kaminski, U. Wolf-Benning, P. Becker, M. Fricker und V. Dietze

Deutscher Wetterdienst, Medizin-Meteorologie Freiburg

Zusammenfassung

Zum Lufthygienischen Wirkungskomplex werden alle Wirkungen durch Luftbestandteile gerechnet. Besondere Aufmerksamkeit haben in jüngster Zeit Feinstaubpartikel erregt, weil viele Studien gezeigt haben, dass diese kleinen Partikel eine besondere gesundheitliche Relevanz besitzen. Von Mitte 2005 bis Mitte 2007 untersucht der Deutsche Wetterdienst im Rahmen des Projektes INMEKO (**I**ntegrierende **M**essverfahren in **K**urorten), neben anderen Parametern, die Feinstaubbelastung in den Kurorten. Mit Hilfe der gleichzeitigen Messung von verschiedenen Parametern wie z.B. Grobstaub, PM₁₀, PM_{2,5}, Russ, NO₂, Benzol an unterschiedlichen Repräsentanzen im Kurort (Verkehrszentrum, Ortszentrum, Kurgelände) sowie meteorologischen Parametern an benachbarten Wetterstationen können Quellgruppen identifiziert und Minderungspotentiale aufgezeigt werden.

Fine Particle Concentrations (PM_{2,5}) in German Health Resorts – Health Relevance and Potential for Reduction of Pollutants

Abstract

The air pollution complex comprises all effects by air constituents. Recently fine particles attract special public attention because most research papers showed particular health effects of these fine particles. Within the research project INMEKO (Integrating measurement techniques in health resorts) the German Meteorological Service examines, besides other parameters, the fine particle load in health resorts during the time period midyear 2005 to midyear 2007. By measuring a couple of parameters as e.g. coarse particles, PM₁₀, PM_{2,5}, soot, NO₂, Benzene at the same time and at different locations in health resorts (traffic centre, residential area, spa area) as well as meteorological parameters at neighbouring weather stations it is possible to identify groups of emission sources and to give recommendation for the reduction of such pollutants.

1 Einführung

In der Human-Biometeorologie ist die Atmung der wichtigste Wirkungsweg für den lufthygienischen Wirkungskomplex. Zum Lufthygienischen Wirkungskomplex werden alle Wirkungen durch Luftbestandteile gerechnet. Besondere Aufmerksamkeit haben in jüngster Zeit Feinstaubpartikel erregt. Als Feinstaub werden Partikel in der Atmosphäre bezeichnet, die Durchmesser $\leq 2.5 \mu\text{m}$ haben. Der Feinstaub besteht vorwiegend aus Ammoniumsulfat- bzw. Ammoniumnitratpartikeln, die durch Partikelbildung aus den Vorläufergasen, wie z. B. Ammoniak (Quelle: Landwirtschaft und Autokatalysatoren), NO₂ (Quelle: Auto) und SO₂ (Quelle: Kraft- und Fernheizwerke, Industriefeuerungen) entstehen. Hinzu kommen Verbrennungspartikel, wie z. B. der als krebserregend geltende Dieselruß oder Emissionen von Holzheizungen sowie Schwermetalle.

Feinstaubpartikel gelten nach heutigen wissenschaftlichen Erkenntnissen für die Bevölkerung als gesundheitlich besonders relevant. Sie werden von der Weltgesundheitsorganisation WHO als kritischer Luftschadstoff eingestuft, der merklichen Einfluss auf Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen und unter Umständen sogar auf die Sterberate hat. Die Überwachung der Feinstaubkonzentration (PM_{2,5}) ist in Deutschland noch nicht vorgeschrieben, da ein ent-

sprechendes Referenzverfahren fehlt und der Aufbau eines Messnetzes mit hohen Kosten verbunden ist. Routinemäßige Feinstaubmessungen werden deshalb bisher nur an wenigen Stationen durchgeführt. Auch aus diesem Grund untersucht von Mitte 2005 bis Mitte 2007 der Deutsche Wetterdienst (DWD) im Rahmen des Projektes INMEKO (**I**ntegrierende **M**essverfahren in **K**urorten), neben anderen Parametern, die Feinstaubbelastung in den Kurorten. Die Messungen sollen den DWD in die Lage versetzen, Richtwerte für Feinstaub vorzuschlagen, die einerseits einen Bezug zu möglichen gesetzlichen Grenzwerten berücksichtigen und andererseits der besonderen lufthygienischen Qualität der Kurorte gerecht werden. Weiterhin sollen mögliche Emissionsquellen und Möglichkeiten der Feinstaubminderung aufgezeigt werden.

2 Gesundheitliche Relevanz

Schon seit langem versucht man den Einfluss von Luftbeimengungen auf die menschliche Gesundheit zu verstehen (LIPFERT, 1994). In den Anfängen untersuchte man diesen Einfluss besonders während extremer Smogepisoden mit besonders hohen Schadstoffkonzentrationen, wo ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Mortalität aufgrund von Herz- und Lungenerkrankheiten und hohen Schadstoffkonzentrationen festgestellt werden konnte. Nachfolgende Studien, z.B. die „Harvard 6 Städte Kohorten Studie“ in den 90-er Jahren zeigten, dass auch schon bei unerwartet geringen Staubkonzentrationen gesundheitliche Wirkungen nachgewiesen werden können (z.B. SCHWARTZ, 1991). In den letzten Jahren liegt das Hauptaugenmerk besonders auf dem Feinstaub oder sogar den ultrafeinen Partikeln, weil ein berechtigter Verdacht besteht, dass diese kleinen Partikel den größten Einfluss auf die menschliche Gesundheit besitzen. Auf Grund ihrer geringen Größe besitzen sie eine längere Lebensdauer im Bereich von bis zu Tagen und können somit über größere Distanzen transportiert werden. Sie gelangen besonders gut in Innenräume und können beim Atmen bis tief in die Alveolen der Lungen oder sogar die Blutbahn gelangen. Feinstaub kann toxischer sein als andere Partikelfraktionen, weil er aus Sulfaten, Nitraten, Säuren und Schwermetallen besteht. Zum Teil sind es Agglomerate (wie z.B. beim Russ) mit großer Oberfläche, an denen Partikel mit verschiedenster chemischer Zusammensetzung andocken können. Alle Langzeitstudien zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Zunahme der Sterblichkeitsrate und der PM-Konzentration (POPE und DOCKERY 2006; CHOW et al., 2006).

3 Feinstaub in Kurorten

Die Entstehungsmechanismen für Fein- und Grobstaub sind grundsätzlich andere. Während Grobstaub vorwiegend mechanisch entsteht (Mobilisierung der Partikel von versiegelten Flächen oder anderen vegetationslosen Flächen wie z.B. Ackerflächen im Frühjahr, Baustellen, Schüttguthalden etc. oder durch die Partikelaufrichtung an Verkehrsflächen durch den Kraftfahrzeugverkehr sowie Reifenabrieb), entsteht im Gegensatz dazu der Feinstaub vorwiegend durch Verbrennungsprozesse oder durch photochemische Reaktionen in der Atmosphäre. Die Emissionen aus den verschiedenen Prozessen führen zusammen mit den oft eingeschränkten Austauschverhältnissen (Inversionswetterlage) zu einem typischen Feinstaubanstieg bzw. Überschreiten von Grenz- oder Richtwerten in den Wintermonaten (Abb. 1). Die Quellen für die Grobstaubentstehung sind dagegen im Winter weniger aktiv, da sich die Partikel im feuchten Zustand von staubführenden Flächen mechanisch sowohl durch den Wind als auch durch den rollenden Verkehr schwerer mobilisieren lassen als in den anderen Jahreszeiten.

Eine besondere Bedeutung kommt dem Feinstaub auch deshalb zu, weil in ihm der als besonders gefährlich geltende Verbrennungsruß (Diesel) enthalten ist. Im Gegensatz zum Grob-

staub können diese kleinen Partikel mehrere Tage in der Atmosphäre verweilen und mit der Luftströmung über größere Distanzen verfrachtet werden. Aus diesem Grund verwischt sich beim Feinstaub auch die Standortabhängigkeit (Abb. 2 b).

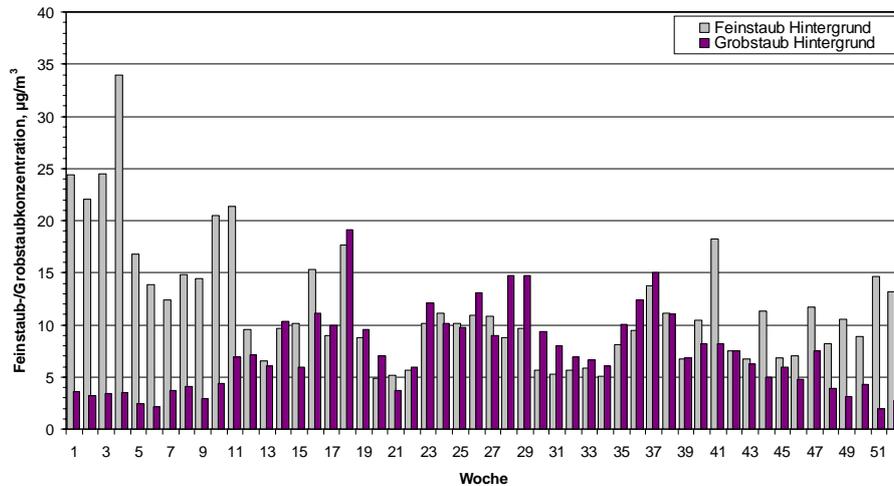


Abb. 1: Mittlerer Jahrgang der Massenkonzentration des Grobstaubes (Partikeldurchmesser 3 bis 48 µm) und des Feinstaubes (≤ 2.5 µm) in den 15 INMEKO Orten jeweils im Hintergrund im Zeitraum August 2005 bis Dezember 2006

Fig. 1: Average annual course of the mass concentration of coarse particles (particle diameter 3 to 48 µm) and fine particles (≤ 2.5 µm) in 15 INMEKO cities at background sides from August 2005 to December 2006

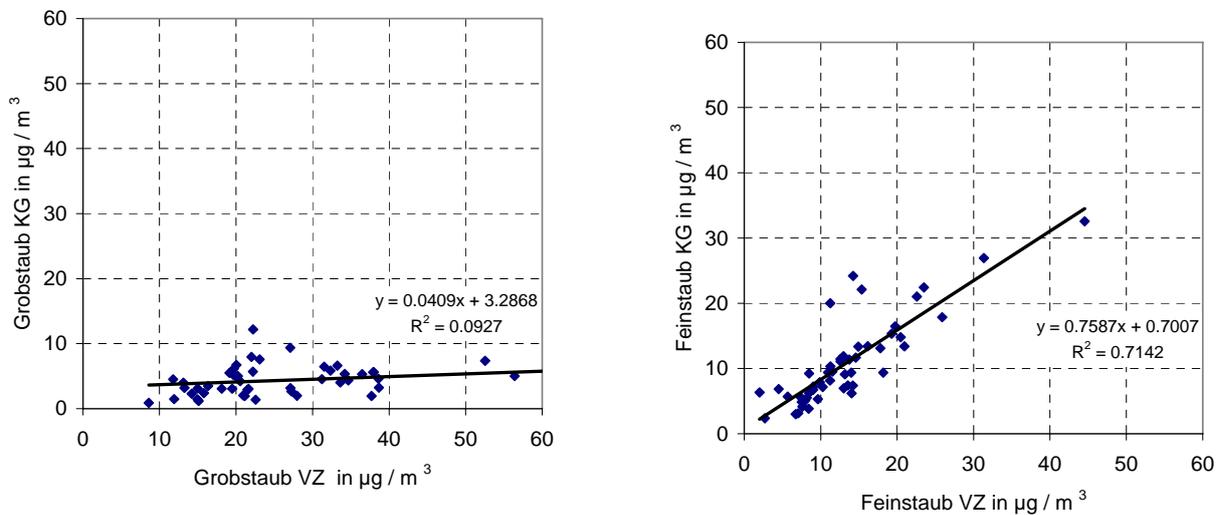


Abb.2a&b: Korrelation der Grobstaubkonzentration (links) im Verkehrszentrum (VZ) mit der im Kurgebiet (KG) und ebenso der Feinstaubkonzentration (rechts)

Fig. 2a&b: Correlation between the mass concentration of coarse particles (left) in the traffic centre (VZ) and the spa area (KG) and for fine particles (right), respectively

Die Feinstaub-Konzentrationen beider Standorte VZ und KG sind signifikant miteinander korreliert. Ein belasteter Ort hat im Verkehrszentrum aber immer noch höhere Feinstaubwerte, die im Vergleich zum Kurgebiet insbesondere auf einen höheren Russanteil zurückzuführen sind. Ein Hinweis darauf, dass der Verkehr eine wesentliche Feinstaubquelle darstellt. Der

Grobstaub (Abb. 2 a) gibt Hinweise auf lokale Quellen, weshalb die Messstellen VZ und KG nicht miteinander korrelieren. Potenziell schädigende Immissionen in Kurorten und Erholungsorten werden lokal aber auch noch durch Heizanlagen und gewerbliche Emittenten verursacht. Als Leitsubstanzen für die Immissionen des Verkehrs gelten Stickstoffdioxid (60% stammen aus dem Verkehr), Benzol (90% Verkehr) sowie Feinstaub einschließlich Ruß (etwa 50% Verkehr). Mit dem Boom der Holzheizungen besonders auch in den Kurorten im Süden Deutschlands deutet sich eine Trendwende an. Ein unerwarteter Effekt scheint dabei der Anstieg der Benzolbelastung zu sein. Ohne Minderungsmaßnahmen ist zu erwarten, dass die Emissionen krebserregender und gesundheitsgefährdender Stoffe aus Kleinfeuerungsanlagen (Benzol, Benzo(a)pyren und Feinstaub) zwischen 6 und 20% ansteigen werden (UMEG, 2003; GREISELIS-BAILER und KEMPER, 2006). Nach vorläufigen Ergebnissen des noch laufenden Feinstaubprojektes liegen die Jahresmittelwerte der Feinstaubkonzentrationen in den Kurorten unter $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nach Aussagen des Umweltbundesamtes tragen Holzheizungen bis zu $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zur Feinstaubmasse bei und erreichen damit die gleiche Größenordnung wie Dieselpartikel.

	FS(Russ)	FS(NO2)	FS(Benzol)	NO2(Benzol)	NO2(Russ)	Russ(Benzol)
So VZ	0.72	0.14	0.14	0.30	0.34	0.20
So KG	0.76	0.16	0.19	0.29	0.22	0.27
Wi VZ	0.68	0.15	0.42	0.24	0.33	0.62
Wi KG	0.65	0.22	0.52	0.55	0.42	0.70

Tab. 1: Mittlere R^2 –Werte für Regressionen zwischen Feinstaub (FS), NO_2 , Benzol und Russ getrennt für Sommer (So: Apr-Sept) und Winter (Wi: Okt-Mrz) und Verkehrszentrum (VZ) und Kurggebiet (KG) für Orte in Süddeutschland

Tab. 1: Average R^2 –values for the regression between fine particles (FS), NO_2 , benzene and soot for cities in southern Germany for summer (So: Apr-Sept) and winter (Wi: Oct-Mar) and traffic centre (VZ) and spa area (KG), respectively

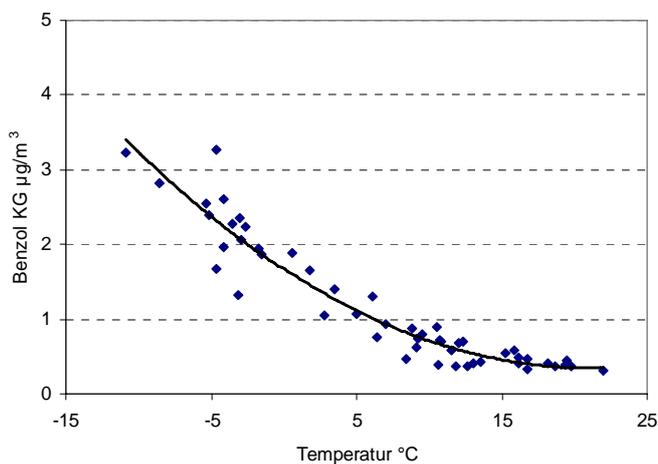


Abb. 3: Wochenmittelwerte der Benzol-Konzentrationen im Kurggebiet als Funktion der Temperatur

Fig. 3: Weekly averages of Benzene concentrations in a spa area as function of temperature

Um Einflüsse zu untersuchen, die zu einer Feinstauberrhöhung führen, wird für die 9 Kurorte im Süden Deutschlands ein statistischer Ansatz gewählt. So gibt z.B. das Bestimmtheitsmaß R^2 an wie viel Prozent der Streuung, in diesem Fall des Feinstaubes, durch eine lineare Abhängigkeit von Parametern wie z.B. Russ, NO_2 , Benzol erklärt werden kann. Sowohl im Winter als auch im Sommer können 60-70% der Feinstaubvariationen durch Russ erklärt werden (Tab. 1), der durch unvollständige Verbrennungsprozesse (Kohle-, Holzheizungen oder Diesel) entsteht. Wie bereits erläutert, verwischen sich auf Grund der längeren Lebensdauer des Feinstaubes die Unterschiede zwischen Verkehrszentrum und Kurggebiet. Erstaunlich ist auch, dass im Winter in vielen Kurggebieten nahezu 50% der Feinstaubvariationen durch Benzol bestimmt werden. Da in den Kurggebieten die Verkehrsbelastung als Hauptquelle für Benzol gering ist, kommen hierfür überwiegend Holzheizungen in Frage. Ein Indiz dafür ist auch das R^2 von 0.7 für Russ(Benzol). Allerdings muss

man auch beachten, dass Benzol im Winter durch geringere Abbauraten infolge geringerer OH-Radikal-Konzentrationen langsamer abgebaut wird als im Sommer, abgesehen von austauscharmen Wetterlagen. Abb. 3 zeigt die Temperaturabhängigkeit der Benzolkonzentration.

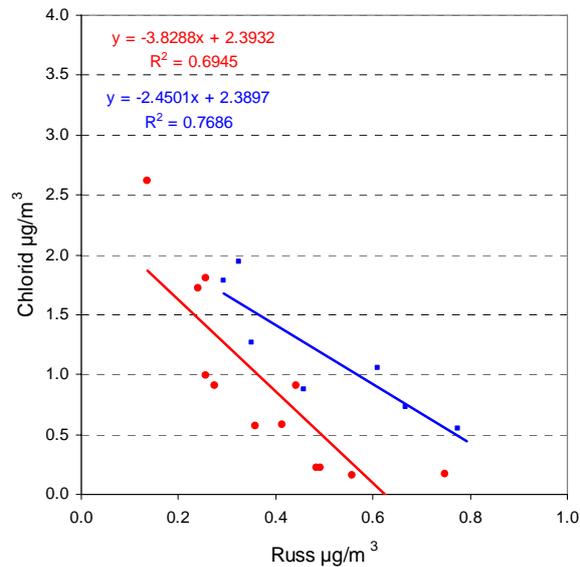


Abb.4: Chloridkonzentration als Funktion der Russkonzentration im Feinstaub (Rot: Sommer, blau: Winter)

Fig. 4: Chloride concentration as function of soot concentration in fine particles (red: summer, blue: winter)

chen Winden und hohen Windgeschwindigkeiten landeinwärts verfrachtet. Hierbei handelt es sich aber um saubere Luftmassen, da anthropogene Quellen auf See meist nicht vorhanden sind. Damit führen zusätzliche Seesalzeinträge nach jetzigem Stand der Untersuchung in den meisten Fällen nicht zu einer Überschreitung von PM_{2.5}-Feinstaub-Richtwerten. Die Analyse von Chlorid-Ionen als „Tracer“ für Seesalz und die Russbestimmung im Feinstaub zeigen (negative Steigung der Regressionsgeraden), dass hohe Chloridkonzentrationen nur in sauberen Luftmassen (geringe Russkonzentrationen) auftreten. Im Winter beträgt das $R^2 = 0,77$ und im Sommer 0,69. Man muss hierbei aber auch beachten, dass sich die Hauptseesalzfraktion bei den Partikeln mit Durchmessern $> 2.5 \mu\text{m}$ befindet und damit hauptsächlich die PM₁₀-Messungen beeinflusst. Bei Sturmtagen kann die NaCl-Konzentration in Küstennähe um die $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Luft betragen und damit um einen Faktor 5-10 höher sein als die mittlere PM₁₀-Konzentration in Seeheilbädern. Derart hohe Salzkonzentrationen führen an Küstenstandorten zur Überschreitung vorgegebene Grenzwerte. Deshalb ist eine Differenzierung der Staubinhaltsstoffe, wie sie der DWD durchführt, notwendig, um natürliche von anthropogenen Quellen zu unterscheiden.

4 Schlussfolgerungen

Eine hohe Luftqualität stellt nicht nur für Kurorte, die das Klima als so genanntes ortgebundenes Heilmittel anbieten (Luftkurorte, Heilklimatische Kurorte, Seeheilbäder) ein wichtiges Merkmal dar, mit dem sie sich von der heimatlichen Umgebung und den Arbeitsbedingungen der meisten Kurgäste abheben können. Auch die übrigen Bäder und Kurorte sollten die Luftqualität als besonderes Merkmal eines Aufenthaltes am Kurort herausstellen. Die Luftqualität in Kurorten ist in Deutschland überwiegend noch als gut, in einigen Bereichen (Küste, Hochlagen) sogar als sehr gut zu bezeichnen. Die staatliche Luftreinhaltepolitik hat auch in den Kurorten seit den 60er Jahren zu einer wesentlichen Verbesserung geführt. Durch Verdrän-

gung von Kohle und Holz durch Öl und Gas bei den privaten Heizungen sowie schadstoffärmerer Kraftstoffe und Maßnahmen zur Abgasreinigung bei den Kraftfahrzeugen konnten die Immissionen auch im ländlichen Raum gesenkt werden. Der zunehmende Anteil von Dieselfahrzeugen an der Fahrzeugflotte sowie der Trend zu immer größervolumigeren Motoren haben diesen Trend beim Verkehr seit Ende der 90er Jahre jedoch zum Stillstand gebracht. Trotz Katalysatortechnik geht z.B. die NO₂ – Konzentration nicht mehr weiter zurück (UBA, 2006). Kontraproduktiv für die Kurorte wirkt sich die augenblickliche Rückkehr zu den Holzheizungen aus, wodurch mehr Benzol und Feinstaub emittiert wird. Auch Pelletheizungen schneiden im Vergleich zum Erdgas in der Schadstoffbilanz deutlich schlechter ab (UBA, 2006). Für die Kurorte können durch diese Entwicklungen in Zukunft wieder größere Probleme entstehen, geltende Richtwerte einzuhalten. Steuerungsmechanismen stehen den Kurorten nur in Teilbereichen, wie z.B. beim Thema Holzfeuerungen oder Verkehrslenkung zur Verfügung. In den Gutachten des DWD werden hierzu entsprechende Hinweise gegeben. Lokale Maßnahmen alleine reichen aber nicht aus, sondern hier sind auch staatliche Maßnahmen gefordert, die aktuelle Fehlentwicklungen stoppen und damit zu einer Trendumkehr beitragen. Besonders unter dem gesundheitlichen Aspekt kommt dem Feinstaub hier eine außergewöhnliche Bedeutung zu.

Literaturverzeichnis

- CHOW, J. C., WATSON, J. G., MAUDERLY, J. L., COSTA, D. L., WYZGA, R. E., VEDAL, S., HIDY, G. M., ALTSHULER, S. L., MARRACK, D., HEUSS, J. M., WOLFF, G. T., POPE III, C. A., DOCKERY, D. W. , 2006: Critical Review Discussion: Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. - J. Air & Waste Manage. Assoc. 56, 1368-1380.
- GREISELIS-BAILER, S., KEMPER, B.-M., 2006: Ermittlung und Minderung der Emissionen krebserzeugender und weiterer besonders gesundheitsgefährdender Stoffe bei Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Vorhaben FKZ 203 44 358.
- LIPFERT, F.W., 1994: Air Pollution and Community Health: A Critical Review and Data Sourcebook. - Van Nostrand Reinhold: New York, NY.
- POPE III, C. A., DOCKERY, D. W., 2006: Critical Review: Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. - J. Air & Waste Manage. Assoc. 56, 709-742.
- SCHWARTZ, J., 1991: Particulate Air Pollution and Daily Mortality in Detroit. - Environ. Res., 56, 204-213.
- UBA, 2006: <http://www.env-it.de/luftdaten/documents.fwd?comp=NO2#NO2>.
- UBA, 2006: Hintergrundpapier - Die Nebenwirkungen der Behaglichkeit: Feinstaub aus Kamin und Holzofen. Dessau 2006. Siehe auch Pressemitteilung des UBA: www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2006/pd06-013.htm.
- UMEG, 2003: Emissionsmessungen an Holzfeuerungen im Regelungsbereich der 1. BImSchV, Feldmessprogramm in Baden-Württemberg, Heizperiode 2002/2003. - UMEG-Bericht Nr. 43-18/03.

Anschrift des Autors

Dipl.-Met. Uwe Kaminski, Dr. U. Wolf-Benning, Dr. P. Becker, M. Fricker, V. Dietze, Deutscher Wetterdienst, Medizin-Meteorologie, Stefan-Meier-Str. 4-6, 79104 Freiburg

Das thermische Empfinden von Touristen in der Region Neusiedlersee

Christiane Brandenburg¹ und Andreas Matzarakis²

¹Universität für Bodenkultur, Department für Raum, Landschaft und Infrastruktur, Institut für Landschaftsentwicklung, Erholungs- und Naturschutzplanung

² Meteorologisches Institut, Universität Freiburg

Zusammenfassung

Die human-biometeorologische Kenngröße (Physiologisch Äquivalente Temperatur PET) beschreibt unter Berücksichtigung der thermophysiologischen Zusammenhänge das thermische Empfinden des Menschen. Meteorologische Parameter wie Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Sonneneinstrahlung, Luftfeuchtigkeit, Bewölkungsgrad werden bei der Berechnung von PET mit dem Programm „RayMan“ berücksichtigt. Bei einer Befragung von Touristen in der Region Neusiedler See wurden rund 500 Personen gebeten das aktuelle Wetter zu bestimmen, ihr thermisches Empfinden anhand der ASHRAE - Skala einzuordnen und die aktuelle Lufttemperatur zu schätzen. Diese Schätzwerte werden in Beziehung mit den gemessenen meteorologischen Parametern und den errechneten PET Werten gesetzt, um so die Übereinstimmung der Wahrnehmung der Menschen mit den gemessenen bzw. berechneten Werten abschätzen zu können.

The thermal sensation of tourists in the Region Neusiedlersee

Abstract

The thermal index (Physiologically Equivalent Temperature - PET) describes under consideration of the thermo-physiological processes the thermal perception of human beings. Meteorological parameters air temperature, global radiation, clouds, wind speed and air humidity are considered in the calculation of PET by the RayMan model. Five hundred visitors of the region of Neusiedler See have been asked to assess the general weather situation, their thermal environment by the use of the ASHRAE-Scale and the air temperature. The results of the questionnaires have been correlated with the calculated PET-values and the meteorological parameters.

1 Problemstellung

Der Klimawandel, das Bedürfnis nach dem perfekten Erlebnis bei landschaftsgebundenen Freizeit- und Erholungsaktivitäten, die Möglichkeiten sich je nach Wetterlage mit der entsprechend passenden Funktionskleidung auszurüsten, lassen den Ruf nach, für meteorologische Laien leicht verständliche und für Alltagsanforderungen adaptierte meteorologische Parameter, immer größer werden. Eine Vielzahl verschiedener Kenngrößen werden derzeit zur Beschreibung des Wetters verwendet. So ist der windchill Faktor in Nordamerika nicht unbekannt. In den deutschsprachigen Gebieten Europas sind die gefühlte Temperatur und die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) oft anzutreffen. Gleichzeitig werden jedoch eben jene Kennwerte und Komplexwerte hinterfragt. Kritische Stimmen, die auch schon in der „freien Enzyklopädie Wikipedia“ Eingang finden, hinterfragen die Einsatzmöglichkeit der meteorologischen Kennwerte und Komplexgrößen außerhalb der naturwissenschaftlichen Forschungswelt. Eine Verwendbarkeit für Endnutzer, in den meisten Fällen meteorologische Laien, und die Anwendbarkeit im Alltagsgeschehen wird in Frage gestellt.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes zur Erfassung der regionalen Identität wurde untersucht, inwieweit meteorologische Laien und zwar ausschließlich Besucher der Region Neusiedler See die aktuellen Wetterverhältnisse richtig einschätzen, ob das subjektive Behaglichkeitsempfinden mit den durch meteorologische Parameter bestimmte Behaglichkeitsstufen übereinstimmt und in wie weit die aktuelle Temperatur richtig geschätzt wird.

2 Untersuchungsgebiet

Die Region Neusiedler See liegt im äußersten Osten Österreichs, reicht bis nach Ungarn hinein und grenzt an die Slowakei. Das Gebiet ist durch den Übergang von alpinen zu pannonischen Klima- und Vegetationsverhältnissen gekennzeichnet. Im Jahresmittel werden unter 600 mm Niederschläge gemessen – die Sommer sind meist sehr niederschlagsarm –, dafür werden aber 300 Sonnentage pro Jahr beobachtet. Die temperaturnivellierende Wirkung des Sees sorgt zumeist für einen milden Herbst und bietet für den, die Region prägenden, Weinbau optimale Bedingungen. Durch den häufigen Wind ist das Gebiet für Segler und Windsurfer äußerst attraktiv, sowie in jüngster Zeit auch für Windenergieanlagen. Das für den Tourismus attraktive Klima und der Naturraum selbst hat die Region schon in den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts für Ausflüge und Urlaube interessant gemacht. Doch erst in den 50er Jahren erfolgte ein massiver Ausbau der touristischen Infrastruktur. Insbesondere wurden Einrichtungen der wasserbezogenen Freizeit- und Erholungsnutzung wie Marinas, Seebäder etc. ausgebaut. Der sich seit den 1960er Jahren im Zusammenhang mit den Vogelbeobachtungen an den Lacken entwickelnde Naturtourismus hat sich seit der Gründung des Nationalparks 1993 weiter verstärkt. Übernachtungsgäste aus Deutschland, der Schweiz und den Niederlanden sowie auch aus Österreich stellen den größten Anteil. Ende der 90er Jahre waren auf dem österreichischen Teil der Region Neusiedler See rund 1.3 Mio. Übernachtungen zu verzeichnen. Bedingt durch die Nähe zu Wien spielen Ausflugstourismus und Zweitwohnsitze in der Region Neusiedler See ebenfalls eine bedeutende Rolle (ZIENER, 2003).

3 Methodik

Im Frühjahr, Sommer und Herbst 2006 wurde in der gesamten Region Neusiedlersee eine Touristenbefragung durchgeführt. Die Befragungsstandorte und die Anzahl der Befragungen pro Gemeinde richteten sich nach der Anzahl der Übernachtungen in den einzelnen Gemeinden. Da derzeit keine gesicherten Daten über die Anzahl der Tagesgäste in der Region vorliegen, floss die Anzahl der Tagesgäste als qualitative Information – in Form von Expertenwissen seitens der Tourismusmanager, der Nationalparkverwaltung etc. – bei der Auswahl der Befragungsstandorte ein. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass Standorte ausgewählt wurden, die von verschiedenen Nutzergruppen - wie z.B. Radfahrer, Wassersportler, Naturinteressierte etc. – aufgesucht werden.

Die Befragung selbst diente unter anderem der Identifizierung derjenigen Faktoren, die die regionale Identität bestimmen. Nachdem ein identitätsstiftender Faktor in dem Untersuchungsgebiet das Wetter ist, war es naheliegend die Befragten auch nach ihrem thermischen Empfinden zu befragen. Im Rahmen strukturierter Interviews wurden die Befragten gebeten, die Gesamtwetterlage in eine der vier vorgegeben Kategorien: Schönwetter, heiter bis leicht bewölkt, wolkig und trüber Tag einzuordnen. In der nächsten geschlossenen Frage mussten die Personen ihr Behaglichkeitsempfinden neun Kategorien zuordnen. Die Kategorien lauten: sehr kalt, kalt, kühl, leicht kühl, angenehm, leicht warm, warm, heiß und sehr heiß. In einer abschließenden offenen Frage zur Temperatur schätzten die befragten Personen die aktuelle

Umgebungstemperatur ein. Es wurde seitens der Interviewer daraufhin gewiesen, dass nicht die Temperatur am Standort selbst ausschlaggebend war, sondern die Temperatur in der Umgebung und in der aktuellen Stunde (siehe Abb. 1)

15. Bitte charakterisieren Sie das heutige Wetter (eine Antwort):
 Schönwetter heiter - leicht bewölkt wolkig trübes Wetter

16. Bitte charakterisieren Sie Ihr derzeitiges Temperaturempfinden? (eine Antwort)
 sehr kalt kalt kühl leicht kühl angenehm
 leicht warm warm heiß sehr heiß

17. Wie schätzen Sie die heutige Durchschnittstemperatur (Grad) ein? °C

18. Mit wem sind Sie bei Ihrem derzeitigen Aufenthalt unterwegs?
 alleine nicht alleine

wenn nicht alleine, nennen Sie bitte Altersgruppe und Geschlecht der weiteren Personen, mit denen Sie unterwegs sind!

	0-7	8-15	16-30	31-45	46-60	61-70	>70
weiblich							
männlich							

19. Bitte geben Sie Ihr Alter an: Jahre

20. Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an: weiblich männlich

Abb. 1: Auszug aus dem Fragebogen

Fig. 1: Extraction of the the questionnaire

Die Kategorien der Gesamtwetterlage basieren auf der Bewölkungsklassifizierung nach AUER et al., 1990. Den neun abgefragten Kategorien zur thermischen Empfindung liegen die Behaglichkeitsstufen der ASHRAE-Skala und von PET zu Grunde (MATZARAKIS UND MAYER, 1996, VDI, 1998). PET beschreibt die thermische Umwelt unter Berücksichtigung der thermophysiologicalen Zusammenhänge, ist für den gesamten Jahresverlauf gültig (HÖPPE, 1999) und gibt das subjektive Wärme- und Kälteempfinden des Menschen an. Daten wie Wind, Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung, Luftfeuchtigkeit, Bewölkungsgrad werden in der Berechnung berücksichtigt. Da das Umgebungsklima in ein vergleichbares Raumklima transferiert wird, ist PET laut HÖPPE et al. (1987) für meteorologische Laien über die eigenen Erfahrungswerte leichter interpretierbar als die Lufttemperatur in Zusammenhang mit anderen meteorologischen Parametern. HÖPPE (1999) geht davon aus, dass die Menschen eine hohe Selbsterfahrung bei der Einschätzung des Raumklimas aufweisen.

Die Werte der PET wurden mit dem frei erhältlichen Programm „Ray Man: Modelling the Mean Radiation Temperature in Urban Structures“ von MATZARAKIS et al. (2000) berechnet.

Den Berechnungen wurden die meteorologischen Parameter von den Wetterstationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Andau, Neusiedl am See und Eisenstadt zu Grunde gelegt.

Nach einer deskriptiven Analyse der Daten wurden mittels linearer Regression die gemessenen meteorologischen Parameter und die berechnete Komplexgröße PET sowie die von Befragten angegebenen Werte zur aktuellen Wetterlage, zur Lufttemperatur und der Behaglichkeitsempfindung in Hinblick auf ihre Übereinstimmung überprüft.

4 Befragungsergebnisse

4.1 Soziodemographische Eckdaten

Insgesamt wurden 506 Befragungen in die Auswertungen einbezogen. Befragt wurden ausschließlich Gäste der Region. Rund 20% der Befragten kamen aus Deutschland, 75% aus Österreich aber nicht aus der Region Neusiedlersee und die restlichen 5% aus anderen Staaten Europas, eine Person kam aus Kanada. 47% der Befragten waren Frauen und 53% Männer. Es wurden bewusst nur heranwachsende bzw. erwachsene Personen angesprochen. Knappe 13% sind über 15 Jahre und unter 30 Jahre alt, 30% zwischen 31 und 45 Jahre alt, knappe 36% zwischen 46 und 60 Jahre alt und 22% über 60 Jahre alt. Landschaftsgebundene Aktivitäten wie Radfahren, Baden und in der Natur sein sind die am häufigsten genannten Tätigkeiten im Untersuchungsgebiet.

4.2 Einschätzung des Wetters, der Temperatur und des Behaglichkeitsempfinden

Eine Einschätzung des Wetters nach den Bewölkungsstufen Schönwetter, heiter bis leicht wolkig, wolkig und trüber Tag erfolgte von 33,2% der Befragten richtig, zu 64% wurde das Wetter im Vergleich zu den Angaben der meteorologischen Stationen zu schlecht eingestuft, nur 3% der befragten Personen stuften das Wetter als zu gut ein. Der Vergleich der geschätzten Wetterlage mit den Bewölkungskategorien der meteorologischen Stationen ergibt einen signifikanten Zusammenhang mit einer Stärke von 0,6. Die Modellgüte mittels korrigiertem R-Quadrat beträgt jedoch nur 0,3.

Eine deskriptive Analyse der geschätzten Lufttemperatur und der bei den Stationen gemessenen Lufttemperatur ergibt, dass 36,2% der befragten Personen die Temperatur unterschätzen und 62,3 % die Temperatur überschätzen. Im Mittel wird die Temperatur um 0,8°C falsch eingeschätzt, um maximal 9 C unterschätzt und maximal 12 C überschätzt. Der Vergleich der geschätzten Temperatur mit den Temperaturwerten der meteorologischen Stationen ergibt einen signifikanten Zusammenhang mit einer Stärke von 0,9. Die Modellgüte basierend auf dem korrigierten R-Quadrat beträgt 0,8.

Im Vergleich zu den Frauen neigen 4% mehr Männer dazu die Temperatur zu unterschätzen, hingegen überschätzen rund 3% mehr Frauen die Temperatur. Männer tendieren eher zu extremen Unter- und Überschätzungen.

Wird die Temperatureinschätzung den Altersklassen gegenübergestellt, so liegen keine signifikanten Unterschiede bei einer Über- oder Unterschätzung der Lufttemperatur vor.

PET wird im Mittel um 1/5 einer Kategorie falsch eingeschätzt, um maximal 5 Kategoriestufen zu hoch und um maximal 4 Kategoriestufen zu niedrig. Anhand der Häufigkeitsverteilung wird jedoch sehr gut deutlich, dass PET zu 28% richtig eingeschätzt, von 30% der Befragten unterschätzt und von 42 % überschätzt, zu 14% um eine Kategorie zu niedrig und zu 21% um eine Kategorie zu hoch eingeschätzt wird (vgl. Abb. 2 Häufigkeitsverteilung der Einschätzung der Behaglichkeitskategorien, Wert = PET Kategorie_geschätzt – PET Kategorie_Station). Eine genauere Untersuchung der extremen Fehleinschätzung (Unter- und Überschätzung von mehr als 3 Kategoriestufen) ergab ein Informationsdefizit seitens der Befragten. Bei der Betrachtung der Zusammenhänge zwischen der wahrgenommenen Behaglichkeit und dem berechneten PET Wert wurden diese Fragebögen weggelassen. Mittels linearer Regression lässt sich ein signifikanter Zusammenhang von 0,7 und eine Modellgüte (korrigierte R-Quadrat) von 0,5 zwischen der geschätzten PET Kategorie und der mittels meteorologischer Parameter errechneten PET Kategorie erreichen.

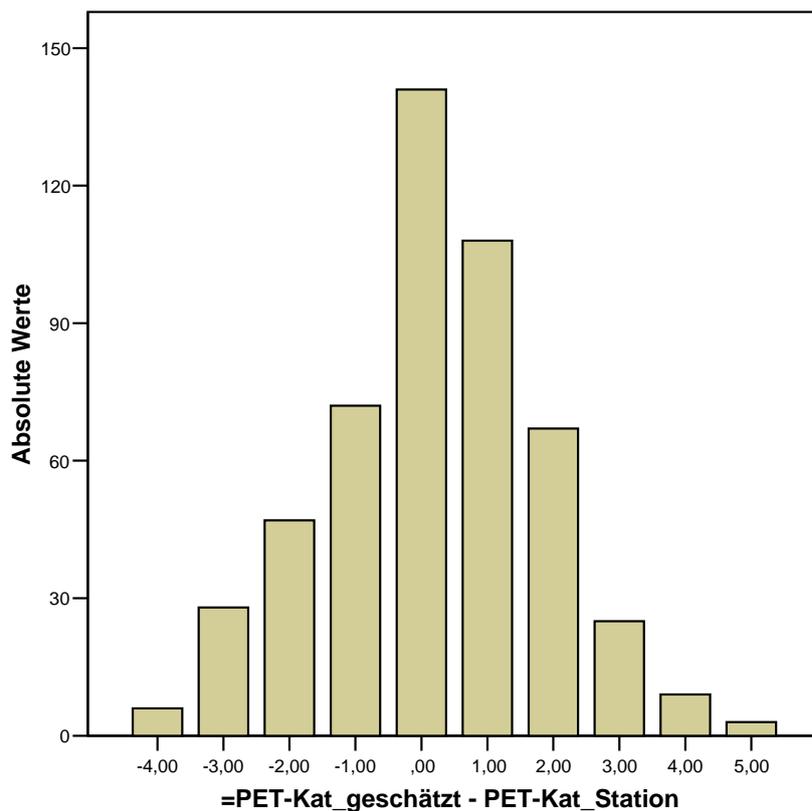


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung der Einschätzung der Behaglichkeitskategorien, Wert = PET Kategorien_geschätzt – PET Kategorien_Station

Abb. 2: *Frequency distribution of the evaluation of comfort classes, Value = PET-class_evaluated – PETclass_Station*

Die Fehleinschätzung der PET Kategorien ist bei den Frauen und Männern annähernd gleich auch lassen sich keine Tendenzen bei einer Analyse der Altersgruppen erkennen.

5 Schlussfolgerung

Anhand der vorliegenden Untersuchungen geht deutlich hervor, dass meteorologische Laien sehr gut „das Wetter“ einschätzen können. Am schlechtesten schneidet die Einschätzung der aktuellen Wetterlage ab. Dies kann darauf zurück zu führen sein, dass die Bewertung der Bewölkung durch die meteorologischen Stationen nur zu drei Tageszeiten stattfindet, somit eine Änderung der Wetterlage womöglich nicht in die Bewertung einfließt, die befragten Personen aber sehr sowohl die aktuelle Wetterlage bestimmen.

Die sehr gute Einschätzung der Lufttemperatur im Vergleich zur Einschätzung des Behaglichkeitsempfindens kann darauf zurückgeführt werden, dass in das Behaglichkeitsempfinden die Alltagssituation der Befragten hineinfließt. So wird womöglich eine Person, die aus einer eher kühleren Gegend kommt, das Klima in der Region Neusiedlersee als behaglicher einstufen als eine Person, die aus einer mit der Region Neusiedlersee vergleichbaren Klimaregion kommt. Eine Analyse der Herkunftsgebiete der Befragten nach Klimaregionen ist somit notwendig. Bedingt durch den Befragungsaufbau selbst lässt sich nicht die ausgeübte Tätigkeit

der befragten Person eruieren. So können die unterschiedlichen Einschätzungen evt. mit den unterschiedlichen ausgeübten Tätigkeiten begründet sein.

Literaturverzeichnis

AUER, I., BOGNER, M., HAMMER, N., KOCH, E., RUDEL, E., SVABIK, O., VIELHABER, CHR., 1990: Das Bioklima von Gmunden, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.

HÖPPE, P., MAYER, H., 1987: Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas, Stadt und Landschaft, Heft 19, Ulmer Verlag, Stuttgart, S. 22-30.

HÖPPE, P., 1999: The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. - International Journal of Biometeorology **43**, 71-75.

MATZARAKIS, A., MAYER, H., 1996: Another kind of environmental stress: Thermal stress. - WHO Newsletter No. 18, 7-10.

MATZARAKIS, A., RUTZ, F., MAYER, H., 2000: Estimation and calculation of the mean radiant temperature within urban structures. - Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millenium (ed. by R.J. de Dear, J.D. Kalma, T.R. Oke and A. Auliciems): Selected Papers from the Conference ICB-ICUC'99, Sydney, WCASP-50, WMO/TD No. 1026, S. 273-278.

http://de.wikipedia.org/wiki/Gef%C3%BChlte_Temperatur, 27.2.2007

ZIENER, K., 2003: Das Konfliktfeld Erholungsnutzung – Naturschutz in Nationalparks und Biosphärenreservaten, Aachen.

Anschrift der Autoren

DI Dr. Christiane Brandenburg, Institute for Landscape Development, Recreation and Environmental Planning, Department of Spatial, Landscape and Infrastructure Sciences, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Peter Jordan Str. 82, 1190 Vienna, Austria

Prof. Dr. Andreas Matzarakis, Meteorologisches Institut, Universität Freiburg, Werderring 10, 79085 Freiburg

Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Integration von Wetter- und Klimabedingungen im Tourismus

Andreas Matzarakis

Meteorologisches Institut, Universität Freiburg

Zusammenfassung

Existierende Methoden zur Beschreibung des Klimas für Tourismuszwecke, beruhen auf monatliche Mittelwerte und die Klimaindizes berücksichtigen nur einfache Kombinationen von grundlegenden Klimagrößen, wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit oder Niederschlag. Die Klimaindizes besitzen weder eine thermo-physiologische Relevanz noch Informationen über Häufigkeiten von Klassen oder auch Extremereignisse. Außerdem besitzen sie keine hochaufgelöste zeitliche Komponente.

Die hier vorgeschlagene Methode bzw. Schema erlaubt die Integration von Wetter und Klima für Tourismuszwecke, weil eine Reihe von thermischen (z.B. Physiologisch Äquivalente Temperatur), physikalische (z. B. Niederschlag und Wind) und ästhetische (Sonnenschein und Bewölkung) Faktoren berücksichtigt. Außerdem, können über die Auswahl von Dekaden Informationen bereitgestellt werden, die in der Nähe der Reisedauer von Touristen liegen. Zusätzlich, werden über die Darstellung von Häufigkeitsklassen und Überschreitungshäufigkeiten detaillierte Aussagen u.a. von Extremereignissen erzielt.

Development of an assessment scheme for the integration of weather and climate conditions for tourism

Abstract

Existing methods for the evaluation of climate for tourism purposes are based on mean monthly values and climate indices consider only basic climate elements, a.e. air temperature, air humidity or precipitation. The climate indices have neither a thermo-physiological relevance nor information about frequencies of classes or extreme events. Additionally, they do not offer high temporal resolution.

The described method here, resp. Scheme allows the integration of weather and climate for tourism and recreation issues, because of the implementation of several factors and facets, like thermal (a.e. Physiologically Equivalent Temperature), physical (a.e. precipitation and wind) and aesthetical (a.e. sunshine duration and cloud cover). Based on the selected and used separation of the months in three periods, which are represent more accurate the period of vacations, more reliable information for tourism and recreation can be offered. Additionally, by the use of frequencies of classes and amounts of threshold values detailed information about extreme events can be given.

1 Einleitung

„Wetter und Klima“ prägen nicht nur das touristische Angebot, sondern auch die Nachfrage. Sie beeinflussen u.a. die Entscheidung, wohin die Reise geht bzw. welche Aktivitäten ausgeübt werden. Die klimatischen Gegebenheiten spielen in den drei Phasen der Reise: vor, während und danach eine entscheidende Rolle (ABEGG, 1996, MATZARAKIS, 2006). Die meteorologischen bzw. klimatischen Bedingungen beeinflussen auch die Gestaltung des Tagesablaufes.

Zusammengefasst kann folgendes festgestellt werden:

- „Wetter und Klima“ sind limitierende Faktoren im Tourismus.

- „Wetter und Klima“ sind Steuergrößen der touristischen Nachfrage.

Unter „Wetter und Klima“ versteht man nicht nur die Lufttemperatur und den Niederschlag, sondern die ganze Palette der meteorologischen Größen und Phänomene der „atmosphärischen Umwelt“ (MATZARAKIS, 2006). Die Beschreibung und Bewertung des aktuellen Wetters und der klimatischen Bedingungen sind Grundbestandteil der Tourismus Klimatologie (MATZARAKIS und DE FREITAS, 2001, MATZARAKIS et al., 2004). Kenntnis dieser Bedingungen bildet die notwendige Grundlage für das Tourismuspotential eines Ortes oder einer Region (MATZARAKIS, 2006).

2 Methodik

Für die Beschreibung und Quantifizierung des Klimas einer Region für Tourismusbelange, bedient sich die Tourismus Klimatologie Methoden aus der angewandten Meteorologie und Klimatologie sowie aus der Human-biometeorologie (VDI, 1998; MATZARAKIS und DE FREITAS, 2001). Der am meisten bekannte und bis heute oft angewandte Tourismus Klima Index (TCI) stammt von MIECZKOWSKI (1985). Der TCI besteht aus einer Kombination von Sieben Parametern, wobei drei davon Einzelparameter und zwei bioklimatische Kombinationsgrößen sind. Die existierenden Klimaindizes für Tourismuszwecke haben gewisse Nachteile. Sie berücksichtigen, aus der Sicht der angewandten Klimatologie und Human-Biometeorologie den Einfluss der kurz- und langwelligen Strahlung (MATZARAKIS, 2006). Diese kann auf der Grundlage von Bewölkungsinformationen bestimmt werden (VDI, 1998; MATZARAKIS et al., 2001). Ein weiterer Nachteil des TCI ist, dass bei der Bestimmung des thermischen Komforts nur die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit berücksichtigt werden und generell der TCI keine thermo-physiologische Relevanz aufweist. Die vollständige Bewertung des thermischen Bioklimas ist nur mit dem Einsatz von Energiebilanz-Modellen des Menschen gewährleistet und wie schon im Projekt ACTIVE für die bioklimatische Landschaftszonierung von Österreich auf der Grundlage der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) geschehen ist (KOCH et al., 2005). Die notwendigen Methoden dazu existieren und sind auch für Österreich und andere Gebiete und Klimaregionen eingesetzt worden (MATZARAKIS, 2006).

Die Bewertung des thermischen Bioklimas des Menschen mit thermischen Indizes, wie PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur) (VDI, 1998; HÖPPE, 1999; MATZARAKIS, 2006) oder die gefühlte Temperatur (MATZARAKIS, 2006), geben zwar detaillierte Information über das thermische Empfinden von Menschen sowie der thermischen Belastung. Diese bildet aber nur eine Facette in der Beurteilung der klimatischen Bedingungen für die Belange des Fremdenverkehrs. Weitere Facetten und Faktoren aus der Human-Biometeorologie und Tourismus Klimatologie müssen bei der Berücksichtigung des Klimas in zukünftigen Tourismusfragestellungen berücksichtigt werden.

Die hier eingeschlagene Methode beruht auf die Implementation von thermischen/human-biometeorologischen, physikalischen und ästhetischen Faktoren, die die meisten Faktoren und Größen zur Beschreibung des Klimas für den Tourismus beinhalten (DE FREITAS, 2003; MATZARAKIS, 2006). Im Detail wird berücksichtigt:

- a) grundlegende Klimagrößen (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Bedeckungsgrad, Niederschlag) auf Tagesbasis, die für viele Stationen verfügbar sind,
- b) Hochaufgelöste zeitliche Informationen auf der Basis von Monatsdekaden (Aufteilung der einzelnen Monate in drei Intervalle),

- c) Analyse von klimatischen und bioklimatischen Bedingungen basierend auf Häufigkeitsklassen und Schwellenwerten auf der Grundlage des thermischen Index Physiologisch Äquivalente Temperatur,
- d) Berücksichtigung des thermischen Komforts, Wärme- und Kältebelastung und „Schwüle“,
- e) Berücksichtigung des Niederschlags und dessen Höhe als beeinflussende Faktoren,
- f) Berücksichtigung der Nebelhäufigkeit und der Sonnenschein/Bewölkungsverhältnisse,
- g) Berücksichtigung der Extremwindsituationen.

Aufbauend auf eine für Kreta durchgeführte Klima-Tourismusanalyse werden im weiteren einige Beispiele und die hier vorgeschlagene integrierende Methode bzw. Schema aufgeführt.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse basieren auf die Auswertung von Tagesdaten der Station Heraklion des griechischen Wetterdienstes für den Zeitraum 1955 bis 2001. Auf klassische Auswertungen von monatsmittelwerten und Häufigkeiten wurde hier verzichtet (MATZARAKIS et al., 2005). In Abbildung 1 werden die zeitliche Entwicklung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur für die jährliche, saisonale und für die Tourismusperiode für den Zeitraum 1955 – 2001 dargestellt. Abb. 2 enthält die zeitliche Entwicklung des Niederschlags für den Zeitraum 1955 bis 2001 für die jährliche Niederschlagssumme und die Anzahl der Tage mit Niederschlag (höher als 1 mm). Aus Abb. 1 und 2 können zwar detaillierte Informationen über die zeitliche Entwicklung und jährlichen Schwankungen von wichtigen klimatischen und bioklimatischen Größen gegeben werden. Sie erlauben jedoch keine Rückschlüsse auf Häufigkeiten von Klassen bzw. Extremereignissen.

In den folgenden Abb. 3 und 4, werden die Monate in drei Intervallen unterteilt, um eine bessere zeitliche Auflösung zu erzielen. Durch die Berücksichtigung von Klassen von PET, mit denen die human-biometeorologischen Belastungsstufen entsprechen, werden die Häufigkeiten dieser Klassen dargestellt.

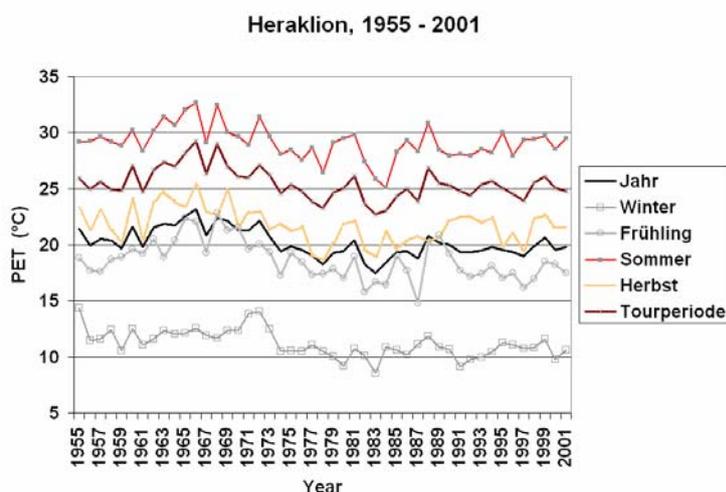


Abb. 1: Saisonale, jährliche und Tourismusperiode (April bis Oktober) Entwicklung von PET für Heraklion/Kreta für den Zeitraum 1955-2001

Fig. 1: Seasonal, annual and tourism period (April to October) development of PET for Heraklion, Crete for the period of time 1955 – 2001

Heraklion, 1955 - 2001

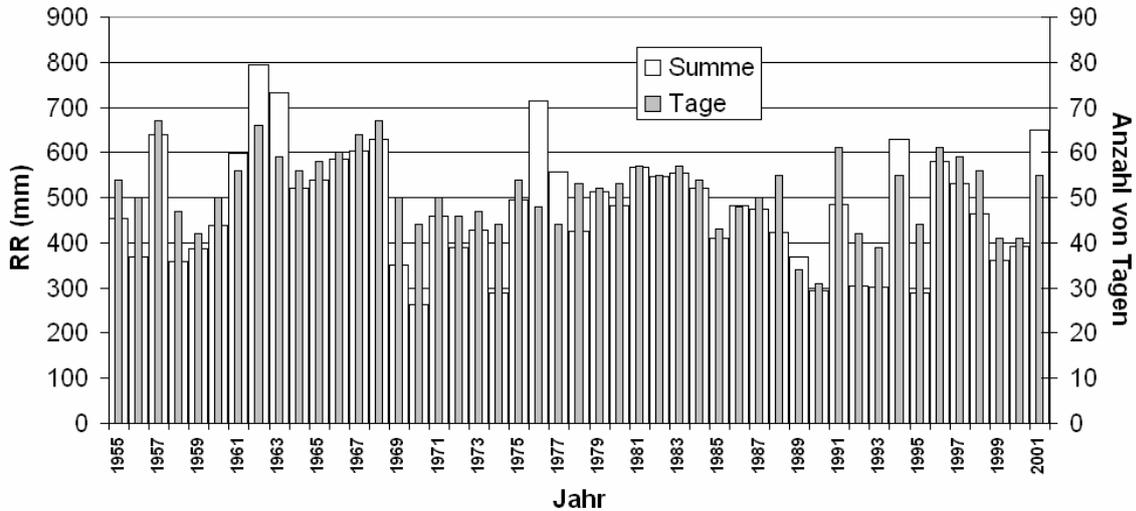


Abb. 2: Zeitliche Entwicklung der jährlichen Niederschlagssumme und der Anzahl der Tage mit Niederschlag (>1 mm) für Heraklion für den Zeitraum 1955-2001

Fig. 2: Sum of precipitation in mm and amount of days with precipitation (> 1 mm) in Heraklion for the period 1955 to 2001

Heraklion, 1955 - 2001

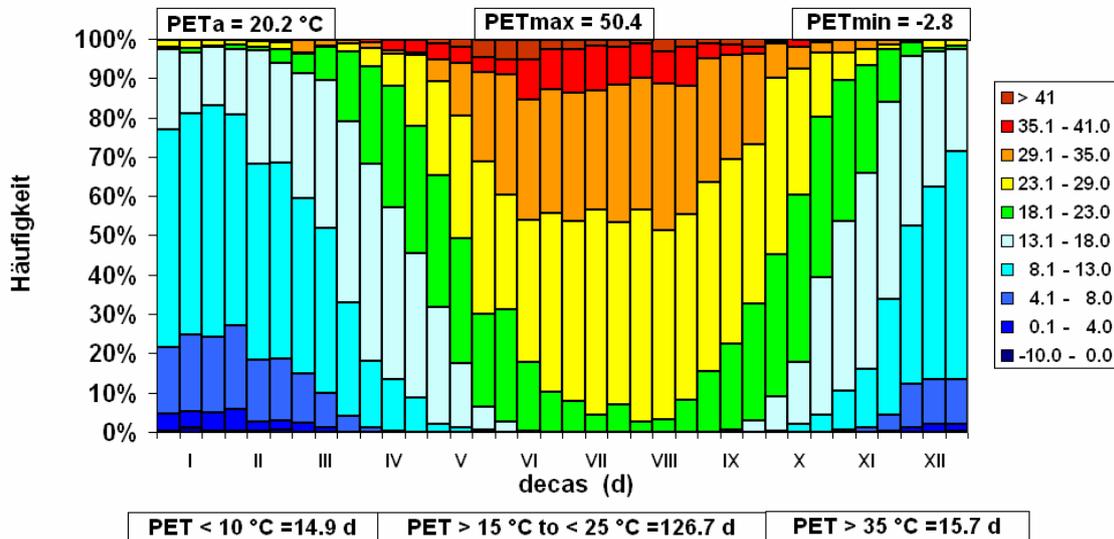


Abb. 3: Häufigkeitsdarstellung von PET-Klassen (Bioklimadiagramm) in Heraklion für den Zeitraum 1955-2001

Fig. 3: Frequency distribution of PET-Classes (Bioclimate diagram) for Heraklion, Crete for the period 1955 – 2001

Zusätzlich können in den Bioklimadiagrammen, neben den Häufigkeitsklassen, die Mittelwerte und Maxima und Minima des ganzen Zeitraums mitangegeben werden. Die Angabe von der Anzahl von Überschreitungshäufigkeiten von Schwellenwerten für thermische Behaglich-

keit sowie Kälte/Hitzestress ist ebenfalls möglich. Ähnliches gilt für die Niederschlagsverhältnisse mit Klasseneinteilungen von wenig bis viel Niederschlag.

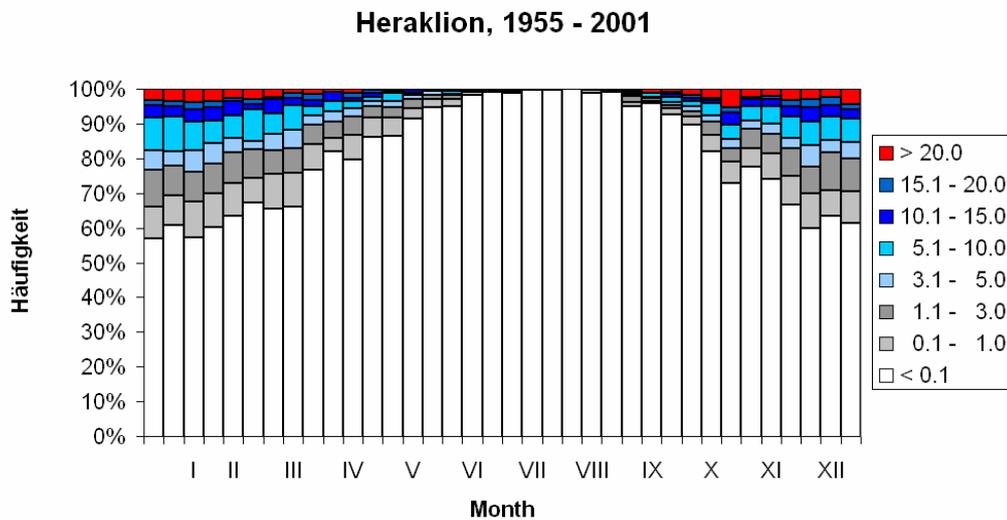


Abb. 4: Häufigkeitsdarstellung des Niederschlags in Heraklion für den Zeitraum 1955-2001

Fig. 4: Frequency distribution of precipitation for Heraklion, Crete for the period 1955 – 2001

Eine weitere Möglichkeit für die Integration von Klima/Bioklimainformationen für Tourismuszwecke stellt das Klima-Tourismus-Informations-Schema (CTIS) dar. Auf der Grundlage der Häufigkeitsdarstellungen (wie sie in der Abb. 3 und 4) gegeben wurden, werden bedeutende bioklimatische, klimatische in eine Schema integriert in dem prozentuale Angaben gemacht werden. Zusätzlich können die Häufigkeiten von Extremereignissen dargestellt werden. Die Angabe von Ereignissen entsprechend der Region, je nachdem ob es für ganzjährigen Tourismus oder nur saisonalen benötigt wird, kann einfach erfolgen. In Abb. 5 sind auf der Grundlage der unterschiedlichen Facetten des Klimas für den Tourismus (DE FREITAS, 2003, MATZARAKIS, 2006) verschiedene Größen illustriert, für welche die Daten bereits existieren oder die Berechnungen leicht durchzuführen sind.

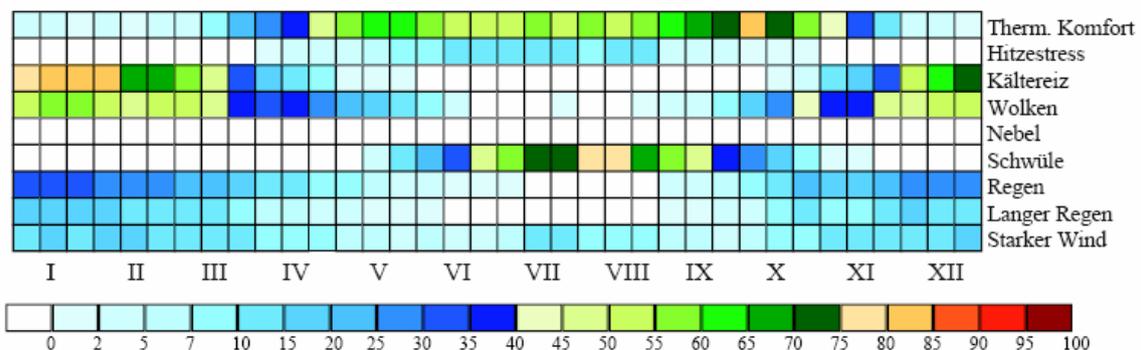


Abb. 5: Klima-Tourismus-Informations-Schema für Heraklion für den Zeitraum 1955-2001

Fig. 5: Climate-Tourism-Information-Scheme for Heraklion, Crete for the period 1955 – 2001

Für Heraklion sind folgende prozentuelle Häufigkeiten der folgenden Größen bzw. Parameters ausgewählt worden:

- Thermische Behaglichkeit (PET zwischen 18 °C und 29 °C)
- Hitzestress (PET > 35 °C),
- Kältereiz (PET < 8 °C),
- Bedeckungsgrad (> 5 Achtel),
- Nebel (auf der Grundlage von mit relativer Luftfeuchtigkeit > 93 %),
- Schwüle (auf der Grundlage von Dampfdruck > 18 hPa),
- Niederschlag (> 0 mm),
- Niederschlag (> 5 mm),
- Windgeschwindigkeit (> 8 m/s).

4 Schlußfolgerungen

Durch die Unterteilung der Monate in drei Intervalle ist es möglich eine gute zeitliche Auflösung von Information von Klimainformationen für den Tourismus und Erholungsbereich zu erzielen. Des weiteren können durch die Angabe von Häufigkeitsklassen von klimatischen und bioklimatischen Größen auf der Grundlage der verschiedenen Facetten des Klimas für Tourismuszwecke einfach verständliche und umfassende Diagramme erstellt werden. Ja nach Region und Zweck können unterschiedliche Größen oder Facetten des Klimas in der CTIS berücksichtigt.

Literatur

- ABEGG, B., 1996: Klimaänderung und Tourismus. Schlussbericht NFP 31. - vdf Hochschulverlag AG an der ETH. Zürich.
- DE FREITAS, C.R., 2003: Tourism climatology: evaluating environmental information for decision making and business planning in the recreation and tourism sector. - *Int. J. Biometeorology* **48**, 45-54.
- HÖPPE, P., 1999: The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. - *International Journal of Biometeorology* **43**, 71-75.
- KOCH, E., MARKTL, W., MATZARAKIS, A., NEFZGER, H., RUDEL, E., SCHUNDER-TATZBER, S., ZYGMUNTOWSKI, M., 2005: Klimatherapie in Österreich. Broschüre zu den Potentialen der Klimatherapie in Österreich. - Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit.
- MATZARAKIS, A., 2006: Weather and climate related information for tourism. - *Tourism and Hospitality Planning & Development* **3**, 99-115.
- MATZARAKIS, A., DE FREITAS, C.R. (eds), 2001: Proceedings of the first international workshop on climate, tourism and recreation. - International Society of Biometeorology, Commission on Climate Tourism and Recreation. December 2001.
- MATZARAKIS, A., DE FREITAS, C., SCOTT, D., 2004 (eds.): Advances in tourism climatology. - *Ber. Meteorol. Inst. Univ. Freiburg* Nr. 12.

MATZARAKIS, A., KARATARAKIS, N. SARANTOPOULOS, A., 2005: Tourism climatology and tourism potential for Crete, Greece. - *Annalen der Meteorologie* **41**, Vol. 2, 616-619.

MIĘCZKOWSKI, Z., 1985: The tourism climate index: A method for evaluating world climates for tourism. - *The Canadian Geographer* **29**, 220-233.

VDI, 1998: Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil I: Klima. - VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2.

Anschrift des Autors

Prof. Dr. Andreas Matzarakis, Meteorologisches Institut, Universität Freiburg, D-79085 Freiburg

Anpassung des Sommertourismus an den Klimawandel in Österreich

StartClim2006.D2: erste Ergebnisse

Andreas Matzarakis², Elisabeth Koch¹ und Ernest Rudel¹

¹Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

²Meteorologisches Institut, Universität Freiburg

Zusammenfassung

Wetter und das Klima zählen neben der geographischen Lage, der Topographie, dem Landschaftsbild, der Vegetation und der Tierwelt zu den natürlichen Faktoren des Tourismus- und Freizeitangebots. Sie sind aber auch limitierende Faktoren und Steuergrößen des Angebots. Aus diesem Grund wird der Klimawandel auch auf den Sommertourismus in Österreich erhebliche Auswirkung zeigen.

Im Projekt werden zunächst die meteorologischen und klimatologischen Größen aus der Tourismus Klimatologie und der Human-Biometeorologie bestimmt, dann die Methodik zur Quantifizierung des klimatischen Tourismuspotenzials in Fremdenverkehrsorten erarbeitet und schließlich allgemein verständliche Darstellungsdiagramme und Erklärungsschemata zur Beschreibung des Klimas für Fremdenverkehrszwecke entwickelt. Mit Hilfe der vom Max Planck Institut Hamburg berechneten Klimaprojektionen für 2031 – 2050 werden dann Sommertourismuseignungskarten auf der Grundlage von Anzahl von Tagen mit optimalen Bedingungen in 10 km und 1 km Auflösung erstellt und für eine Veröffentlichung bzw. Präsentation der erzielten Informationen für Fremdenverkehrsanbieter und – Behörden und für alle Interessierten im Internet bereitgestellt.

Development of an assessment scheme for the integration of weather and climate conditions in tourism

Abstract

Weather and climate as well as topographical and orographical conditions, vegetation and fauna play a prominent part in the assessment of tourism and leisure facilities. However, they are limiting and controlling factors too. Therefore climate change will have considerable consequences on summer tourism in Austria. In the project first of all will determined all the meteorological and climatological factors, which are important for tourism and human biometeorology and then develop a methodology to quantify the climatic tourist potential under a changed climate. Within the project there is the aim to compile and develop simple diagrams for the description of the climate for tourism. Projections of the climate conditions for 2021 - 2050 calculated by MPI Hamburg will help to prepare maps of Austria in 10 km and 1km resolution on the basis of the amount of days with optimal tourism conditions. Another deliverable is the publication of the achieved information via Internet for tourism – authorities and for all demanders that are interested.

1 Einleitung

Der Klimawandel, wie schon in den letzten 50 Jahren beobachtet, hat einen erheblichen Einfluss auf die Winterschneedecke. Die Veränderung der Schneedecke und des Wintertourismus ist Gegenstand von mehreren Untersuchungen im Alpenbereich und für die Mittelgebirge gewesen. Die bereits durchgeführten Untersuchungen kommen zum Ergebnis, dass die Dicke und Andauer der Schneedecke sich reduzieren wird und dies sozio-ökonomische und ökologische Folgen haben wird. Die bereits im Einsatz oder geplante technische Anpassungsmaßnahmen, wie Beschneiungsanlagen sind nur für höhere Lagen ab (1200 bzw. 1500 m) geeig-

net, weil die technischen Voraussetzungen (Lufttemperaturen kleiner 4 °C) nicht gegeben sind oder die technische Infrastruktur nicht ausreichen (limitierte Beförderungskapazität und niedrige Besucherfrequenz). Allerdings steht der Verkürzung der Wintersportsaison, durch wärmere Klimabedingungen eine Veränderung der Sommertourismusböglichkeit entgegen. Eine Untersuchung des Umweltbundesamtes besagt hinsichtlich des Sommertourismus, dass die Auswirkungen des Klimawandels auf den Sommertourismus vielschichtiger und weniger vorhersagbar sind und somit keine speziellen Strategien zur Anpassung formuliert werden können (UBA, 2005).

2 Methodik

Schon durchgeführte Untersuchungen für Österreich z.B. das ACTIVE-Projekt (Austrian Climate and Tourism Initiative) haben gezeigt, dass auf der Grundlage von modernen humanbiometeorologischen und tourismusklimatologischen Methoden, das Klimapotential für spezielle Anwendungen, wie Tourismus relativ genau abgeschätzt werden kann. Hierfür werden moderne Bioklimaindizes (Physiologisch Äquivalente Temperatur oder Predicted Mean Vote) angewendet, die auf die Grundlage der Energiebilanz des Menschen beruhen und den Einfluss der thermischen Umgebung des Menschen beschreiben und quantifizieren können, angewendet (KOCH et al., 2005). Die im Rahmen von ACTIVE erzielten Ergebnisse liefern Informationen in monatlicher Basis für den Zeitraum 1991-2000, erlauben aber keine retrospektive Analysen und keine Projektionen für die zukünftig zu erwartenden Klimabedingungen.

Der Vorteil der modernen Bioklimaindizes liegt darin, dass man eine integrale Bewertung durchführen kann, die den Einfluss von meteorologischen/klimatologischen (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und kurz- und langwellige Strahlungsflüsse) und thermo-physiologische von Menschen (Aktivität und Bekleidung) Größen, berücksichtigt (VDI, 1998).

Tab: 1: Ausgewählte Stationen für StartClim2006.D.2

Tab: 1: *Selected climate stations for StartClim2006.D2*

Station	Geogr. Länge	Geogr. Breite	Höhe (m)
Obergurgl	11.027	46.868	1938
Wien-Hohe Warte	16.356	48.249	198
Klagenfurt	14.333	46.650	447
Graz-Universität	15.448	47.080	366
Innsbruck-Universität	11.385	47.261	577
Sonnblick	12.958	47.054	3105
Villacher Alpe	13.673	46.604	2140
Salzburg Flughafen	13.002	47.801	430
Badgastein	13.133	47.117	1100
Feldkirch	9.600	47.267	439
Hoersching	14.191	48.241	298

Aus den neuesten Klimaprojektionen des Max-Planck Instituts für Meteorologie in Hamburg, mit dem REMO-Modell, die hochaufgelöste räumliche (10 km) und zeitliche (Tagesauflösung) Daten liefern, werden für die Zeiträume 1961 – 1990 und 2020 - 2050 zur Analyse und Bewertung des Klimas für Sommertourismus verwendet.

In der ersten Phase des Projektes werden die Daten von Stationen der ZAMG für lange Zeitreihen und im Nord-Süd und Ost-West Transekt sowie mit der Höhe analysiert und touris-

musklimatisch orientiert analysiert (KOCH et al., 2005, MATZARAKIS et al., 2004, MATZARAKIS, 2006).

Die Daten der ausgewählten Stationen (11) stammen vom Zeitraum 1950-2005 und umfassen folgende Parameter:

- Tagesmaximum der Lufttemperatur (°C),
- Tagesminimum der Lufttemperatur (°C),
- Lufttemperatur um 14 Uhr (°C),
- Relative Luftfeuchtigkeit um 14 Uhr (%),
- Windgeschwindigkeit um 14 Uhr (m/s),
- Bedeckungsgrad um 14 Uhr (1/8),
- Tagesmittelwert der Windgeschwindigkeit (m/s),
- Sonnenscheindauer (h),
- Tägliche Niederschlagssumme (mm).

Aus den zur Verfügung stehenden Daten werden auf der Grundlage der VDI-Richtlinie 3787 (VDI, 1998) die Physiologische Äquivalente Temperatur (PET) berechnet. Für die Bewertung der thermischen Umgebung des Menschen werden die klimatischen (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und lang wellige Strahlungsflüsse) und thermo-physiologischen (Kleidung und Aktivität) Faktoren berücksichtigt. Aus den Berechnungen werden die Häufigkeiten von PET-Klassen berechnet, die auch im Rahmen vom ACTIVE-Project als Grundlage dienen (KOCH et al., 2005). Die Häufigkeitsberechnungen der PET-Klassen erfolgen hier in 10-Tagesintervallen (Aufspaltung der Monate in drei Intervalle). Die Analyse umfaßt mittlere Werte von Tagen mit verschiedenen Überschreitungen von Schwellenwerten. Die Analyse der anderen Komponenten z.B. Niederschlag erfolgt ebenfalls in 10-Tagesintervallen in Form von Klassen und Häufigkeiten.

3 Ergebnisse

In Abb. 1 und 3 sind dargestellt die 10-Tages Häufigkeiten von Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) und die dazugehörigen Mittelwerte, Maxima und Minima für den untersuchten Zeitraum (1950-2005) für die Stationen Wien-Hohe Warte und den Sonnblick. Zusätzlich werden die Anzahl von Tagen mit PET-Überschreitungshäufigkeiten für Sommerbedingungen dargestellt. In den Abb. 2 und 4 werden die hygrischen Bedingungen, dazugehörige Mittelwerte und Überschreitungshäufigkeiten von Wind, Wasserdampf, relative Luftfeuchtigkeit und Bedeckungsgrad für den Zeitraum 1950-2005 für Wien-Hohe Warte und Sonnblick dargestellt. Aus den Abb. 1 bis 4 können die mittleren Verhältnisse und für Extremverhältnisse abgeleitet werden. Durch die Aufteilung der Monate in drei Intervalle können die Bedingungen viel detaillierter analysiert und dargestellt werden. Die Darstellung von Häufigkeitsklassen erlaubt überdies, eine genaue Beschreibung der klimatischen und bioklimatischen Verhältnisse in graphischer Form. Die Einteilung der Monate in drei Intervalle liegt auch im Bereich der Tage, die Erholungssuchende zur Verfügung haben, 1 bis 3 Wochen.

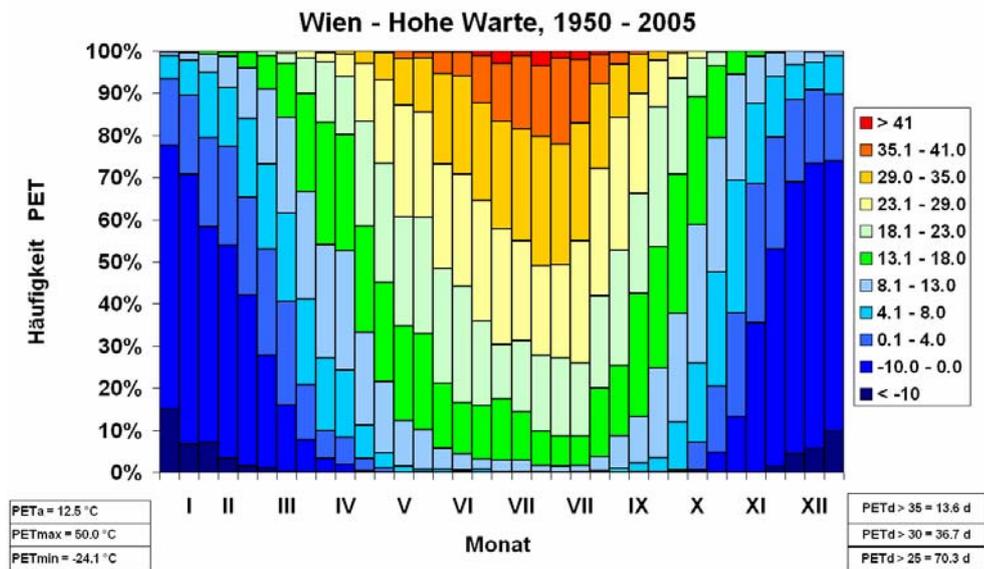


Abb. 1: Häufigkeitsverteilung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur und dazugehörige Mittelwerte, Maxima und Minima sowie die Überschreitungshäufigkeiten von PET-Schwellenwerten für Wien-Hohe Warte für den Zeitraum 1950-2005

Fig. 1: Frequency distribution of Physiologically Equivalent Temperature, mean, max and minimum conditions and amount of threshold conditions of PET for Vienna-Hohe Warte and the period 1950-2005

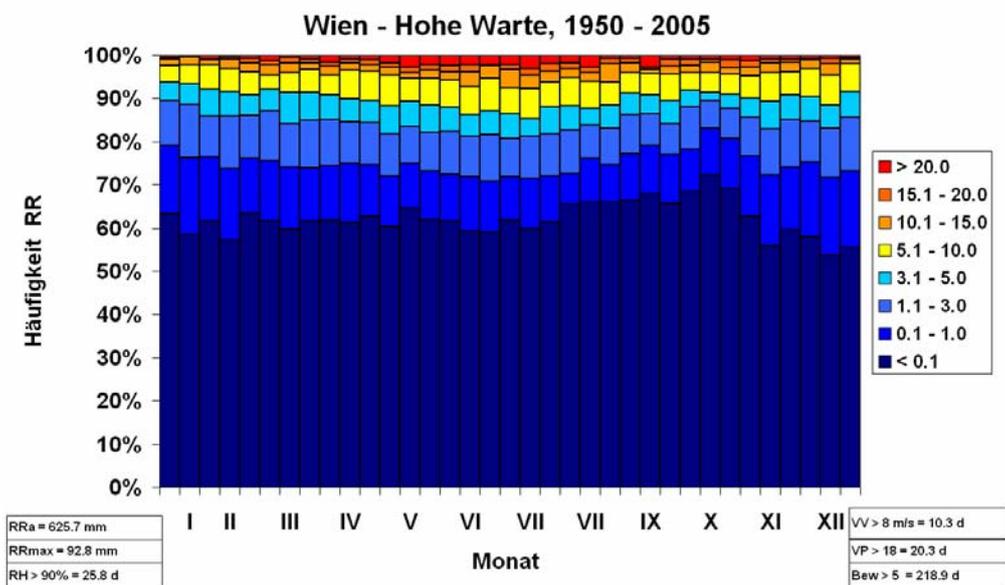


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung des Niederschlags und dazugehörige Mittelwerte und Maxima sowie die Überschreitungshäufigkeiten von Wind, Wasserdampf, Bewölkung und Relative Luftfeuchtigkeit und für Wien-Hohe Warte für den Zeitraum 1950-2005

Abb. 2: Frequency distribution of Precipitation, Sum of annual and max precipitation and amount of days with thresholds of relative humidity, wind speed, vapour pressure and cloud cover for Vienna-Hohe Warte and the period 1950-2005

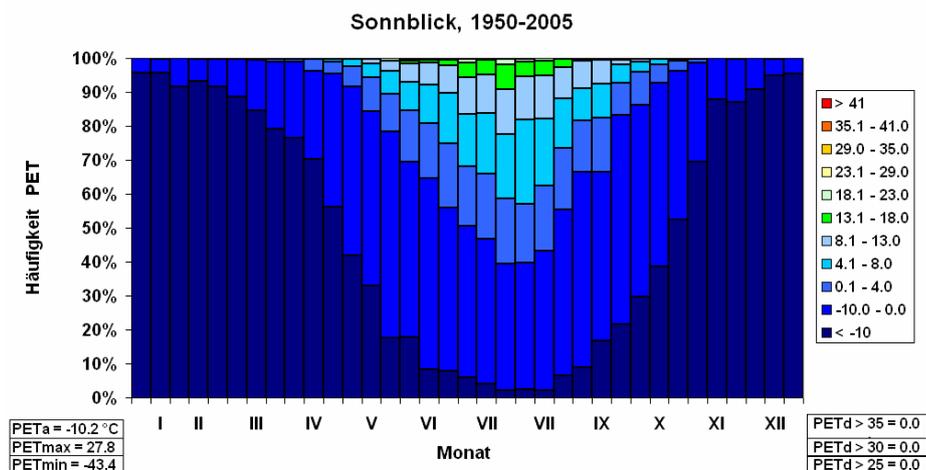


Abb. 3: Häufigkeitsverteilung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur und dazugehörige Mittelwerte, Maxima und Minima sowie die Überschreitungshäufigkeiten von PET-Schwellenwerten für den Sonnblick für den Zeitraum 1950-2005

Fig. 3: Frequency distribution of Physiologically Equivalent Temperature, mean, max and minimum conditions and amount of threshold conditions of PET for Sonnblick and the period 1950-2005

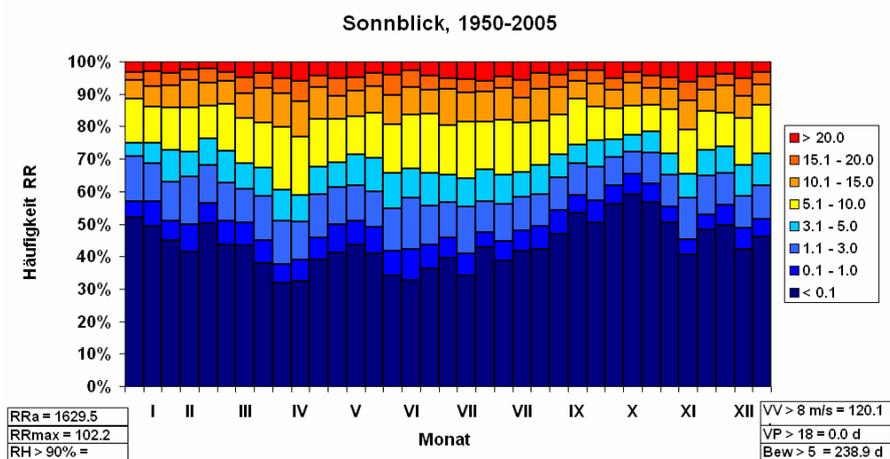


Abb. 4: Häufigkeitsverteilung des Niederschlags und dazugehörige Mittelwerte und Maxima sowie die Überschreitungshäufigkeiten von Wind, Wasserdampf, Bewölkung und Relative Luftfeuchtigkeit und für den Sonnblick für den Zeitraum 1950-2005

Abb. 4: Frequency distribution of Precipitation, Sum of annual and max precipitation and amount of days with thresholds of relative humidity, wind speed, vapour pressure and cloud cover for Sonnblick and the period 1950-2005

Als weiterer Schritt werden im Rahmen des StartClim2006.D2-Projektes die Klimaprojektionen des REMO-Modelles benutzt werden um für das Gebiet von Österreich die Tourismus-klimatische relevanten Bedingungen für die zukünftigen Jahrzehnte (2020-2050) zu berechnen (REMO). Aus den schon vorhandenen Daten in 10 km Auflösung werden PET- und Nie-

derschlagsanalysen durchgeführt und die Ergebnisse dann auf 1 km Auflösung mittels empirischem Downscaling übertragen.

4 Schlußfolgerungen

Die bereits existierenden Methoden aus der Tourismus Klimatologie und Human-Biometeorologie erlauben eine Analyse des Sommertourismuspotentials unter veränderten Klimabedingungen. Die eingesetzten Methodiken und Ergebnisse von ACTIVE (KOCH et al., 2005) und die retrospektive Analyse des thermischen Bioklimas (RUDEL et al., 2005) bilden eine Basis, können aber keine besonders zeitlich hochaufgelöste Informationen für Entscheidungsträger, über die zukünftigen Sommertourismus Bedingungen geben. Die Kombination von bioklimatischen Bedingungen in Häufigkeitsdarstellungen, verknüpft mit den Häufigkeitsverteilungen von Niederschlagsbedingungen und Überschreitungshäufigkeiten von Tagen mit neutralen thermischen Bedingungen, Hitzestress, Schwüle, Nebel, erhöhter Bewölkung und Extremwindverhältnissen können aus den Daten von Klimastation von Wetterdiensten leicht berechnet und in leicht verständlichen Diagrammen dargestellt werden. Die ausgewählten Parameter beinhaltet nicht nur die human-biometeorologische Wirkungskomplexe, wie thermische und aktinisch sondern auch Facetten aus der Tourismusklimatologie z.B. physikalisch (z.B. Wind, Nebel) oder auch ästhetisch (z.B. Sonnenscheindauer) und thermisch (DE FREITAS, 2003; MATZARAKIS, 2006).

Die schon erzielten Informationen geben eine umfassende Beschreibung des schon vorhandenen klimatischen Tourismuspotenzials wieder. Durch den Einsatz von Daten aus Klimaprojektionen, wird die Beschreibung und Quantifizierung der zukünftigen tourismusklimatischen Bedingungen für den Sommer möglich. Die Defizite an und in Anpassungsstrategien und Ausweichmöglichkeiten für Wintersporttourismus werden durch die hier gewonnenen Daten über die Sommerbedingungen in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung hilfreich für Entscheidungsträger sein.

Danksagung

Das Projekt „Anpassung des Sommertourismus an den Klimawandel in Österreich“ im Rahmen von StartClim 2006.D2 wird mit finanzieller Unterstützung des BMGF, des BMLFUW, des BMWA und der Österreichischen Hagelversicherung durchgeführt.

Literatur

- DE FREITAS, C.R., 2003: Tourism climatology: evaluating environmental information for decision making and business planning in the recreation and tourism sector. - *International Journal of Biometeorology* **48**, 45-54.
- KOCH, E., MARKTL, W., MATZARAKIS, A., NEFZGER, H., RUDEL, E., SCHUNDER-TATZBER, S., ZYGMUNTOWSKI, M., 2005: Klimatherapie in Österreich. Broschüre zu den Potentialen der Klimatherapie in Österreich. - Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit.
- MATZARAKIS, A., 2006: Weather and climate related information for tourism. - *Tourism and Hospitality Planning & Development* **3**, 99-115.
- MATZARAKIS, A., DE FREITAS, C., SCOTT, D., 2004 (eds.): *Advances in tourism climatology*. - Ber. Meteorol. Inst. Univ. Freiburg Nr. 12.
- RUDEL, E., MATZARAKIS, A., KOCH, E., 2005: Potential increase of heat load on humans in a changing climate. - *World Resource Review* **17**, 32-44.

UBA, 2005: Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimarelevanter Systeme. - Climate Change 08/05.

VDI, 1998: Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Luftthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil I: Klima. - VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2.

Anschrift der Autoren

Dr. Ernest Rudel, Dr. Elisabeth Koch, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hohe Warte 38, A-1190 Wien

Prof. Dr. Andreas Matzarakis, Meteorologisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Werderring 10, D-79085 Freiburg

KUNTIKUM: Klimatrends und nachhaltige Tourismusentwicklung in Küsten- und Mittelgebirgsregionen: Produkt und Infrastruktur-Innovation durch kooperative Lernprozesse und strategische Entscheidungsfindung

Heinrichs¹, H., Jetzkowitz¹, J., Kreilkamp², E., Matzarakis³, A.,

Möller¹, A. und Michelsen¹, G.

¹ Institut für Umweltkommunikation, Universität Lüneburg

² Abteilung für Strategisches Management und Tourismusmanagement, Universität Lüneburg

³ Meteorologisches Institut, Universität Freiburg

Zusammenfassung

Der Klimawandel ist im vollen Gange. Die globale Erderwärmung, die der Mensch mit verursacht, lässt den Meeresspiegel ansteigen, verschiebt Schnee- und Eiszonen und führt zunehmend zu extremen Wetterlagen. Wie kann sich unsere Gesellschaft auf diese Veränderungen einstellen? Dieser Frage geht KUNTIKUM nach. Die Abkürzung steht für „Klimatrends und nachhaltige Tourismusentwicklung in Küsten- und Mittelgebirgsregionen“, das Thema eines Forschungsprojektes der Universität Lüneburg und Universität Freiburg. Untersucht wird für den Tourismus, wie sich dieser besonders wetter- und klimasensible Wirtschaftsbereich an die Auswirkungen des Klimawandels anpassen kann. Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, kooperieren Vertreter der Tourismuswirtschaft und der Tourismuspolitik mit Wissenschaftlern aus den Wirtschaftswissenschaften, der Nachhaltigkeits- und der Klimaforschung.

Die Ziele sind ambitioniert. In drei Jahren gemeinsamer Forschung sollen in zwei ausgewählten Untersuchungsregionen neue Produkte und Infrastrukturelemente entstehen, die den heimischen Tourismus an Klimatrends und Extremwetter anpassen. Die Praktiker vor Ort entwickeln dabei mit den Wissenschaftlern Ideen, wie solche Anpassungen aussehen können und wie sie zu gestalten sind. Schließlich soll, um die Erfahrungen aus den Fallbeispielen auch für andere Tourismusregionen nutzbar zu machen, aus dem Projekt eine Informations- und Kommunikationsplattform, inklusive Weiterbildungsmodul, erwachsen.

Climate Change and Tourism: Strategies for Adaptation and Sustainable Development Abstract

The anticipatory adaptation to extreme weather events and expected climate change is an important aspect of sustainable development. Especially for economic sectors such as tourism, which are sensitive to weather and climate, the changing climate is an important challenge. Tourism is confronted with prognoses and scenarios, which predict shifting zones of snow, increase in extreme weather events or raising sea level. A strategically oriented tourism policy and business is therefore challenged to integrate climate change into their decision-making processes, in order to minimize socio-economic risks and take advantage of new opportunities. The anticipatory adaptation requires activities on the level of the individual tourism actors as well as processes of cooperative learning and joint decision-making in tourism regions. Before this background we present the conceptual framework and the research and development design of a current project. Different natural and social science disciplines work together with actors from tourism policy and business in order to analyze the impact of climate

change on tourism and develop strategies for adaptation and sustainable development. The three-year project is divided into four phases – diagnosis, assessment, strategy/product design, evaluation – where the scientific subprojects and the praxis partner are brought together in order to focus the research activities to the needs of the actors and to develop jointly adaptation strategies.

1 Problemstellung

Die Anpassung an extreme Wetterverhältnisse und erwartete Änderungen des Klimas ist ein wichtiger Aspekt einer nachhaltigen Entwicklung. Insbesondere für wetter- und klimasensible Wirtschaftsbereiche wie dem Tourismus stellt der Klimawandel, neben anderen Faktoren, eine relevante Herausforderung dar. Der Tourismus ist konfrontiert mit Prognosen und Szenarien, die beispielsweise ein Absinken von Schneegrenzen, Extremwetter oder Meeresspiegelanstieg thematisieren (ABEGG, 1996, MATZARAKIS et al., 2004). Eine strategisch ausgerichtete Tourismuspolitik und –industrie ist deshalb gut beraten, den Klimawandel in die Entscheidungsfindung zu integrieren, um sozio-ökonomische Risiken veränderter Klimabedingungen zu minimieren und Chancen zu optimieren. Individuelle Aktivitäten einzelner Akteure reichen dabei nicht aus, um auf regionaler Ebene angepasste Tourismusangebote zu entwickeln. Neben dem wünschenswerten Wettbewerb zwischen tourismuswirtschaftlichen Akteuren benötigen klimasensitive Infrastruktur- und Produktinnovationen zur nachhaltigen Entwicklung von Tourismusregionen auch kooperative Lern- und Gestaltungsprozesse. Die Bedeutung kollektiven Lernens zur Zukunftssicherung von Tourismusregionen wird auch in aktuellen tourismuswissenschaftlichen Analysen betont (SARETZKI et al., 2002).

Für Tourismus-bezogene Kooperationsprozesse bedeuten die Charakteristika des Klimawandels und der sozialen Verarbeitungsprozesse, dass die soziale und sachliche Komplexität (Akteurvielfalt, Wirkungszusammenhänge, Unsicherheit) von Anpassungsstrategien an Klima-Veränderungen eine zielgerichtete Verknüpfung von (antizipativer) tourismus- und klimawissenschaftlicher Expertise mit den (heterogenen) Praxiserfahrungen, Interessen und Perspektiven der Tourismus-Akteure erforderlich machen.

Um soziales Lernen bewusst zu stimulieren und damit proaktives Handeln unter Unsicherheitsbedingungen zu ermöglichen sind entsprechend Wissenschaftler und Praxis-Akteure in einem transdisziplinären Forschungs- und Entwicklungsprozess zu involvieren.

2 Zielsetzung

Vor diesem Hintergrund will das transdisziplinäre Verbundvorhaben drei Gesamtziele erreichen, die sich in konkreten Produkten manifestieren. Der Forschungs- und Entwicklungsprozess wird in zwei Modellregionen – Schwarzwald und Nordseeküste – durchgeführt.

Gesamtziele

- (Weiter-)Entwicklung von Produkt- und Infrastruktur-Innovation zur proaktiven Anpassung an Klimatrends und Extremwetter in den ausgewählten Untersuchungsregionen.
- (Weiter-)Entwicklung von nachhaltigkeitsorientierten Gestaltungs- und strategischen Entscheidungskompetenzen bei tourismuspolitischen und –wirtschaftlichen Akteuren im Projektverbund
- Entwicklung eines integrativen Konzepts zur Förderung nachhaltigkeitsorientierter Entscheidungs- und Gestaltungskompetenz im Themenfeld Tourismus und Klimawandel

Produkte

- Kooperations-Netzwerk

Der Aufbau und die Etablierung von Kooperations-Netzwerken zur proaktiven Anpassung an Extremwetterereignisse und den Klimawandel in den beiden Untersuchungsregionen Schwarzwald und Nordseeküste wird ein konkretes Ergebnis des Vorhabens sein. Die Anpassung der Tourismusregionen an Klimaveränderungen erfordert Abstimmungsprozesse zwischen tourismuspolitischen und –wirtschaftlichen Akteuren. Durch kooperative Lern- und Gestaltungsprozesse soll eine gemeinsame Situationsdefinition ermöglicht, zukunftsfähige Leitbilder für eine klimasensible nachhaltige Tourismusentwicklung definiert und innovative Tourismusangebote entwickelt und initiiert werden. Das Projekt zielt damit auf die (Weiter-)Entwicklung von Kommunikations- und Kooperationsstrukturen zwischen den relevanten Akteuren in den beiden Regionen zur kontinuierlichen Anpassung an die Herausforderungen des Klimawandels.

- Informations- und Kommunikationsinfrastruktur

Zentral für den Aufbau und die Stabilisierung der Kooperations-Netzwerke ist die Entwicklung und Bereitstellung einer Informations- und Kommunikationsplattform. Informations- und Kommunikationstechnologie wird im Verbundvorhaben eingesetzt sowohl als Informationssystem zur Integration der komplexen Informationen und Expertisen (insbesondere der tourismus- und klimawissenschaftlichen Daten) als auch als Neues Medium zur Unterstützung komplexer Kommunikationsprozesse im Multi-Stakeholder-Arrangement der beiden Tourismusregionen. Der Aufbau des Informationssystems und einer funktionsadäquaten Kommunikationsinfrastruktur im Projektverlauf soll zum einen die kooperativen Lern- und Gestaltungsprozesse während der Projektlaufzeit unterstützen, zum anderen als Produkt den Tourismusregionen über das Verbundvorhaben hinaus zur Verfügung stehen, um die strategische Anpassung, die mit dem Projektende nicht abgeschlossen sein kann, weiterführen zu können.

- Strategie- und Produktinnovation

Der Aufbau der Kooperations-Netzwerke in den beiden Regionen sowie die Entwicklung und Nutzung computer-basierter Informations- und Kommunikationsinfrastruktur ist kein Selbstzweck. Sie dient der Entwicklung umsetzungsfähiger, nachhaltiger Tourismusangebote, die die Chancen und Risiken der Klimaveränderung berücksichtigen. Auf der Grundlage der tourismus- und klimawissenschaftlichen Situations- und Trendanalyse werden dabei zunächst die Anforderungen an eine nachhaltige strategische (Marketing)Planung zur Integration des Themas Klimawandel in das konventionelle Management bestimmt. Anschließend werden dann gemeinsam mit den Praxispartnern innovative Tourismusstrategien zur Anpassung an Klimawandelbedingungen entwickelt und ihre Umsetzung in operative Vorgehensweisen konkretisiert. Die (Weiter-)Entwicklung der nachhaltigen strategischen (Marketing-)Planung sowie die Gestaltung exemplarischer umsetzungsfähiger Tourismusangebote in den beiden Tourismusregionen sind somit weitere zentrale Produkte des Verbundvorhabens.

- Weiterbildungsmodul

Um eine dauerhafte Integration der Projekterkenntnisse im Hinblick auf die Gestaltung von nachhaltiger Tourismusstrategien und –produkte zu gewährleisten, ist die Weiterbildung und Qualifizierung der Akteure zentral. Neben der inhaltlichen Ausarbeitung von Tourismusangeboten müssen Entscheidungs- und Gestaltungskompetenzen durch individuelles und organisationales Lernen gefördert werden, um die Handlungsrountinen der tourismuspolitischen und –wirtschaftlichen Akteure auf die Herausforderungen des Klimawandels einzustellen. Dafür werden in Kooperation mit den anderen wissenschaftlichen Teilprojekten und den Praxispart-

nen zielgruppenspezifische Lernmaterialien und eine computer-basierte Lernplattform zum kollaborativen, selbstgesteuerten Lernen entwickelt, im Projektverlauf exemplarisch erprobt und evaluiert. Als Endprodukt wird dann ein Weiterbildungsmodul zur Verfügung stehen zur Förderung von nachhaltigkeitsorientierter Entscheidungs- und Gestaltungskompetenz bei Tourismusakteuren, dass sowohl für die beiden Beispielregionen als auch für die Tourismusbranche allgemein nützlich sein kann.

- Best-Practice Leitfaden

Die Erkenntnisse des Forschungs- und Entwicklungsprozesses in den beiden Beispielregionen sollen in einem integrativen Konzept zusammengeführt werden, das in Form eines Leitfadens weiteren tourismuspolitischen und –wirtschaftlichen Akteuren zugänglich gemacht werden soll. Am Beispiel der beiden Modellregionen werden in dem Konzept die Erfolgsfaktoren und Verfahrensschritte für Entwicklungsprozesse in Tourismusregionen und bei politischen und wirtschaftlichen Akteuren dargelegt. Das integrative Konzept soll darstellen, wie sich Kooperationsprozesse gestalten lassen, wie tourismus- und klimawissenschaftliche Expertise durch I&K nutzergerecht aufbereitet und kommuniziert werden kann, wie das Thema Klimawandel in die strategische und operative (Marketing)Planung integriert werden kann und wie nachhaltigkeitsorientierte Entscheidungs- und Gestaltungskompetenzen gefördert werden können. Mit dem Best-Practice Leitfaden wird der Transfer der Projekterkenntnisse in die Tourismuspraxis ermöglicht.

- Wissenschaftliche Publikationen und Vorträge

Neben diesen praxisorientierten Produkten werden die zu erwartenden vielfältigen disziplinären, inter- und transdisziplinären Ergebnisse des Verbundvorhabens in die jeweiligen wissenschaftlichen Communities kommuniziert. Da das Themenfeld „Tourismus und Klimawandel“ von großer internationaler Bedeutung ist, werden wir neben Publikationen in nationalen Fachzeitschriften und Vorträgen auf nationalen Konferenzen insbesondere auf internationale Journals und Konferenzen zielen, um die Erkenntnisse in die einschlägigen internationalen Fachdiskurse einzubringen.

Mit diesen „Produkten“ sollen die drei Gesamtziele des transdisziplinären Verbundvorhabens realisiert werden. Wichtig ist dabei, dass neben den wissenschaftlichen Publikationen und Vorträgen die fünf praxisrelevanten „Produkte“ im Zentrum des Vorhabens stehen.

3 Projektstruktur

Die Projektziele und Produkte sollen mit einer transdisziplinären Projektstruktur erreicht werden, in der die beteiligten wissenschaftlichen Teilprojekte von Beginn an mit Praxispartnern aus Tourismuspolitik und -wirtschaft zusammenarbeiten. Die wissenschaftlichen Projekte bringen Expertise zu folgenden Bereichen ein:

- 1) Projektkoordination und Kooperationsprozesse
- 2) Tourismus-Analyse und –Strategie
- 3) Wetter- und Klimaanalyse
- 4) Informations- und Kommunikationssystem
- 5) Wissenstransfer und Kompetenzentwicklung

Um die Arbeitsleistungen und Aktivitäten der wissenschaftlichen Teilprojekte sowie der Praxispartner eng miteinander zu verzahnen wird ein systematisches Schnittstellenmanagement durch das TP Projektsteuerung und Kooperationsprozesse durchgeführt. Die Organisation der

bi- und multilateralen Beziehungen ist zentral für die Orientierung der Projektbeteiligten auf die Gesamtperspektive, den Datenaustausch, sowie die Kommunikation von und über Erkenntnisse, Einschätzungen und Beurteilungen von Sachverhalten zwischen den Partnern. Die im Projektantrag beschriebenen Arbeitstreffen und Workshops und der Aufbau eines Informationssystems als gemeinsame Wissensbasis sind dafür zentrale Instrumente. Darüber hinaus wird das TP Projektsteuerung auch eine kontinuierliche Koordination der Projektpartner, ihrer Aktivitäten und Arbeitsleistungen gewährleisten.

Für den Aufbau der Kooperations-Netzwerke werden das TP 1 (Kooperationsmanagement) und das TP 2 (Tourismusanalyse) ihre Expertise bündeln. Für die Akteursfeldanalyse zu Beginn der Netzwerkbildung werden Kooperations-Expertise und Tourismus-Expertise zusammengeführt. Das anschließende Kooperationsmanagement inklusive begleitender Kooperationsanalyse liegt dann in der Verantwortung von TP1.

Für den Aufbau der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur ist das TP 4 (Informationssystem) federführend verantwortlich. Da eine nutzergerechte Systemarchitektur angestrebt wird, wird der Entwicklungsprozess von einem kontinuierlichen Meinungsaustausch mit den Praxispartnern begleitet. Für die Integration der tourismus- und insbesondere der klimawissenschaftlichen (Simulations-)Daten in das Informationssystem gibt es bilaterale Kooperationen von TP 4 mit TP 2 und TP 3. Für die effiziente Nutzung der Informations- und Kommunikationsplattform im Verbund gibt es eine Zusammenarbeit zwischen TP 1 und TP 4.

Für die Entwicklung der Strategie- und Produktinnovation ist federführend das TP 2 verantwortlich. Das TP 2 arbeitet bei seinen Aktivitäten eng zusammen mit den Praxispartnern, um die Anwendungsorientierung des Forschungs- und Entwicklungsprozesses zu gewährleisten. Sowohl bei der Entwicklung eines Fragebogens zur Erhebung des Reiseverhaltens unter Klimawandelbedingungen als auch zur Bestimmung der Anforderungen an die Integration des Themas in die strategische (Marketing-)Planung und die Entwicklung von Tourismusangeboten wird es einen engen Meinungsaustausch zwischen TP 2 und den Praxispartnern geben.

Für die Durchführung der kooperativen Lern- und Gestaltungsprozesse, insbesondere in den Workshops, arbeiten TP 2 und TP 1 zusammen. Zwischen TP 2 und TP 4 wird es eine bilaterale Zusammenarbeit geben hinsichtlich der Frage, wie das Informationssystem für die Strategie- und Produktinnovation nutzbar gemacht werden kann. Und die Klima-Analysen von TP 3 sind zentral für die Situations- und Trendanalyse und als Grundlage für die Entwicklung von Strategien und Produkten.

Das Weiterbildungsmodul liegt in der Hand von TP 5. Für die Entwicklung der kollaborativen Lernplattform zum selbstgesteuerten Lernen wird es eine enge Zusammenarbeit geben mit TP 4 zur Abstimmung der Informations- und Kommunikationstechnologien sowie mit den Praxispartnern, um das System nutzergerecht zu gestalten. Für die Entwicklung der Lernmaterialien ist die tourismus- und klimawissenschaftliche Expertise von TP 2 und TP 3 zentral. Auch hierbei wird es einen Meinungsaustausch mit den Praxispartnern geben, um ihren Bedarf zur Förderung von nachhaltigkeitsorientierten Entscheidungs- und Gestaltungskompetenzen zielgenauer zu befriedigen.

Die Federführung für die Erstellung des integrativen Konzepts und des Best-Practice Leitfadens liegt bei TP 1. Auf der Grundlage der begleitenden Kooperationsanalyse wird ein Konzeptentwurf erstellt, der dann multilateral mit den Projektpartnern auf dem letzten Arbeitstreffen diskutiert wird. Die Beschreibung der einzelnen Bausteine des Verfahrensprozesses – Informations- und Kommunikationsplattform, Strategie- und Produktinnovation, Weiterbildungsmodul – werden dann von den jeweiligen TP's geliefert und von TP 1 in den Leitfaden integriert.

Wie die beschriebenen vielfältigen Schnittstellen zwischen den Projektpartnern zur Realisierung der Verbund-Produkte zeigen, lassen sich neue - möglicherweise auch überraschende - Erkenntnisse an den Grenzen der beteiligten Disziplinen erwarten. Das skizzierte Integrations- und Schnittstellenmanagement ist eine wichtige Voraussetzung für die Erfolg versprechende Bearbeitung der Projekt-Ziele und die Realisierung der Projekt-Produkte.

4 Arbeitsprogramm

Der Erfolg transdisziplinärer Verbundvorhaben hängt in hohem Maße ab von der Koordination und Synchronisation der einzelnen Arbeitsleistungen in den Teilprojekten und ihrer systematischen Zusammenführung im Projektverbund. Einerseits benötigen die wissenschaftlichen Teilprojekte sowie die Praxispartner Zeit- und Spielräume für Ihre Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, andererseits muss durch eine klare Projektstruktur die Gesamtperspektive sichergestellt werden. Das Projekt ist in vier Phasen gegliedert, in denen auf Arbeitstreffen und in Workshops die wissenschaftlichen Teilprojekte und Praxispartner an den Gesamtzielen des Verbundes arbeiten und die jeweiligen Arbeitsergebnisse aus den Teilprojekten mit Blick auf die fünf Projekt-Produkte einbringen:

1) Diagnose

In der ersten Phase wird eine Situations- und Trendanalyse durchgeführt. Die Wissenschafts- und Praxispartner eruieren gemeinsam, welche Daten für die Klimawandel-bezogenen Entscheidungsprozesse notwendig sind und inwieweit aktuelle Entscheidungsverfahren in Tourismuspolitik und –wirtschaft für die neuen Herausforderungen angemessen sind.

2) Bewertung

In der zweiten Phase werden auf der Grundlage der (ersten) Analyseergebnisse im Hinblick auf die spezifischen Herausforderungen in zwei Fokusregionen Situationsbewertungen vorgenommen. Das Ziel dabei ist, Handlungsbereiche zu identifizieren.

3) Strategieentwicklung / Produktgestaltung

Die strategische Entwicklung von neuen Infrastrukturen und Produkten in den beiden Modellregionen steht im Mittelpunkt der dritten Phase. Ein Methoden-Mix von Partizipations-, Kooperations- und Kreativitätstechniken wird eingesetzt, um einen kooperativen Lern- und Gestaltungsprozess zu ermöglichen.

4) Evaluation

In der letzten Phase evaluieren Wissenschafts- und Praxispartner gemeinsam, inwieweit der transdisziplinäre Forschungs- und Entwicklungsprozess beigetragen hat zur Steigerung der individuellen, institutionellen und kollektiven Kompetenzen für ein antizipatives Management von Klimawandel in Tourismuspolitik und –wirtschaft.

Mit diesem Ansatz will das Projekt KUNTIKUM einen Beitrag leisten sowohl zur wissenschaftlichen Diskussion über Klimawandel und Tourismus als auch zur konkreten Stärkung von Adaptationsfähigkeit wirtschaftlicher und politischer Akteure im Tourismus.

Literatur

ABEGG, B., 1996: Klimaänderung und Tourismus. Schlussbericht NFP 31. - vdf Hochschulverlag AG an der ETH. Zürich.

MATZARAKIS, A., DE FREITAS, C., SCOTT, D., 2004 (eds.): Advances in tourism climatology. - Ber. Meteorol. Inst. Univ. Freiburg Nr. 12.

SARETZKI, A., WILKEN, M., WÖHLER, K.-H. (2002): Lernende Tourismusregionen: Vernetzung als strategischer Erfolgsfaktor kleiner und mittlerer Unternehmen. Münster.

Anschrift der Autoren

Prof. Dr. Harald Heinrichs, Dr. Jens Jetzkowitz, Prof. Dr. Andreas Möller, Prof. Dr. G. Michelsen, Institut für Umweltkommunikation, Universität Lüneburg, Scharnhorststr. 1, 21332 Lüneburg

Prof. Dr. Edgar Kreilkamp, Abteilung für Strategisches Management und Tourismusmanagement, Universität Lüneburg, Scharnhorststr. 1, 21332 Lüneburg

Prof. Dr. Andreas Matzarakis, Meteorologisches Institut, Universität Freiburg, Werderring 10, 79085 Freiburg

**RESTER – ein Verbundprojekt zur Reduzierung
des Sturmschadensrisikos für Wälder in Baden-Württemberg
vor dem Hintergrund des regionalen Klimawandels**

Helmut Mayer¹⁾, Dirk Schindler¹⁾, Ulrich Kohnle²⁾, Sebastian Hein²⁾,
Christoph Kottmeier³⁾, Michael Kunz³⁾ und Bodo Ruck⁴⁾

- 1) Meteorologisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- 2) Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abt. Waldwachstum
- 3) Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Universität Karlsruhe/Forschungszentrum Karlsruhe
- 4) Laboratorium für Gebäude und Umweltaerodynamik, Institut für Hydrodynamik, Universität Karlsruhe

Zusammenfassung

Im Rahmen des regionalen Klimawandels wird auch eine Häufung von extremen Sturmereignissen in Mitteleuropa prognostiziert. Sie beeinträchtigen die essentiellen Funktionen von Wäldern in vielfältiger Weise. Daher wurde im Rahmen des Forschungsprogramms „Herausforderung Klimawandel“ des Umweltministeriums Baden-Württemberg im Herbst 2006 das dreijährige Verbundprojekt „Strategien zur **Reduzierung** des **Sturmschadensrisikos** für **Wälder**“ (RESTER) etabliert, um auf der Grundlage des aktuellen Forschungsstandes praxistaugliche Strategien zur Reduzierung des Sturmschadensrisikos für die Wälder in Baden-Württemberg unter derzeitigen und zukünftigen regionalen Klimabedingungen zu entwickeln. In RESTER sind vier interdisziplinäre Partner verbunden, um die auf konkreten Arbeitshypothesen beruhenden Zielsetzungen zu bearbeiten.

**RESTER – a cooperative project to reduce the storm risk of forests
in the federal state of Baden-Württemberg
against the background of regional climate change**

Abstract

An accumulation of heavy storms is predicted by regional climate simulation models for Central Europe. They impact the significant functions of forests in an extremely negative way. Therefore, the three-year cooperative project “Strategies to reduce the storm risk of forests” (RESTER) was established in autumn 2006 within the scope of the research program “Challenge Climate Change” of the Ministry of Environment Baden-Württemberg. Based on the present state-of-the-art, the objective of RESTER is the development of applicable strategies to reduce the storm risk of forests in the federal state of Baden-Württemberg under current and future, regional climate conditions. Four interdisciplinary partners are cooperating to achieve the aims of RESTER, which were derived from distinct working hypotheses.

1. Einleitung

Winterstürme, Gewitterstürme und Tornados verursachen Schäden in Millionenhöhe. Dabei sind Winterstürme durch ihre große Ausdehnung und hohe Windgeschwindigkeit besonders schadensintensiv, während Gewitterstürme und Tornados nur lokal, aber mit ebenfalls sehr großer Windgeschwindigkeit auftreten.

Als herausragendes Sturmereignis in den letzten Jahrzehnten ist der Orkan „Lothar“ einzustufen (SCHMÖCKEL, 2006), der am 26. Dezember 1999 in den Wäldern Baden-Württembergs zu einem Gesamtschaden von ca. $25 \cdot 10^6$ Efm führte, was etwa dem 3-fachen Jahreseinschlag in diesem Bundesland entspricht (MAYER und SCHINDLER, 2002). Der dadurch bedingte finanzielle Verlust wurde auf ca. 770 Millionen € geschätzt. Der jüngste Orkan „Kyrill“ (18. Januar 2006) führte nach Angaben des Deutschen Forstwirtschaftsrats in den Wäldern Deutschlands, vor allem in der Mitte des Landes, zu Schäden von ca. 20 Millionen m³ Holz.

Neben betriebswirtschaftlichen Schäden, d.h. in der Produktionsfunktion von Wäldern, verursachen Sturmschäden auch Folgeschäden im Bereich der Schutzfunktionen und der Erholungsfunktion von Wäldern, d.h. neben betrieblichen sind auch ökologische und gesellschaftliche Interessen betroffen.

2. Problemstellung

Aufgrund der erheblichen, vielschichtigen Schadenswirkung von Sturmschäden in Wäldern besteht ein begründetes Interesse an der Entwicklung von Strategien zur Reduzierung des Sturmschadensrisikos für Wälder (u.a. RUCK et al., 2003). Die Anforderungen danach werden durch den derzeit ablaufenden Klimawandel erhöht, der nicht nur durch Trends von Klimavariablen, sondern auch durch eine Häufung von extremen Wetterereignissen gekennzeichnet ist. So gilt es nach dem neuesten Klimabericht des IPCC als wahrscheinlich, dass sich die Zugbahnen von außertropischen Stürmen im Rahmen des Klimawandels bereits verlagert haben und verlagern werden (IPCC, 2007).

Extreme Sturmschadensereignisse in Wäldern werden immer wieder in retrospektiver Weise ausführlich analysiert, u.a. um ihr Ausmaß zu dokumentieren und Folgearbeiten zielgerichtet planen zu können. Vor dem Hintergrund der bisherigen Waldbewirtschaftung, die weitgehend an einer maximalen Wertschöpfung orientiert ist, weisen die bisher entwickelten Konzepte zur Reduzierung von Sturmschäden in Wäldern teilweise konkurrierende Zielvorstellungen auf und wurden daher nur selten in die Praxis umgesetzt.

Die im Rahmen des regionalen Klimawandels prognostizierte Häufung von extremen Wetterbedingungen, wie Sturmereignissen, in Mitteleuropa (LECKEBUSCH et al., 2006; PINTO et al., 2007) führt dazu, dass Strategien zur Reduzierung von Sturmschäden in Wäldern eine gestiegene Bedeutung im Sinne eines vorbeugenden Krisenmanagements erlangen. Diese Konzepte sollen die Resultate bisheriger Untersuchungen und praktischer Erfahrungen einschließen, aber in verstärktem Maße neuere Ergebnisse aus physikalisch basierten Untersuchungen zur Kausalkette von Sturmschäden in Wäldern berücksichtigen (Abb. 1). Im darin enthaltenen Komplex „TOPEX“ (topographic exposure) sind Standortseigenschaften zusammengefasst.

3. Partner im Verbundprojekt RESTER

Im Rahmen des vom Umweltministerium Baden-Württemberg mit Mitteln aus der Zukunftsoffensive IV geförderten Forschungsprogramms „Herausforderung Klimawandel“, das von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) koordiniert wird, wurde im Herbst 2006 das dreijährige, interdisziplinäre Verbundprojekt „Strategien zur Reduzierung des Sturmschadensrisikos für Wälder“ (RESTER) etabliert, um auf der Grundlage des aktuellen Forschungsstandes praxistaugliche Konzepte zur Reduzierung des Sturmschadensrisikos für die Wälder in Baden-Württemberg unter derzeitigen und zukünftigen, regionalen Klimabedingungen zu entwickeln.

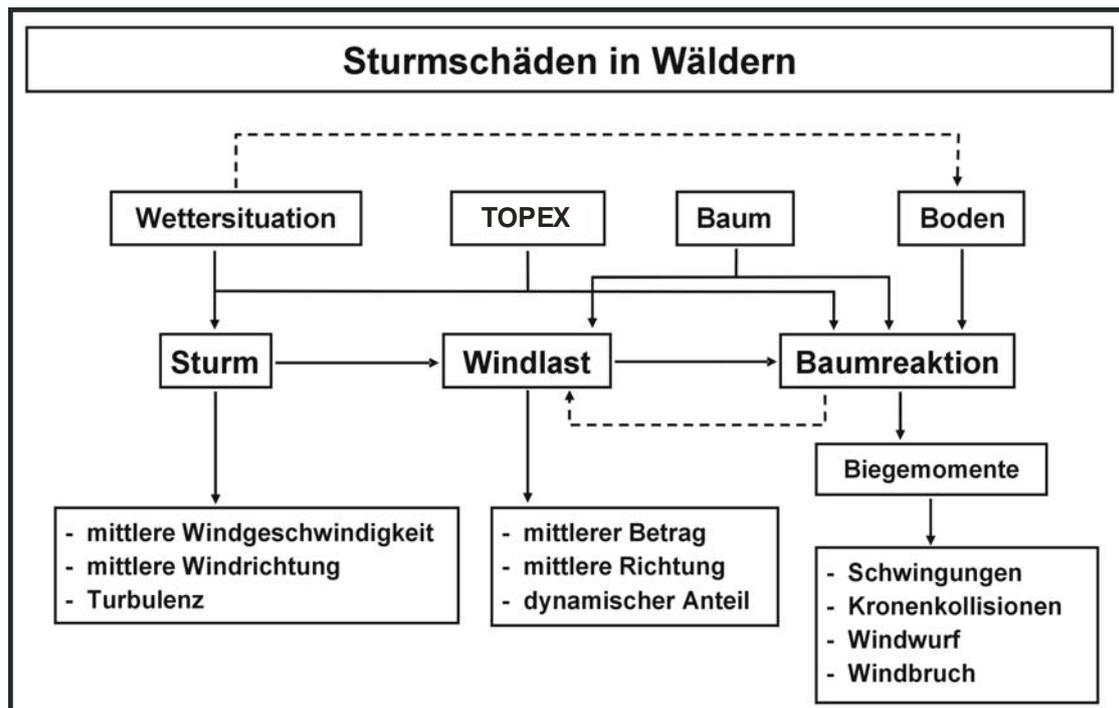


Abb. 1: Kausalkette für Sturmschäden in Wäldern (nach SCHINDLER und MAYER, 2003)

Fig. 1: Flowchart of storm damages in forests (according to SCHINDLER and MAYER, 2003)

Direkte Partner mit Teilprojekten im Verbundprojekt RESTER sind:

- Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Universität Karlsruhe (TH); Projektleitung: Dr. M. Kunz, Prof. Dr. Ch. Kottmeier (RESTER-UniKA-1),
- Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe (TH); Projektleitung: Prof. Dr. B. Ruck (RESTER-UniKA-2),
- Meteorologisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg; Projektleitung: Prof. Dr. H. Mayer (RESTER-UniFR).

Der unabdingbare direkte Bezug zum Objekt „Wald“ ist durch eine kostenneutrale Einbeziehung der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA), Abt. Waldwachstum (PD Dr. U. Kohnle), gewährleistet. Sie verfügt über viele der erforderlichen Bestandesdaten und Bodendaten bzw. kann den Zugang zu ihnen herstellen. Die Koordination innerhalb von RESTER erfolgt im Teilprojekt RESTER-UniFR.

4. Arbeitshypothesen

Die Arbeitshypothesen im Verbundprojekt RESTER lauten:

- a) Infolge des Klimawandels steigen die Häufigkeit und Intensität von extremen Wetterereignissen, wie starke Stürme, an.
- b) Wälder sind in Abhängigkeit von Standort, Struktur und Windlast hochgradig sturmschadensgefährdet.
- c) Über die vorbeugende Anwendung von geeigneten waldbaulichen Konzepten lassen sich Sturmschäden in Wäldern reduzieren.

- d) Waldbauliche Konzepte, d.h. Strategien, zur Reduzierung des Sturmschadensrisikos von Wäldern basieren auf den Einflussfaktoren, die in der Kausalkette für Sturmschäden in Wäldern zusammengefasst sind, ihren spezifischen Abläufen und ihren Wechselwirkungen.
- e) Für die Erarbeitung von zeitgemäßen Strategien zur Reduzierung von Sturmschäden in Wäldern vor dem Hintergrund des Klimawandels bilden bisherige Konzepte, die häufig auf Erkenntnissen aus Sturmschadensbewältigungen beruhen (retrospektive Methode), die Grundlage. Sie lässt sich durch Ergebnisse aus numerischen Simulationen (u.a. zum räumlich differenzierten Strömungsfeld), physikalischen Simulationen (experimentelle Untersuchungen an Modellbeständen im atmosphärischen Grenzschichtwindkanal) und Simulationsanalysen zur kritischen Windgeschwindigkeit sowie über Karten mit potenziell sturmgefährdeten Waldstandorten in Baden-Württemberg unter derzeitigen und zukünftigen regionalen Klimabedingungen ergänzen und aktualisieren.
- f) Zur Reduzierung des derzeitigen und zukünftigen Sturmschadensrisikos für Wälder in Baden-Württemberg lassen sich praxistaugliche Strategien entwickeln und in Form eines Leitfadens oder Handbuchs zusammenfassen.

5. Zielsetzungen

Auf der Grundlage der Arbeitshypothesen hat das auf die Wälder in Baden-Württemberg bezogene Verbundprojekt RESTER folgende Zielsetzungen, die schwerpunktmäßig von den in Klammern genannten RESTER Teilprojekten bearbeitet werden:

- a) Zusammenfassung von bisherigen waldbaulichen Methoden zur Reduzierung des Sturmschadensrisikos für Wälder in Baden-Württemberg (RESTER-UniFR in Verbindung mit der FVA Baden-Württemberg),
- b) Simulation der sturmrelevanten Strömung in ganz Baden-Württemberg im Winterhalbjahr unter derzeitigen Klimabedingungen (Referenzzeitraum: 1971 bis 2000) in Baden-Württemberg (RESTER-UniKA-1),
- c) Simulation der sturmrelevanten Strömung in ganz Baden-Württemberg im Winterhalbjahr unter zukünftigen Klimabedingungen (Referenzzeitraum: 2021 bis 2050) in Baden-Württemberg (RESTER-UniKA-1),
- d) Berücksichtigung von mittlerer Strömung und Windböigkeit (dynamischer Anteil der Windlasten) in b) und c) (RESTER-UniKA-1),
- e) Erstellung einer Klimatologie der Winterstürme in Baden-Württemberg unter derzeitigen und zukünftigen Klimabedingungen (RESTER-UniKA-1),
- f) Windkanaluntersuchungen zur Analyse der Einflüsse von (i) Baumdichteverteilung, (ii) Traufporosität, (iii) Traufelastizität und (iv) Traufwinkel auf Schubspannung/Impulseintrag in Kronendachhöhe sowie der Zusammenhänge zwischen Biegemomenten und Baumauslenkungen im Bestand als Funktion von (i) bis (iv) (RESTER-UniKA-2),
- g) Erarbeitung von Methoden zur Verbesserung der Sturmstabilität von Waldbeständen auf der Grundlage der Ergebnisse aus f) (RESTER-UniKA-2)
- h) Erarbeitung von Karten mit potenziell sturmgefährdeten Waldstandorten in Baden-Württemberg unter derzeitigen und zukünftigen Klimabedingungen (Referenzzeiträume: 1971 bis 2000 und 2021 bis 2050) unter Berücksichtigung von Ergebnissen aus den Unterprojekten RESTER-UniKA-1 und RESTER-UniKA-2 sowie von Bestandes- und Bodendaten (RESTER-UniFR und FVA Baden-Württemberg),

- i) Validierung der Karte mit potenziell sturmgefährdeten Waldstandorten in Baden-Württemberg unter derzeitigen Klimabedingungen über die in der Naturalbuchführung der Forstbetriebe als „Zufällige Nutzung Sturm“ (ZN_{Sturm}) erfassten Sturmholzmengen (RESTER-UniFR und FVA Baden-Württemberg),
- j) Prüfung bestehender mechanistischer Sturmschadensmodelle auf ihre Anwendbarkeit auf Wälder in Baden-Württemberg (RESTER-UniFR, RESTER-UniKA-2 und FVA Baden-Württemberg),
- k) Entwicklung eines statistischen Sturmschadensmodells für Wälder in Baden-Württemberg auf der Basis von forstlichen Daten und Ergebnissen aus den Unterprojekten RESTER-UniKA-1 und RESTER-UniKA-2 (RESTER-UniFR und FVA Baden-Württemberg),
- l) Aktualisierung bzw. Erweiterung von Strategien zur Reduzierung des derzeitigen und zukünftigen Sturmschadensrisikos für Wälder in Baden-Württemberg auf der Grundlage der Ergebnisse aus a) bis k) (RESTER-UniFR, RESTER-UniKA-1, RESTER-UniKA-2 und FVA Baden-Württemberg),
- m) Überprüfung der Strategien aus l) auf ihre Praxistauglichkeit (RESTER-UniFR, RESTER-UniKA-1, RESTER-UniKA-2 und FVA Baden-Württemberg),
- n) Synthese aller Ergebnisse in einem praxistauglichen Leitfaden über Strategien zur Reduzierung des derzeitigen und zukünftigen Sturmschadensrisikos für Wälder in Baden-Württemberg (RESTER-UniFR, RESTER-UniKA-1, RESTER-UniKA-2 und FVA Baden-Württemberg).

RESTER

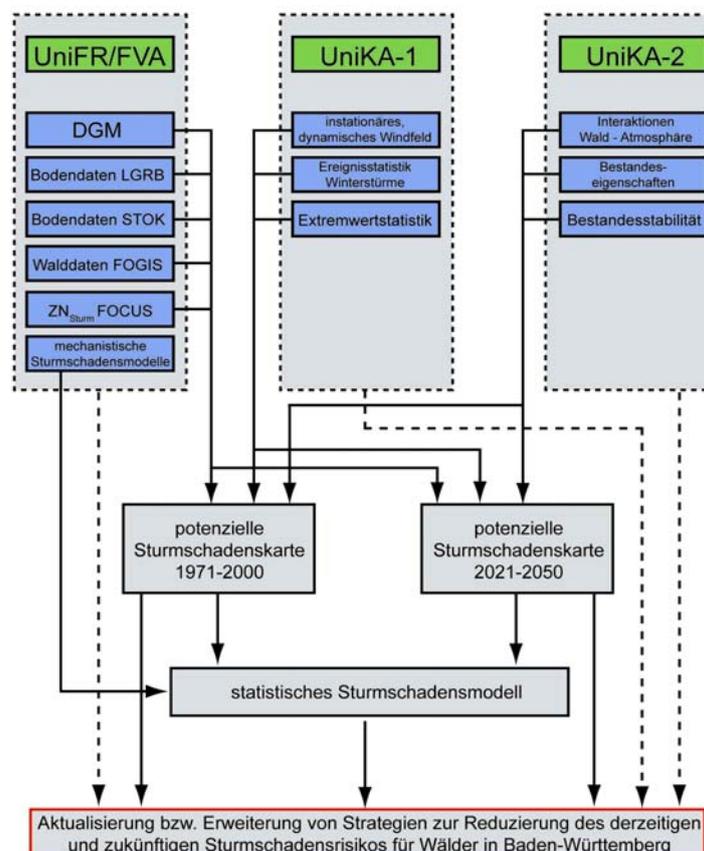


Abb. 2: Schema der Arbeitsabläufe im Verbundprojekt RESTER

Fig. 2: Scheme of the work flows within the cooperative project RESTER

6. Arbeitsprogramm

Die aus den Zielsetzungen resultierenden Arbeitsprogramme der Partner im Verbundprojekt RESTER sind logisch aufeinander abgestimmt und dadurch eng vernetzt (Abb. 2). Arbeitsabläufe und Ergebnisse werden in regelmäßigen RESTER Arbeitsbesprechungen präsentiert und diskutiert. Dabei bildet der permanente Dialog mit der forstlichen Praxis eine bedeutende Rahmenbedingung, da die Gesamtzielsetzung von RESTER - ein Leitfaden oder Handbuch mit praxistauglichen Konzepten zur Reduzierung des derzeitigen und zukünftigen Sturmschadensrisikos für Wälder in Baden-Württemberg - anwendungsbezogen ist.

Literaturverzeichnis

- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, WMO Publication.
- LECKEBUSCH, G.C., B. KOFFI, U. ULBRICH, J.G. PINTO, T. SPANGHEHL, S. ZACHARIAS, 2006: Analysis of frequency and intensity of European winter storm events from multi-model perspective, at synoptic and regional scales. - *Clim Res* **31**, 59-74.
- MAYER, H., D. SCHINDLER, 2002: Forstmeteorologische Grundlagen zur Auslösung von Sturmschäden im Wald in Zusammenhang mit dem Orkan „Lothar“. - *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* **173**, 200-208.
- PINTO J.G., E.L. FRÖHLICH, G.C. LECKEBUSCH, U. ULBRICH, 2007: Changing European storm loss potentials under modified climate conditions according to ensemble simulations of the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. – *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **7**, 165-175.
- RUCK, B., CH. KOTTMEIER, C. MATTHECK, C. QUINE, G. WILHELM (eds.), 2003: Wind effect on trees. - *Lab. Building- and Environmental Aerodynamics, Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe.*
- SCHINDLER, D., H. MAYER, 2003: Storm-related characteristics of the turbulent airflow above a Scots pine forest. - In: *Wind effects on trees* (ed. by B. Ruck, Ch. Kottmeier, C. Mattheck, C. Quine, and G. Wilhelm), *Lab. Building- and Environmental Aerodynamics, Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe*, 9-13.
- SCHMÖCKEL, J., 2006: Orographischer Einfluss auf die Strömung abgeleitet aus Sturmschäden im Schwarzwald während des Orkans Lothar. *Wiss. Ber. Inst. Meteorol. und Klimaforsch. Univ. Karlsruhe* Nr. 37.

Anschrift der Autoren

Prof. Dr. Helmut Mayer und Dr. Dirk Schindler, Meteorologisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Werderring 10, D-79085 Freiburg

PD Dr. Ulrich Kohnle und Dr. Sebastian Hein, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abt. Waldwachstum, Wonnhaldestr. 4, D-79100 Freiburg

Prof. Dr. Christoph Kottmeier und Dr. Michael Kunz, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Universität Karlsruhe (TH), Wolfgang-Gaede-Str. 1, D-76131 Karlsruhe; Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Forschungszentrum Karlsruhe, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, D-36344 Eggenstein-Leopoldshafen

Prof. Dr.-Ing. Bodo Ruck, Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe (TH), Kaiserstr. 12, D-76131 Karlsruhe

Baumreaktionen von Waldkiefern auf Windlasten

Dirk Schindler

Meteorologisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Zusammenfassung

Über einen Zeitraum von sechs Monaten wurden windinduzierte Baumauslenkungen einer Gruppe von zehn benachbarten Waldkiefern sowie Eigenschaften der bodennahen Strömung in und über einem Waldkiefernbestand nahe der Forstmeteorologischen Messstelle Hartheim (südliche Oberrheinebene) gemessen. Basierend auf den Ergebnissen der Messungen der windinduzierten Baumauslenkungen wurde die Kronenkollisionsdynamik des Waldkiefernkollektivs analysiert. Ergebnisse der Spektralmethode zeigen, dass der Energietransfer von Energie der bodennahen Strömung in Baumbewegungen im Bereich der Grundschwingungen (0.18 bis 0.46 Hz) der untersuchten Waldkiefern am effizientesten war. Die Häufigkeit und Intensität von Kronenkollisionen benachbarter Waldkiefern nahm mit zunehmender Windgeschwindigkeit zu. In Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit reduzierten Kronenkollisionen die Kronenkollisionsgeschwindigkeit um 40% bis 70%.

Responses of Scots pine trees on wind loads

Abstract

Wind-induced tree displacements of a group of Scots pine trees as well as characteristics of the near-surface airflow within and above a Scots pine forest near the forest-meteorological experimental site Hartheim (southern Upper Rhine Valley) were measured over a period of six months. Based on the tree displacement measurements, crown collision dynamics were analysed. Results of the spectral method show that the transfer of energy of the near-surface airflow into tree movement was most efficient in the range of the natural frequencies (0.18 to 0.46 Hz) of the selected Scots pine trees. The frequency and intensity of crown collisions of Scots pine increased with increasing wind speed. As a function of wind speed, crown collisions reduced the crown collision speed by 40% to 70%.

1. Einleitung

Wind ist einer der bedeutendsten abiotischen Faktoren, der zu Störungen der Baumartenzusammensetzung, des Gesundheitszustandes und des Wachstums von Wäldern in Europa führt (SCHELHAAS et al., 2003). Neben Stürmen, die zu einmaligen katastrophalen Schäden (Sturmwurf, Sturmbruch) in Wäldern führen können, beeinflusst das Windklima andauernd Baumeigenschaften und Bestandesstrukturen (ERIKSSON et al., 2005; MENG et al., 2006).

Das Sturmschadensrisiko in Wäldern kann in einen permanenten Risikoanteil, unter dem die Bodeneigenschaften, die Topographie und das Klima an einem Waldstandort subsummiert werden, und in einen temporären Risikoanteil, den Bestandeseigenschaften, unterteilt werden (LEKES und DANDUL, 2000). Der permanente Sturmschadensrisikoanteil lässt sich in der waldbaulichen Praxis nur sehr eingeschränkt beeinflussen, wohingegen der temporäre Sturmschadensrisikoanteil durch geeignete waldbauliche Maßnahmen modifiziert werden kann (GARDINER et al., 2005; SCHÜTZ et al., 2006). Aufgrund der mannigfaltigen negativen Auswirkungen von Sturmschäden in Wäldern wird nach Methoden zu ihrer Minimierung gesucht. Eine Möglichkeit zur Minimierung von Sturmschäden in Wäldern besteht im Bereich endemischer Windgeschwindigkeiten darin, die Vulnerabilität von Baumkollektiven zu reduzieren, da Reibung und Kroneninteraktionen zwischen Bäumen zur Energiedissipation, und damit zur

Dämpfung von Baumreaktionen auf Windlasten, beitragen (MILNE, 1991; GARDINER et al., 1997; CUCCHI und BERT, 2003).

Die Bedeutung von Konzepten zur Verbesserung der Sturmstabilität von Wäldern nimmt zu, da Modellrechnungen für weite Teile Europas eine Zunahme der Sturmhäufigkeit und -intensität vorhersagen (LECKEBUSCH et al., 2006; PINTO et al., 2007).

Ziele dieser Untersuchung sind (1) die Messung der simultanen windinduzierten Baumreaktionen einer Gruppe von Waldkiefern, (2) die Analyse der Kronenkollisionsdynamik und deren Auswirkung auf die Baumreaktionen sowie (3) die modellmässige Beschreibung von Kronenkollisionen durch ein Feder-Dämpfer-System.

2. Material und Methoden

Von Oktober 2005 bis April 2006 wurden in einem gepflanzten Waldkiefernreinbestand (*Pinus sylvestris* L.; mittlere Bestandeshöhe 14.5 m) in der südlichen Oberrheinebene die windinduzierten Baumauslenkungen einer Gruppe von zehn benachbarten Waldkiefern gemessen. Der Untersuchungsstandort befand sich neben der Forstmeteorologischen Messstelle Hartheim (47°56' N, 7°37' E; 201 m ü. NN) des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (MAYER et al., 2000). Die hochfrequente (10 Hz) Messung der Baumreaktionen auf Windlasten erfolgte durch 30 biaxiale Inklinometer (902-45, Applied Geomechanics, USA), von denen jeweils drei Inklinometer pro Probebaum in verschiedenen Höhen angebracht wurden. Die bodennahen Strömungsverhältnisse wurden durch ein Vertikalprofil von acht Ultraschallanemometern (USA-1, Metek, Deutschland) ebenfalls hochfrequent (20 Hz) erfasst. Die Ultraschallanemometer waren an einen 27 m hohen Messturm montiert, der wenige Meter östlich der untersuchten Waldkieferngruppe errichtet wurde.

Windinduzierte Baumreaktionen und Kroneninteraktionen wurden für acht Tage aus dem gesamten Untersuchungszeitraum analysiert (16.12.2005; 19.12.2005; 31.12.2005; 06.02.2006; 08.02.2006; 18.02.2006; 03.03.2006; 09.03.2006). Sie wurden ausgewählt, um die gesamte Bandbreite der aufgetretenen Windgeschwindigkeit in der Untersuchungsperiode abzudecken. Der höchste 10 min Mittelwert der Windgeschwindigkeit U_h an der Bestandesoberhöhe betrug 5.4 m s^{-1} . Maximale Momentanwerte von U_h betragen bis zu 14.9 m s^{-1} . Die Analyse der Baumreaktionen auf Windlasten erfolgte über

- die Spektralmethode (MAYER, 1987). Dafür wurden die windinduzierten Baumreaktionen verschiedenen Klassen der Schubspannung τ zugeordnet ($\tau_1: 0.0 \leq \tau < 1.0 \text{ N m}^{-2}$; $\tau_2: 1.0 \leq \tau < 2.0 \text{ N m}^{-2}$; $\tau_3: 2.0 \leq \tau < 3.0 \text{ N m}^{-2}$; $\tau_4: 3.0 \leq \tau < 4.0 \text{ N m}^{-2}$), um klassenweise mechanische Transferfunktionen H_m^2 berechnen zu können,
- verschiedene U_h -Klassen ($U_{h1}: 0.0 \leq U_h < 1.0 \text{ m s}^{-1}$; $U_{h2}: 1.0 \leq U_h < 2.0 \text{ m s}^{-1}$; $U_{h3}: 2.0 \leq U_h < 3.0 \text{ m s}^{-1}$; $U_{h4}: 3.0 \leq U_h < 4.0 \text{ m s}^{-1}$; $U_{h5}: 4.0 \leq U_h < 5.0 \text{ m s}^{-1}$), für die klassenweise statistische Kenngrößen der windinduzierten Baumreaktionen berechnet wurden.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Spektralmethode

Die Schubspannungsspektren (30 Frequenzbänder) wiesen in den Schubspannungsklassen τ_1 - τ_4 im Vergleich zu den Baumauslenkungsspektren (30 Frequenzbänder) weniger deutlich ausgeprägte Maximalwerte der spektralen Energie auf. Die Frequenzen $f_{\max, \tau}$, die die höchsten spektralen Energien von τ kennzeichnen, betragen in der Klasse τ_1 0.04 Hz und 0.08 Hz in den Klassen τ_2 - τ_4 . Die Frequenzen $f_{\max, G}$ der Grundsicherungen der zehn Waldkiefern wur-

den aus den Maximalwerten der spektralen Energie der Baumauslenkungsspektren abgeleitet. $f_{\max,G}$ betrug für alle Waldkiefern in den Schubspannungsklassen τ_1 - τ_4 zwischen 0.18 Hz und 0.46 Hz und änderte sich bei den einzelnen Waldkiefern mit ansteigender Schubspannung nicht.

In Übereinstimmung mit Ergebnissen anderer Untersuchungen (MAYER, 1987; GARDINER, 1994) zeigen die Ergebnisse der Spektralmethode, dass der Energietransfer von Energie der bodennahen Strömung in Baumbewegungen im Bereich der Grundswingungen der Waldkiefern am effizientesten war. Der Energietransfer sowohl bei höheren als auch bei niedrigeren Frequenzen war von untergeordneter Bedeutung.

3.2 Baumauslenkung

Windinduzierte Baumauslenkungen und dadurch auftretende Kroneninteraktionen wurden für die Höhe 11.2 m, welche der Nullpunktverschiebung d des Hartheimer Kiefernwaldes entspricht, analysiert. In den beiden Windgeschwindigkeitsklassen U_{h1} und U_{h2} waren die windinduzierten Baumauslenkungen sehr klein und wiesen keine ausgeprägte Richtungsabhängigkeit auf. Ab U_{h3} stiegen die Baumauslenkungen in Hauptwindrichtung deutlich an und erreichten in U_{h5} baumabhängige Maximalwerte von 1.8 m bis 2.0 m.

3.3 Kroneninteraktionen

Zur Analyse der Kroneninteraktionen innerhalb des ausgewählten Baumkollektivs wurden windinduzierte Baumauslenkungen von 39 Baumkombinationen untersucht. Davon wiesen nur 15 Baumpaare eine ausreichende Anzahl von Kronenkollisionen zur weiteren Analyse der Kronenkollisionsdynamik auf. Es trat nur eine geringe Anzahl von Kronenkollisionen von drei oder mehr Bäumen auf. In U_{h1} und U_{h2} ergaben sich keine Kronenkollisionen. Die größte Anzahl von Kronenkollisionen pro 10 min Intervall wurde in U_{h5} festgestellt. In U_{h5} traten zweimal mehr Kronenkollisionen pro 10 min Intervall auf als in U_{h4} . Wie bei RUDNICKI et al. (2003) stieg die Kronenkollisionsgeschwindigkeit mit ansteigender Windgeschwindigkeit und erreichte Maximalwerte von bis zu 12.8 m s^{-1} . Durch den Einfluss von Kronenkollisionen wurde die Kollisionsgeschwindigkeit in U_{h4} um 40% bis 70% und in U_{h5} um 50% bis 70% reduziert.

4. Schlussfolgerungen

Die bisher im Rahmen dieser Untersuchung erzielten Ergebnisse zu windinduzierten Baumreaktionen und zur Kronenkollisionsdynamik zeigen, dass Kronenkollisionen für die Dämpfung windinduzierter Baumauslenkungen bedeutend sind. Kronenkollisionen führen u.a. zu einer deutlichen Reduktion der Schwingungsgeschwindigkeit der untersuchten Waldkiefern. Die durchgeführten Messungen und die bisher erzielten Ergebnisse sind Ausgangspunkt für weitere Analysen, die das Verständnis der Wirkungen der Kronenkollisionsdynamik auf die kollektive Dämpfung windinduzierter Baumauslenkungen verbessern sollen. Die bisherigen Ergebnisse dienen als Grundlage für die modellmässige Beschreibung des Waldkiefernkollektivs als Feder-Dämpfer-System.

Literaturverzeichnis

CUCCHI, V., D. BERT, 2003: Wind-firmness in *Pinus pinaster* Ait. stands in Southwest France: influence of stand density, fertilisation and breeding in two experimental stands damaged during the 1999 storm. – *Ann. For. Sci.* **60**, 206-226.

- ERIKSSON, M., A. POUTTU, H. ROININEN, 2005: The influence of windthrow area and timber characteristics on colonization of wind-felled spruces by *Ips typographus* (L.). – For. Ecol. Manag. **216**, 105-116.
- GARDINER, B.A., 1994: Wind and wind forces in a plantation spruce forest. – Boundary-Layer Meteorol. **67**, 161-184.
- GARDINER, B.A., G.R. STACEY, R.E. BELCHER, C.J. WOOD, 1997: Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability. – Forestry **70**, 233-252.
- GARDINER, B., B. MARSHALL, A. ACHIM, R. BELCHER, C., WOOD, 2005: The stability of different silvicultural systems: a wind-tunnel investigation. – Forestry **78**, 471-484.
- LEKES, V., I. DANDUL, 2000: Using airflow modelling and spatial analysis for defining wind damage risk classification (WINDARC). – For. Ecol. Manag. **135**, 331-344.
- LECKEBUSCH, G.C., B. KOFFI, U. ULBRICH, J.G. PINTO, T. SPANGHEHL, S. ZACHARIAS, 2006: Analysis of frequency and intensity of European storm events from a multi-model perspective at synoptic and regional scales. – Clim. Res. **31**, 59-74.
- MAYER, H., 1987: Wind-induced tree sways. – Trees **1**, 195-206.
- MAYER, H., L. JAEGER, A. MATZARAKIS, G. FERNBACH, D. REDEPENNING, 2000: Die Forstmeteorologische Messstelle Hartheim des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg. Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg Nr. 5, 55-83.
- MENG, S.X., M. RUDNICKI, V.J. LIEFFERS, D.E.B. REID, U. SILINS, 2006: Preventing crown collisions increases the crown cover and leaf area of maturing lodgepole pine. – J. Ecol. **94**, 681-686.
- MILNE, R., 1991: Dynamics of swaying of *Picea sitchensis*. Tree Physiol. **9**, 383-399.
- PINTO J.G., E.L. FRÖHLICH, G.C. LECKEBUSCH, U. ULBRICH, 2007: Changing European storm loss potentials under modified climate conditions according to ensemble simulations of the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. – Nat. Hazards Earth Sys. Sci. **7**, 165-175.
- RUDNICKI, M., V.J. LIEFFERS, U. SILINS, 2003: Stand structure governs the crown collisions of lodgepole pine. – Can. J. For. Res. **33**, 1238-1244.
- SCHELHAAS, M.-J., G.-J. NABUURS, A. SCHUCK, 2003: Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. – Global Change Biol. **9**, 1620-1633.
- SCHÜTZ, J.-P., M. GÖTZ, W. SCHMID, D. MANDALLAZ, 2006: Vulnerability of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) forest stands to storms and consequences for silviculture. – Eur. J. Forest Res. **125**, 291-302.

Anschrift des Autors

Dr. Dirk Schindler, Meteorologisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Werdering 10, D-79085 Freiburg

Einfluss der Größe und Ausrichtung eines Kahlschlags auf räumliche und spektrale Verteilung der solaren Strahlung

Oleg Panferov¹, Alexander Olchev², Karl Radler¹, Dietmar Fellert¹ und Gode Gravenhorst¹

¹Institute of Bioclimatology, University of Goettingen

²Institute of Problems of Ecology and Evolution, Moscow, Russia

Zusammenfassung

Um die Strahlungsverteilung und ihre spektrale Variation auf einer Freifläche und im angrenzenden Bestand hinreichend genau zu quantifizieren sowie um Modellrechnungen zu stützen und zu validieren, verglichen wir ein hochauflösendes 3D-Strahlungsmodell mit kontinuierlichen Messungen der solaren Strahlung auf einer Kahlschlagfläche. Im Solling (Mittelgebirge Deutschland) wurde ein neuer Kahlschlag von ca. 22500m² Größe für diese Untersuchung ausgewählt. Die Fläche liegt an einem leicht (3.12°) nach Norden geneigten Hang. Sie ist an drei Seiten von einem 85 Jahre alten Fichtenbestand und an der vierten Seite von einem Laubwald aus Eiche, Esche und Buche umgeben. Die Modellierung wurde horizontal und vertikal mit einer Auflösung von 1m durchgeführt, und zwar auf einem Ausschnitt von 300m × 300m × 70m, der die 150m × 150m Freifläche und an jeder Seite einen 77m breiten Streifen des angrenzenden Waldes enthielt. Modelliert wurden die direkten und diffusen Komponenten der kurzwelligigen Strahlung (350-2500nm) in spektralen Schritten von 20nm. Gemessen wurde die Strahlung kontinuierlich an 7 mikro-meteorologischen Stationen auf der Kahlschlagfläche und im angrenzenden Forst. Die Ergebnisse zeigen für ausgewählte meteorologische Verhältnisse eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der modellierten und der gemessenen Strahlung. Mit einer Modellanalyse war es möglich, die Effekte der Form und der Neigung einer Freifläche zu quantifizieren.

Influence of clear-cut's size and orientation on distribution and spectral composition of solar radiation

Abstract

To quantify the radiation distribution and its spectral variation within the gap and the adjacent forest with sufficient accuracy we combined the high resolution 3-D model of radiative transfer and continuous measurements of solar radiation at clear-cut area to support and to validate model calculations. A recent clear-cut of about 22500 m² in Solling, Central Germany was chosen for a study. The site is located on a gentle slope (3.12°) with northern exposition. The gap is surrounded from three sides by mature 85 y.o. spruce stand and bordered by mature oak-ash-beech stand from the fourth. The modelling was performed with a spatial resolution of 1 m for both vertical and horizontal axes on a domain of 300 m × 300 m × 70 m which included 150m × 150m gap and 75 m-wide bands of forest at each gap side. Direct and diffuse components of short-wave radiation (350-2500 nm) with a spectral interval of 20 nm were modelled. The radiation was continuously measured at 7 micro-meteorological stations located within the clear-cut and in the adjacent forest. The results show a very good agreement between modelled and measured radiation for typical meteorological situations. The analysis of modelling allowed to quantify the effects of gap forms and slope inclinations.

1. Introduction

The development of soil properties and ground vegetation suddenly exposed to the direct atmospheric influence after a clear cut is controlled mainly by the radiative regime and especially by direct solar radiation (GRAY et al., 2002). The same is true for the remaining trees surrounding the clear-cut (e.g. CHEN et al., 1995). The degree of the influence is affected by the gap size, inclination and exposition of a slope (if any) and by the structure of surrounding forest. The influence of slope inclination only on the surface's insolation is well known and sufficiently described in scientific literature (e.g. KONDRATYEV, 1969) However, to quantify the radiation distribution at the gap and the adjacent forest with sufficient accuracy either continuous long-term measurements under various meteorological conditions or high resolution modelling should be implemented. In this study both methods have been combined: 1) the high resolution 3-D model of radiative transfer SPM-3D (KNYAZIKHIN et al., 1997; PANFEROV, 2005) and continuous measurements of short-wave radiation. To investigate the effect of slope on amount and spectral composition of solar radiation comparatively to flat terrain, the radiation distribution in real forest and clear-cut in Solling situated on northern slope was measured and modelled.

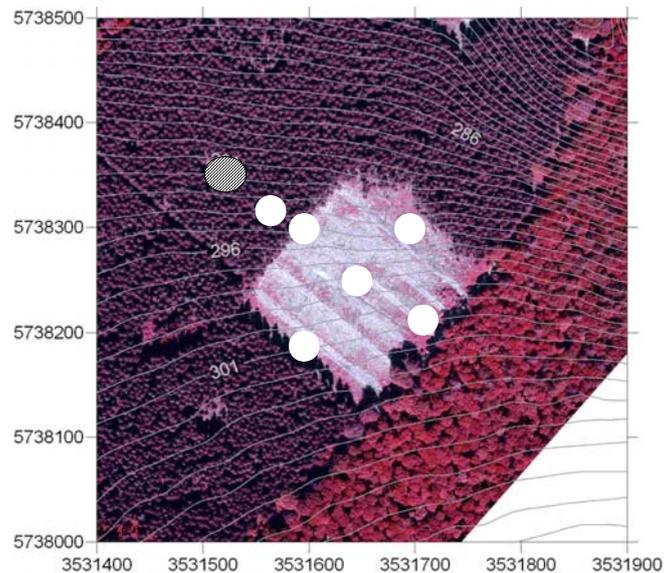


Abb. 1: Luftbild der Untersuchungsfläche Otterbach mit Höhenlinien. Die hellere Vegetation im Südosten der Freifläche ist ein Mischbestand aus Eiche, Esche, Buche, und die dunklen Bereiche sind Fichten. Die Kreise geben die Position der sieben meteorologischen Messstationen an, wobei die Kontrollfläche schraffiert ist

Fig. 1: The aerial photo of the study site Otterbach with a topography overlay. The brighter vegetation at the south-east side is the mixed oak-ash-beech stand and the dark vegetation is the spruce forest. Circles denote the positions of 7 meteorological stations (striped is the control one)

2. Methods

A recent clear-cut of about 22500 m² (150m×150m) in Solling mountains, Germany (51°46'N, 9°27'E) was chosen as an experimental forest site. The site is located on a gentle slope of about 3.5° inclination and with northern exposition (Fig.1). The cutting in Otterbach

have been carried out in autumn of 2003, and the clear-cut area has been reforested with the seedlings of beech and Douglas fir. The gap is surrounded from 3 sides by mature 120 y. o. spruce stand and bordered by mature oak-ash-beech stand from the fourth.

2.1 Measurements: The radiation was measured at 5 meteorological stations within the gap, at the station in the transition zone (NW-side) and at control station in the adjacent forest (Fig.1 striped circle). The pyranometers CMP3 (KIPP & ZONEN B.V.) were used as global radiation sensors. The instruments are intended for shortwave radiation measurements in the spectral range from 310nm to 2800 nm. The measurements were carried out during the period of August 2004 till October 2005 with a winter break from November 2004 to April 1, 2005. The data were sampled every 10 sec and averaged over 5 min interval.

2.2. Modelling: To investigate the effects of slope on radiation distribution the following was modelled: 1) for the forest stand as described above and placed on “real topography” according to the DGM; and 2) for the identical forest stand placed on a horizontal surface. The high resolution 3-D model of radiative transfer (SPM-3D, PANFEROV, 2005) – based on approach of MicroEnv (KNYAZIKHIN et al., 1997) was used to describe the distribution of radiation within the clear-cut. The modelling was performed with a spatial resolution of 1 m for both vertical and horizontal axes on a domain of 300 m×300 m×70 m which included gap and 75 m-wide bands of forest at gap sides. Both direct and diffuse components of short-wave radiation were considered in modelling experiments. The angular distribution of diffuse radiation were described both for overcast (standard overcast sky of MONTEITH AND UNSWORTH, 1990) and for clear-sky conditions (ideal clear sky of POKROWSKI, 1929). The diffuse and scattered radiation fluxes were calculated for 144 directions. The spectral composition of direct and diffuse components of incoming radiation was approximated as in KONDRATYEV (1969). Its dependence on solar height (red shift) was neglected in this experiment.

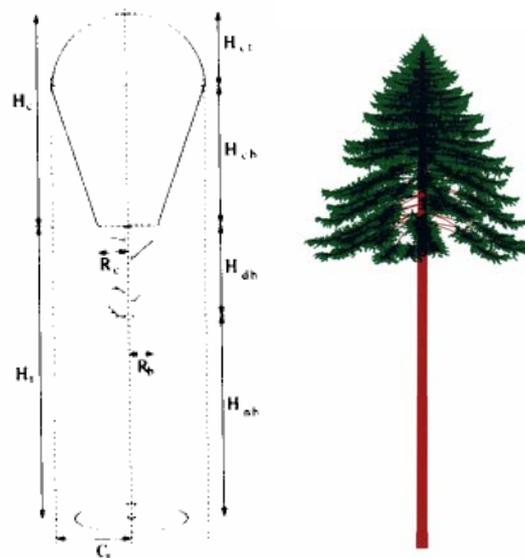


Abb. 2: Modelle der individuellen Kronenform, die für die numerischen Experimente verwendet wurden: links für Laubbäume und rechts für Fichte

Fig. 2: The models of individual tree crowns implemented in numerical experiments: the model of a deciduous tree (left panel) and of a spruce tree (right panel)

All spruce trees were assumed to have an equal height of 31 m with 3 m average crown radius. To all deciduous trees the height of 33 m and crown radius of 5 m were assigned (PANFEROV, 2005). The individual tree crown model for all deciduous trees was used as in

WIDLÓWSKY et al., 2003, and for spruce trees as in KURTH AND SLOBODA (1999, Fig. 2). The spectral properties of phytoelements at this stage were used: a) for spruce trees - as mean sun twig for upper crown part and as a mean shade twig for lower crown part, the age differences were not considered; b) for all deciduous species the spectral properties of average sun and average shade leaf of beech as measured in Solling, B1 were used.

3. Results

3.1 Model validation

The model was validated for different forest stands (KNYAZIKHIN et al., 1997, PANFEROV, 2005) and showed a very good agreement with observations. In present study only the additional validation for a gap and forest edge was carried out. The results have shown a very good agreement between modelled and measured radiation for typical meteorological situations. In Fig. 3 the comparison between measured and modelled fluxes of short-wave radiation is presented for central (“gap”) and western (“edge”) meteorostations.

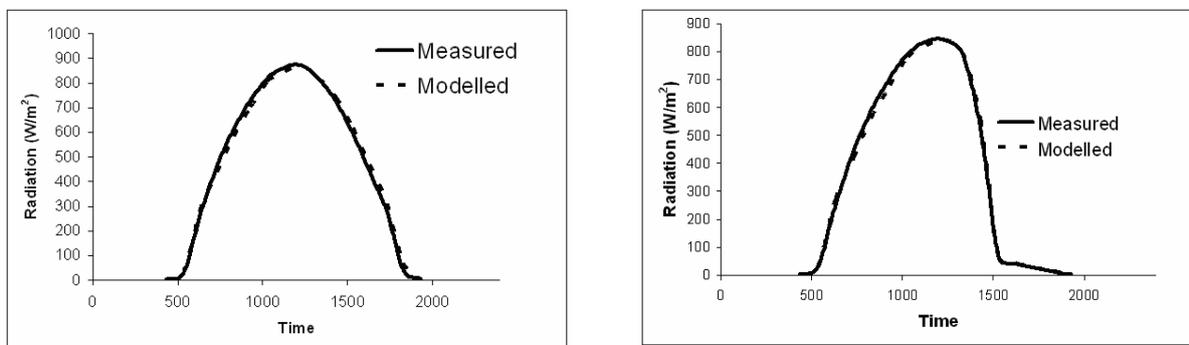


Abb. 3: Vergleich eines gemessenen und modellierten Tagesgangs der kurzwelligen Strahlung an der zentralen Messstation (links) und am Westrand der Freifläche (rechts)

Fig. 3: Comparison of measured and modeled daily course of global short-wave radiation at central meteorostation (left panel) and at western border of the clear cut (right panel)

3.2 Effect of inclination

Preliminary results – the radiation distribution within the studied area of Otterbach clear-cut - were already presented in (PANFEROV et al., 2006). Therefore, we would like to focus here on the effects of northern slope especially within the forest – clear-cut transition zones as compared to the horizontal stand.

As expected even the very gentle inclination with northern exposition decreases considerably in general the intensity of radiation at soil surface. To characterize the changes we used the normalized difference $\delta(r) = (I_h(r) - I_s(r_s)) / I_h(r)$. $I_h(r)$ is the intensity of radiation at horizontal surface in the point $r(x, y, z)$ of model domain and $I_s(r_s)$ is the intensity of radiation at the sloping surface at the point $r_s(x, y, z + \Delta z)$ with the same horizontal coordinates (x, y) as the point r , at same moment of time (time period) and under the same illumination conditions. Considering the “time period” as an entire vegetation period the estimated δ was on average about 0.1 (Fig. 4), i. e. the northern slope was “underilluminated” by about 10% comparing to horizontal surface. The result is completely in accordance with a theory predicting the alteration of radiation incoming to the bare slopes (e.g. KONDRATYEV, 1969). However, the presence of rather complicated vegetation – forest stands with a clear-cut - changes that simple theoretical distribution pattern considerably. Fig. 4 illustrates the frequency distribution of δ for different

time periods. It can be observed that even the averaged over the entire vegetation period short-wave radiation coming to the soil surface of forested northern slopes could be at some places even higher than that of horizontal surface (negative δ). That “underestimation” could reach 39% ($\delta=-0.39$) for the vegetation period (Fig. 4a), 42% in summer (Fig. 4b) and even 166% in spring and autumn (Fig. 4c). It can be also observed that while the average “overestimation” of horizontal surface is about 10% for the entire vegetation period and during summer, it rises as high as 28% for spring and autumn (Fig. 4c).

A spatial distribution of these differences is shown in Fig. 5. One can observe that the highest “overestimations” of horizontal surface are just *before* the forest edge within the transition zone between clear-cut and SE-SW forest edges, and the highest “underestimations” are just *behind* the forest edge within the transition zone between clear-cut and NE-NW forest edges. The right panel illustrates the distribution of normalized difference related to the distribution of trees. The picture shows that in the case of horizontal approximation the “overestimation” comparatively to northern slope is over 5% for almost entire forested area and transition zones. The central part of clear-cut shows weak “overestimation” (<5%) with accordance to theory. The spots of “underestimation”, i. e. where the northern slope receives more radiation over the vegetation period than horizontal surface are quite small and distributed mostly around northern forested corner of studied region.

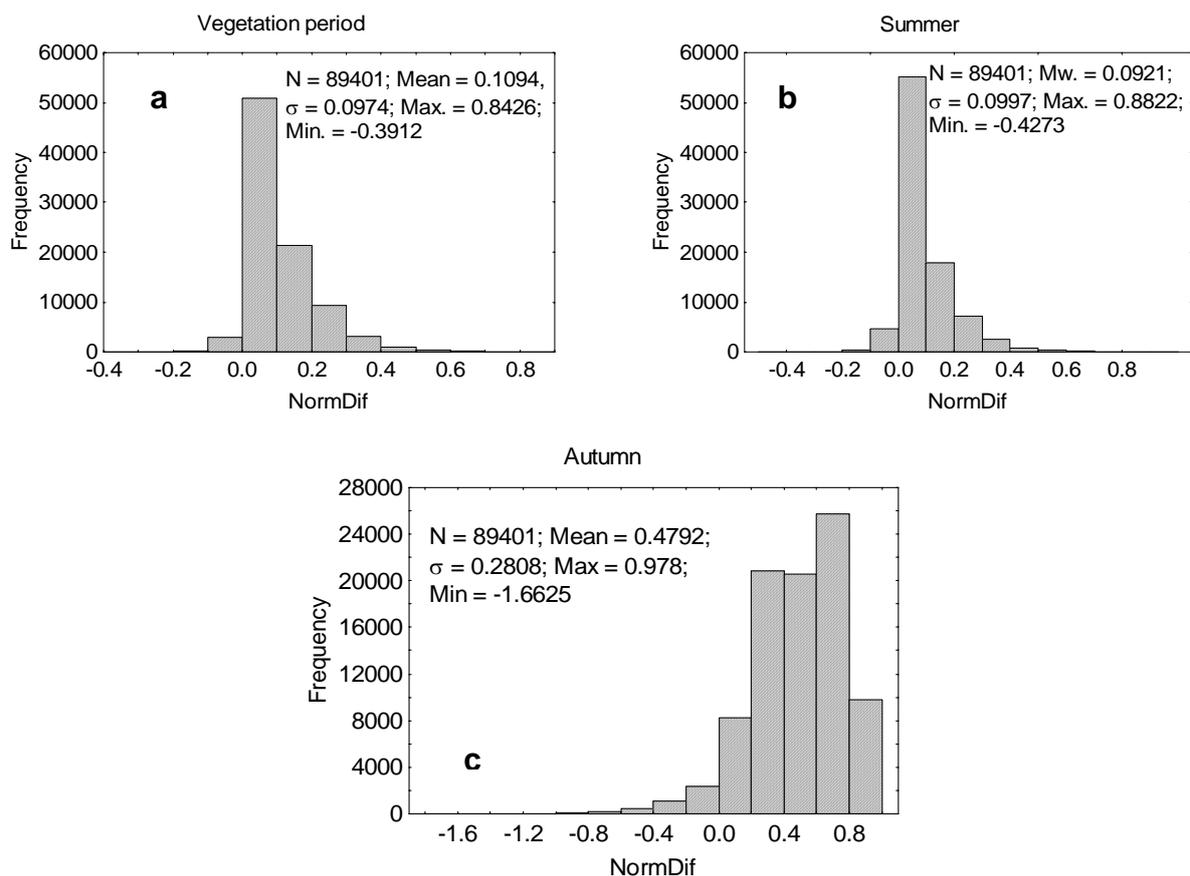


Abb. 4: Häufigkeitsverteilung der normalisierten Differenz d für verschiedene Mittelungsintervalle: a) gesamte Vegetationszeit (März-November), b) Sommer (Juni-August), c) Herbst (September-November)

Fig. 4: Frequency distribution of normalized difference d for different averaging periods: a) entire vegetation period (March-November), b) summer (June-August), c) autumn (September-November)

Besides the quantitative changes, i.e. changes in the magnitude of radiation fluxes, the N-slope induce also the qualitative changes - the changes in the spectral composition radiation. Within the central zone of clear-cut and small gaps in a canopy app. 6% increase of the blue part of spectrum (400-450 nm) is observed for the northern slope comparatively to horizontal surface. The N-corner clear shows in contrast a strong decrease of blue part (up to 20%). The N-borders generally show the increment of green (525-575 nm) part of solar spectrum.

4. Conclusion

The clear-cut of a medium size (150m×150m) within a mixed forest stand produced a complex effect on the radiation distribution at soil surface and was additionally complicated by its location on a northern slope. The slope effect was a simultaneous decrease (10% in average) of radiation input on the most (especially southern) part of studied site and a strong increase (up to 166%) within the northern parts. The decrease of radiation on northern slope is more pronounced in spring and autumn. The magnitude of the effect indicates strongly that even the effects a very gentle slope could not be neglected in ecological studies. Besides that the slope-induced “blue shift” of the radiation spectrum at the clear-cut, as well as the green one at the northern edges should be taken into account.

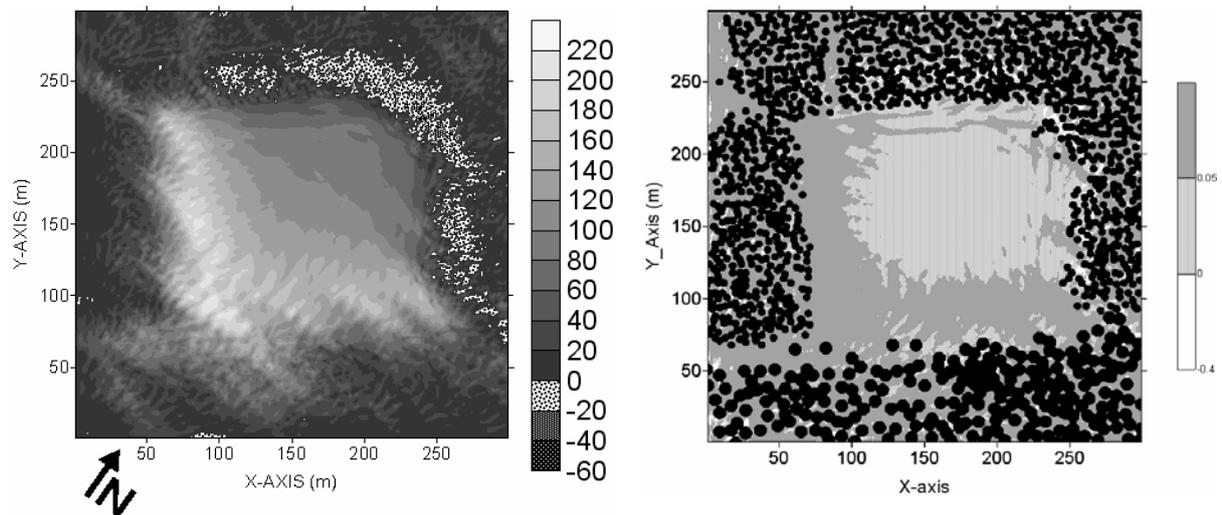


Abb. 5: Räumliche Verteilung der Unterschiede zwischen horizontaler Approximation und der tatsächlichen Geländeneigung: 1) absolute Werte (links) und 2) normalisierte Differenzen (rechts). Schwarze Kreise im rechten Bild markieren die Projektion der Baumkronen auf der Bodenoberfläche

Fig. 5: Spatial distribution of differences between horizontal approximation and real slope: 1) absolute values (left panel) and 2) normalized difference (right panel). Black circles at right panel represent projections of tree crowns on soil surface

References

- KNYAZIKHIN YU., G. MIESSEN, O. PANFEROV, G. GRAVENHORST, 1998a: Small-scale study of three-dimensional distribution of photosynthetically active radiation in a forest. - Agr. For. Meteor. **88**, 215--239.
- KONDRATYEV K.YA., 1969: Radiation in the atmosphere. – Acad. Press, New York, 912 pp.
- KURTH, W., B. SLOBODA, 1999: Tree and stand architecture and growth described by formal grammars – I. Non-sensitive trees. - J. For. Sci. **45**, 16--30.

- MONTEITH, J.L., M.H. UNSWORTH, 1990: Principles of environmental physics. - E.Arnold, London, 291 pp.
- PANFEROV, O., 2005: Modelling of Transport and Allocation of stable Isotopes in Spruce and oak stands. - Final Report to TRICE-II, DEKLIM.
- PANFEROV, O., A. OLTCEV, K. RADLER, D. FELLERT, G. GRAVENHORST, 2006: Radiation distribution on a clear-cut within a mature forest stand on a gentle slope. EGU General Assembly, Vienna, April 2006, Geophys. Res. Abstr. **8**.
- POKROWSKI, G.I., 1929: Über die Helligkeitsverteilung am Himmel. -Physikal. Zeitschr. **30**. 697-700.
- WIDLONSKY J.L., M. VESTRAETE, B. PINTY, N. GOBRON., 2003: Allometric relationships of selected European tree species. -EC Joint Reserch Center, TP 440, Ispra, Italy.

Addresses of the Authors

Dr. Oleg Panferov, Karl Radler, Dietmar Fellert, Prof. Dr. Gode Gravenhorst, Institute of Bioclimatology, University of Göttingen, Büsgenweg 2, 37077 Göttingen, Germany

Dr. Alexander Olchev, Institute of Problems of Ecology and Evolution, Moscow, Russia

Coupling soil water and tree transpiration in the vegetation-boundary-layer model HIRVAC

Valeri Goldberg, Björn Fischer und Christian Bernhofer

Technische Universität Dresden, Department of Meteorology

Abstract

This study presents an approach to describe the coupling mechanism between soil moisture, tree transpiration and atmospheric boundary layer by upgrading the coupled vegetation boundary layer model HIRVAC. For that, several parameters of the included gas exchange model PSN6 were scaled by the matrix potential to consider the stomatal reaction to changes in soil water content. This leads to an adaptation in the additional humidity source term in the basic equation of HIRVAC. As a result the humidity profiles in the canopy air, the latent heat flux and the energy balance of each canopy model layer are changed.

The new parameterisation in HIRVAC was applied for the VERTIKO special observation period in May and June 2003 for vegetation parameters adapted to the Anchor Station Tharandter Wald (experimental site of the Department of Meteorology, TU Dresden). The simulations showed a realistic decrease of evapotranspiration for dry soil conditions. Without coupling latent heat flux increased continuously due to an increase of the atmospheric driving parameters vapour pressure deficit and temperature. Despite some differences during the night the correlation between measured and simulated LE was adequately moderate.

Kopplung von Bodenwasser und Baumtranspiration im Vegetations- Grenzschichtmodell HIRVAC

Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wird ein Ansatz zur Beschreibung der Kopplungsmechanismen zwischen Bodenfeuchte, Baumtranspiration und atmosphärischer Grenzschicht mit Hilfe des aktualisierten gekoppelten Vegetations-Grenzschicht-Modell HIRVAC vorgestellt. Dazu werden verschiedene Parameter des in HIRVAC integrierten Gaswechselmodells PSN6 über das Matrixpotential skaliert, um die Stomatareaktion auf einen geänderten Bodenwassergehalt zu berücksichtigen. Dies führt zu einer Anpassung des zusätzlichen Quellterms in der Feuchtegleichung von HIRVAC. Als Ergebnis werden das Feuchteprofil in der Bestandesluft, der latente Wärmestrom (LE) und die Energiebilanz jeder Bestandesmodellsschicht verändert. Die neue Parametrisierung wurde in einer speziellen Messperiode im BMBF - Verbundprojekt VERTIKO im Mai / Juni 2003 für die Vegetationszusammensetzung am Experimentalstandort im Tharandter Wald angepasst. Die Modellsimulationen zeigten einen realistischen Rückgang der Verdunstung für trockene Bedingungen. Ohne Kopplung von Vegetation und Grenzschicht stieg LE kontinuierlich an, verursacht durch einen Anstieg der atmosphärischen Steuergrößen Temperatur und Sättigungsdefizit. Im Vergleich mit der gemessenen Verdunstung zeigten sich moderate Abweichungen, besonders in der Nacht.

1 Introduction

Latent and sensible heat are important variables in meteorology, hydrology and ecology, as they interact with local climate by mass and energy exchange between the ground and the atmosphere. To reduce uncertainty in predictions of surface energy exchange or to fill data gaps a better understanding of ecosystem processes controlling energy and water balance components is required (FALGE et al., 2005).

Plants, especially trees usually experience a fluctuating water supply during their life cycle due to continuously changing climatic factors. The water stress or dryness leads to closing the stomata, whereby the transpiration is strongly reduced (Gottschalck et al., 2001). That is an important strategy to protected trees against loss of water in dryness.

Results of the German network project VERTIKO (BERNHOFER and KÖSTNER, 2006) and Eva_grips showed that commonly used meso-models like Lokalmodell (German Weather Service, HERET et al., 2006) often overestimate evapotranspiration (ET) of vegetated surfaces during dry periods. This is, among others, probably due to the lack of a plant-specific coupling between the soil water content and the physiological reactions of leaf stomata in the implemented simple SVAT modules. This leads to a continuous increase of ET caused by an increase of the atmospheric saturation deficit. Consequently this leads to an overestimation of water transport from the surface to the atmosphere. Therefore, meteorological models should include a mechanism to couple the soil water with a physiologically based plant control of ET for a more realistic simulation of water transport from the surface to the atmosphere.

This study presents an approach to describe the above mentioned coupling mechanism by upgrading the coupled vegetation boundary layer model HIRVAC using a dependence of stomatal reaction on soil moisture change in the included gas exchange model PSN6.

2 Methods

2.1 Model description

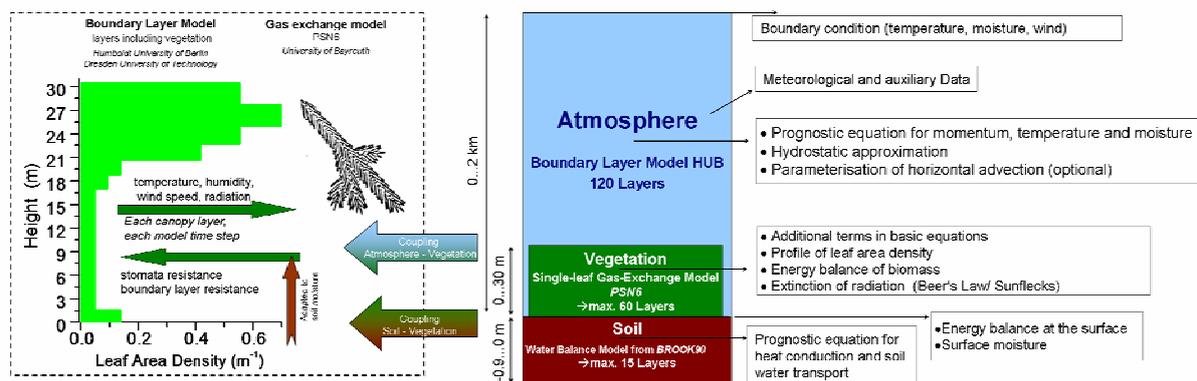


Fig. 1: Scheme of the High Resolution Vegetation Atmosphere Coupler (HIRVAC)

Abb. 1: Schema des High Resolution Vegetation Atmosphere Coupler (HIRVAC)

HIRVAC (High Resolution Vegetation Atmosphere Coupler) is a 1.5 dimensional atmospheric boundary layer model (MIX et al., 1994; GOLDBERG and BERNHOFFER, 2001; BAUMS et al., 2005) which is coupled with the mechanistic photosynthesis module for C3 plants PSN6 (FALGE et al., 1996). The model has a resolution of 120 layers between the lower (surface) and the upper model boundary (typical 2 km above the ground) whereas the layer distance increases with a geometric progression. Vegetation is considered by extension of the basic model equations for momentum, temperature and humidity with additional source terms which are solved numerically for each canopy model level. These terms are included in the first calculation levels above the surface and are parameterized with vegetation parameters dependent on type and vertical structure of vegetation. The high vertical resolution of HIRVAC in the first decametres above the ground (60 layers between 0 and 30 m) permits a very detailed differentiation of structured vegetation like forests (Fig.1).

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K_q \frac{\partial q}{\partial z} + j \left\{ \frac{LAD}{r_b + r_s} (q_w - q) \right\} \quad \begin{array}{l} z - \text{vertical coordinate; } K_q, - \text{ turbulent-transfer coefficient} \\ \text{for moisture; } j=1 \text{ inside and } j=0 \text{ above the canopy} \end{array}$$

In the prognostic moisture equation, which is relevant for transpiration, the source term (term with the factor “j” in eq. above) is parameterised by the vegetation parameters leaf area density (LAD) and stomatal and boundary layer resistance (r_s and r_b) as well as by the difference in specific humidity between leaf surface (q_w) and ambient air (q).

The plant-specific resistances r_s and r_b are simulated in HIRVAC using the mechanistic photosynthesis module PSN6 (FALGE et al., 1996). At present there are PSN6 parameters for spruce, pine, beech, rape, triticale and grass. The model was tested and compared with measurements and SVAT models for different observation periods (FALGE et al., 2005).

2.2 New parameterisation of the model

In the new HIRVAC version several parameters of the model PSN6 were scaled by a power function of soil moisture (matrix potential) to consider the stomatal reaction to a change in soil water content (according to the stand model STANDFLUX, FALGE et al., 1997):

$$g_{fac} = g_{fac,c} 10^{1.294 \Psi - \Psi_{FC}} \quad f_{vc} = f_{vc,c} 10^{1.294(\Psi - \Psi_{FC})} \quad c = c_c 10^{1.294(\Psi - \Psi_{FC})}$$

with Ψ and Ψ_{FC} (<0) as actual matrix potential and matrix potential in the effective root zone at field capacity (unit: mega Pascal). g_{fac} is the linear factor of the empirical model to describe stomatal conductance dependent on net carbon dioxide (CO_2) fixation rate, rate of dark respiration assumed to continue in the light, relative humidity, CO_2 - partial pressure at leaf surface and minimal conductance if stomata are closed. f_{vc} is the carboxylase capacity and c is the electron transport capacity during photosynthesis process (FALGE et al., 1996). The additional index “c” refers to the constant input parameters before modification.

Because the sign of the matrix potential is negative the above mentioned plant parameters are reduced. The application in the model PSN6 leads to an increase of stomatal resistance which results in a reduction of the additional humidity source term (see eq. above) in the model HIRVAC. As a result the humidity profiles in the canopy air, the latent heat flux and the energy balance of each canopy model layer are changed.

3 Results

3.1 Model settings and input data

The new parameterisation of PSN6 was tested in HIRVAC for a dry summer period (28 July – 23 August 2003, days of the year 209 – 235) using vegetation parameters adapted to the experimental site of the Department of Meteorology in the forest *Tharandter Wald* (125 years old spruce stand with a height of 28 m, a leaf area index of 6.5 and a crown cover of 70%).

The HIRVAC model was driven by measured solar and atmospheric radiation, precipitation and soil temperature. The time step was 10 minutes and the integration time was 48 hours (first simulated day was used to minimise initial and boundary effects for the following interesting day). The latent heat flux (LE) was calculated using flux gradient relationship and from the direct output of PSN6 (transpiration of single leafs scaled up to the canopy level).

Fig. 2 gives an overview to the input data used for the HIRVAC simulations in the summer period of 2003. This period was characterised by mostly fair weather with several short rain events combined with higher cloud cover and lower radiation input. The intensity and duration of precipitation were not high enough (maximum 2 mm, excepted on August 18 with 10 mm) to interrupt the long dry period significantly.

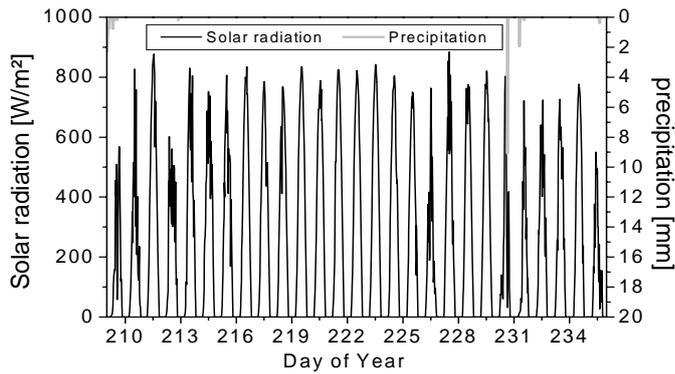


Fig. 2: Input data (solar radiation and precipitation) from the Anchor station Tharandter Wald for the period 28. 7. – 23. 8. 2003 (days of the year 209 – 235)

Abb. 2: Eingangsdaten (Globalstrahlung und Niederschlag) der Ankerstation Tharandter Wald für den Zeitraum 28.7.-23.8.2003 (Kalender-tag 209-235)

3.2 Model results

In fig. 3 the daily course of latent heat flux is shown. The diurnal variation of simulated and measured LE agrees adequately, but several deviations are observed. In the period from 7th to 19th of August (DOY 219 – 231) the measured values are slightly underestimated by the model perhaps due to outliers in the measurements. Both measurements and simulations reflect the increasing water stress. Although the meteorological conditions do not change LE is reduced from 200 to 100 W/m². Only after the rain event on 18th and 19th of August (DOY 230 – 231) the latent heat flux increases for a short time. In the following days ET remains small because the rain water is well distributed in the extremely dry soil.

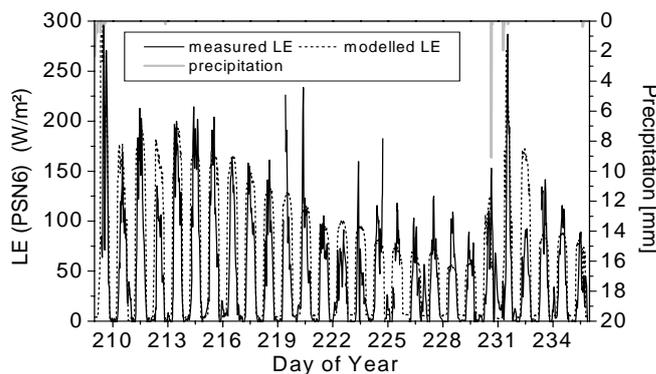


Fig. 3: Measured (solid line) and modelled (dashed line) latent heat (transpiration) flux and measured precipitation of the investigation period

Abb. 3: Gemessener (durchgezogene Linie) und modellierter (strichlierte Linie) latenter Wärmestrom (Transpiration) der untersuchten Periode

In figure 4 measured and simulated LE is compared neglecting the night hours. The bad correlation ($r^2=0.24$) is a hint to more uncertainties of measured and simulated LE (e.g. the higher fault liability of the used measuring system and the problematic turbulent water transport in the model boundary layer) in contrast to, e.g., the sensible heat flux. The systematic overestimation of low LE and underestimation of high LE by the model could be explained by the time lag between simulated and measured daytime turbulence regime. The modelled boundary layer turbulent regime reacts faster to the solar irradiation than the really measured eddies by the eddy correlation system. The general overestimation of LE by the model of about 11 % is a hint to the closure gap in the measured energy balance caused by underestimated LE whereas, in contrast, a closed energy balance in HIRVAC is assumed.

Fig. 5 illustrates the differences of LE between two model runs with different soil moisture regime as the essential result of this study. First the model runs with a constant soil moisture (without water stress) and second with an increasingly dry soil. The figure demonstrates that the differences of LE for the two model runs with different soil moisture increases during the investigated dry period. Due to the continuously small soil water content (the rain event led

only to a short increase of water in the upper soil layer) after the precipitation event on 20th August (DOY 232) the high LE differences between the two simulations remain.

The course of these differences can be explained by the reaction of the vegetation over the day. The increasing smaller water content of the soil leads to closing of the stomata and thus to a decrease of the transpiration. In combination with high solar radiation (fig. 2) and high values of vpd (not depicted here) it results in an increasing water stress in the period from 8th to 14th August (DOY 220 – 226) which is described by the model comparison of the two soil moisture regimes (constantly wet and increasingly dry).

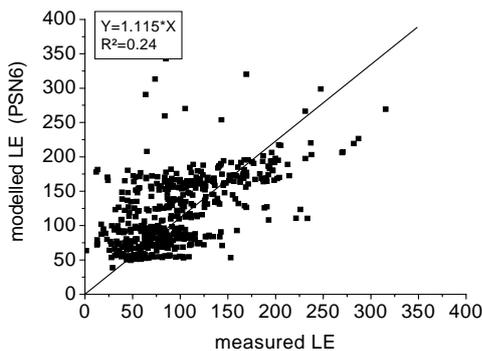


Fig. 4: Comparison between measured and modelled LE (half-hour means for irradiation > 0)

Abb. 4: Vergleich zwischen gemessenem und modelliertem LE (Halbstundenwerte für Globalstrahlung > 0)

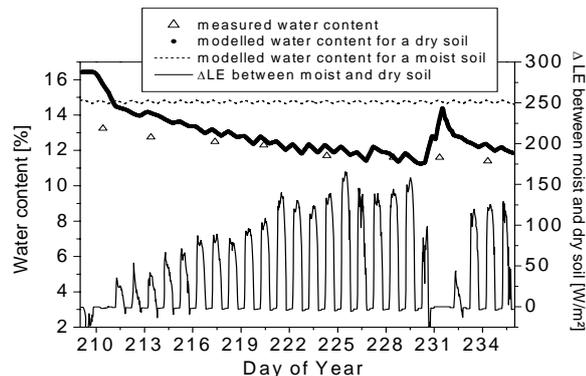


Fig. 5: Difference of LE between model runs with moist and dry soil (solid line), compared with modelled (moist soil: dashed line, dry soil: dots) and measured (triangle) soil water content

Abb. 5: LE-Differenz zwischen Modellläufen mit feuchtem und trockenem Boden (durchgezogene Linie), verglichen mit simuliertem (feuchter Boden: gestrichelte Linie, trockener Boden: Punkte) und gemessenem Bodenwassergehalt

4 Conclusions

The results of this study clearly show that the upgraded model HIRVAC is able to simulate the coupling between soil moisture and evapotranspiration in a dry period. The modified parameterisation of the stomatal resistance in the sub model PSN6 reflects the link between soil moisture, atmospheric humidity and ET via stomatal control fairly well. This simple modification leads to a noticeable improvement of the simulated canopy air moisture regime. It allows to “reproduce” measurement of turbulent fluxes without the use of new “tuning” parameters. The reduction of ET by dryer soil ranges between 30 to 150 W/m² in the forest Tharandter Wald. This leads to a new partition of modelled water budget components of forested catchments and has possible consequences for runoff simulations.

Several SVAT models (e.g. SIB2, SELLERS et al. 1996) consider the effect of soil water on ET in a simple form. But they are usually not able to simulate feedback effects between vegetated surface and the atmospheric boundary layer (ABL) because of the lack in vertical resolution and physical description of ABL.

Results of this study identify several problems which must be examined in further investigations. One problem is the nocturnal offset of LE of the forest stand using FGRS (flux gradient relationships) for calculation. Here the values do not decline under 50 W/m² at night which

can be due to inaccurate simulation of nocturnal thermal stability. An improvement of this lack in model physics is only realisable with a better parameterisation of the nocturnal turbulence regime inside the canopy in HIRVAC.

Acknowledgement

This study is one part of the research project VERTIKO of the German Ministry of Research and Education (BMBF) with grant number 07ATF37. The authors also thank Dr. Eva Falge from the Max-Planck Institute for Chemistry in Mainz for the assistance during implementation of the photosynthesis model.

Literature

- BAUMS, A.-B., V. GOLDBERG, C. BERNHOFER, 2005: Upgrading the Coupled Vegetation Boundary Layer Model HIRVAC by New Soil Water and Interception Modules. - *Meteorol. Z.* **14**: 211-218.
- BERNHOFER, C., B. KÖSTNER, (EDS.), 2006: VERTIKO: Projekt Summary. - *Tharandter Klimaprotokolle Dresden Bd. 6*: 35pp.
- FALGE, E., W. GRABER, R. SIEGWOLF, J.D. TENHUNEN, 1996: A model of the gas exchange response of *Picea abies* to habitat conditions. - *Trees* **10**: 277-287.
- FALGE, E., R.J. RYEL, M. ALSHEIMER, J.D. TENHUNEN, 1997: Effects of stand structure and physiology on forest gas exchange: a simulation study for Norway spruce. - *Trees* **11**: 436–448.
- FALGE, E., S. RETH, B. BRÜGGEMANN, K. BUTTERBACH-BAHL, V. GOLDBERG, A. OLTCHEV, S. SCHAAF, G. SPINDLER, B. STILLER, R. QUECK, B. KÖSTNER, C. BERNHOFER, 2005: Comparison of surface energy exchange models with eddy fluxdata in forest and grassland ecosystems of Germany. - *Ecological Modelling* **188**, 174–216.
- GOLDBERG, V., C. BERNHOFER, 2001: Quantifying the coupling degree between land surface and the atmospheric boundary layer with the coupled vegetation-atmosphere model HIRVAC. - *Annales Geophysicae* **19**: 581-587.
- GOTTSCHALCK, J.C., R.R. GILLIES, T.N. CARLSON, 2001: The simulation of canopy transpiration under doubled CO₂: the evidence and impact of feedbacks on transpiration in two 1D soil–vegetation–atmosphere-transfer models. - *Agric. For. Meteorol.* **106**: 1–21.
- HERET C., A. TITTEBRAND, F.H. BERGER, 2006: Latent heat fluxes simulated with a non-hydrostatic weather forecast model using actual surface properties from measurements and remote sensing. - *Bound. Layer Meteorol.* **121**, 175-194.
- MIX, W., V. GOLDBERG, K.-H. BERNHARDT, 1994: Numerical experiments with different approaches for boundary layer modeling under large-area forest canopy conditions. - *Meteorol. Z.* **3**, 187-192.
- SELLERS, P. J., D. A. RANDALL, G. J. COLLATZ, J. A. BERRY, C. B. FIELD, D. A. DAZLICH, C. ZHANG, G. D. COLLELO, L. BOUNOUA, 1996: A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. - *Journal of Climate* **9**, 676-705.

Anschrift des Autors

Dr. Valeri Goldberg, Björn Fischer, Prof. Dr. Christian Bernhofer, Technische Universität Dresden, Institute for Hydrology and Meteorology, Department of Meteorology, 01062 Dresden

Der Einfluß von Randeffekten auf die Verdunstung fragmentierter Waldbestände

Mathias Herbst^{1,2}, John M. Roberts² and David D. Gowing¹

¹The Open University, Department of Biological Sciences

²Centre for Ecology and Hydrology, Process Hydrology Section

Zusammenfassung

Die Verdunstung von Wäldern ist in den vergangenen Jahrzehnten in zahlreichen Meßkampagnen, zumeist über ausgedehnten Waldgebieten, zuverlässig bestimmt worden. Jedoch ist die Bedeutung einer zunehmend starken Fragmentierung existierender Waldgebiete für den Wasserhaushalt bislang kaum untersucht worden. Im Rahmen des „Lowland Catchment Research“ (LOCAR) Programms in Südengland wurde nun in einer ganzjährigen Meßkampagne mittels der Saftfluß-Technik die Transpiration in einem Laubmischwald in unterschiedlichen Entfernungen vom Waldrand gemessen. Auf die Grundfläche bezogen, lag die jährliche Transpiration am Waldrand etwa in der Größenordnung der potentiellen Verdunstung und damit rund 60% höher als im Inneren des Waldes und in ähnlicher Höhe wie die in einer korrespondierenden Studie bestimmte Transpiration einer Hecke. Die Interzeptionsverdunstung zeigte keinen solchen Randeffekt. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wird gezeigt, daß der Randeffekt bei kleinen Waldflächen (< 10 ha) eine dominierende Rolle im Wasserhaushalt spielt und erst bei Wäldern mit einer Grundfläche von mehr als 100 ha ganz zu vernachlässigen ist.

The influence of edge effects on evapotranspiration of fragmented woodlands

Abstract

The water use of forests has been the subject of many studies in the past decades. They were mostly carried out in extensive areas of woodland and achieved consistent results. However, there is as yet a large uncertainty about the role of fragmented woodlands in the catchment water balance, since water losses from small patches of woodland have rarely been measured. In the framework of the “Lowland Catchment Research” (LOCAR) programme, a 7-months field measurement campaign has been carried out in southern England in order to measure the transpiration of a mixed deciduous forest in various distances from the forest edge by means of the sap flux technique. The annual transpiration per unit ground area near the forest edge equalled potential evaporation and was about 60% higher than in the forest interior and similar to the transpiration of hedgerows as determined in a corresponding study. Interception evaporation was not affected by the proximity to an edge. Based on these results it is shown that the edge effect dominates the water use of small forests (< 10 ha) and becomes negligible only for woodlands larger than 100 ha.

1 Einleitung

Es ist bereits mehrfach der Versuch unternommen worden, Verdunstungsraten von Wäldern zu kategorisieren und den Wasserverbrauch strukturellen Faktoren wie Höhe, Alter oder Artenzusammensetzung eines Waldes zuzuordnen (ROBERTS, 1983; PECK & MAYER, 1996; KUMATSU, 2005). Nicht immer jedoch läßt sich die Verdunstung eines Waldbestandes anhand dieser Faktoren vorhersagen. In Großbritannien beispielsweise wurden große Unterschiede im Bodenwasserhaushalt unter ansonsten sehr ähnlichen Laubwäldern gemessen (ROBERTS & ROSIER, 2006), die die Frage nach dem möglichen Einfluß der Ausdehnung eines Waldgebietes auf dessen Wasserverbrauch haben aufkommen lassen. Dies am Beispiel eines Mischwal-

des in Südengland durch Feldmessungen zu untersuchen, war das Ziel der vorliegenden Studie.

2 Material und Methoden

Als Untersuchungsflächen wurden zwei gegenüberliegende Ränder eines 415 ha großen, naturnahen Laubmischwaldes ('Wytham Woods') 5 km nordwestlich der Stadt Oxford ausgewählt. Die Bestandeshöhe betrug im Mittel 15 – 18 m und der maximale Blattflächenindex 3.42. Die dominierende Baumart ist die Esche (*Fraxinus excelsior* L.), aber auch Eiche (*Quercus robur* L.) und Feldahorn (*Acer campestre* L.) erreichen teilweise die oberen Kronenschichten, wobei Feldahorn zusammen mit Weißdorn (*Crataegus monogyna* L.) auch die lückenhafte Strauchschicht bildet.

Meteorologische Daten wurden von einer in der Nähe befindlichen automatischen Wetterstation als Stundenmittel aufgezeichnet, und der Bestandesniederschlag in einem Transsekt durch den Nordrand des Waldes wurde mittels manueller Regensammler bestimmt, die einmal pro Woche abgelesen wurden. Die Transpiration wurde mit der Saftflußtechnik gemessen, und zwar mit TDP-Sensoren nach GRANIER (1985), deren Signale im Falle der ringporigen Hölzer mit dünnem aktivem Xylem nach dem Verfahren von CLEARWATER et al. (1999) korrigiert wurden. Insgesamt wurden im Verlauf der Vegetationsperiode 71 Bäume, verteilt über die vier genannten Baumarten und in verschiedenen Entfernungen zum Waldrand, beprobt. Je nach Durchmesser des Baumes wurden zwei bis vier Sensoren pro Baum eingesetzt, die jeweils rund einen Monat lang Stundenmittel der Saftflußdichte aufzeichneten, bevor sie dann in einen anderen Baum versetzt wurden. Nicht alle Arten, Größenklassen und Zonen verschiedener Entfernung zum Waldrand konnten auf diese Weise gleichzeitig erfaßt werden, obwohl die Daten von beiden Waldrändern zusammengefaßt wurden. Damit trotzdem ein Vergleich für alle Gruppen von Bäumen möglich wurde, wurden die Saftflußdichten zur potentiellen Verdunstung (Priestley-Taylor) in Beziehung gesetzt und auf diese Weise standardisiert. Für diese standardisierten Daten wurde die Abhängigkeit der Flußdichte von der Entfernung vom Waldrand mittels logarithmischer Funktionen beschrieben. Den verschiedenen Baumarten konnte so für jede Zone eine mittlere Saftflußdichte zugeordnet werden, die mit dem Verhältnis aus der Querschnittsfläche des aktiven Xylems aller Bäume einer Art in einer Zone und der Grundfläche der Zone multipliziert wurde, wodurch sich der Wasserverbrauch in mm (Liter pro Quadratmeter Grundfläche) ergab.

3 Ergebnisse

Mit den Messungen des Bestandesniederschlags (Daten hier nicht gezeigt) sollte vor allem geprüft werden, ob Regenschatten auf der Lee-Seite des Waldes, wie sie in ausgeprägter Form bei Hecken im gleichen Gebiet beobachtet wurden (HERBST et al., 2006), auch für die Wasserbilanz des Waldrandes eine Rolle spielen. Die Zone, in der Regenschatten auftraten, war jedoch sehr schmal, und angesichts einer hohen räumlichen Variabilität des Bestandesniederschlags im Inneren des Waldes war die dadurch verursachte geringe Erhöhung der Niederschlagsinterzeption am Waldrand nicht signifikant.

Im Hinblick auf die Transpirationmessungen fiel zunächst auf, daß die Größenordnungen der Saftflußdichte zwischen ring- und zerstreutporigen Hölzern sowie zwischen verschiedenen Größenklassen stark variierte (Abb. 1). Beim direkten Vergleich zwischen randständigen und zentralen Bäumen wurde der stärkste Unterschied bei der Esche, und zwar bei Bäumen mit weniger als 40 cm Brusthöhendurchmesser (DBH), beobachtet. Die Saftflußdichte am Waldrand war hier fast doppelt so hoch wie im Inneren (Abb. 1). Auch bei größeren Eschen war

dieser Randeffekt noch deutlich, während bei den anderen Arten (als Beispiel ist Feldahorn in Abb. 1 gezeigt) der Unterschied nur etwa ein Fünftel bis ein Viertel betrug.

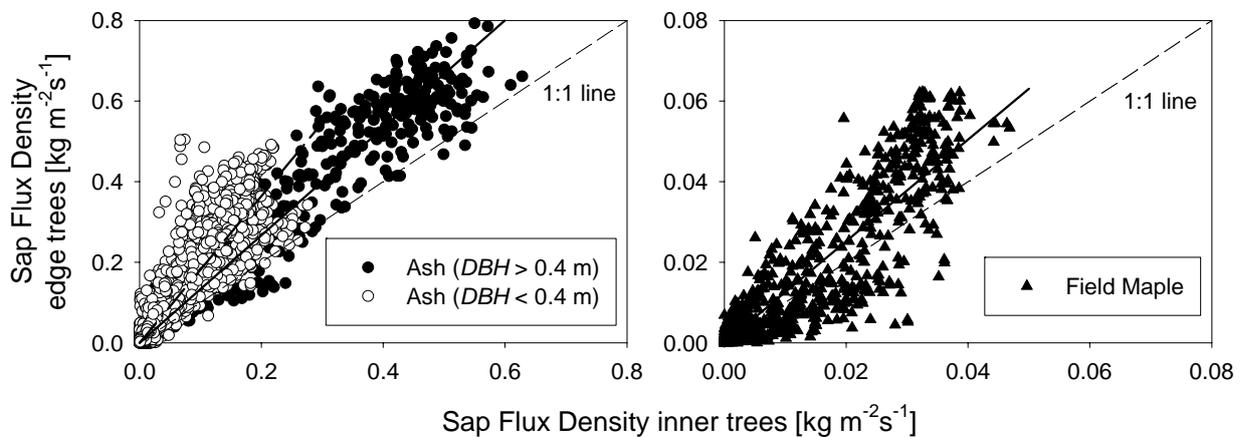


Abb. 1: Gleichzeitig gemessene Saftflußdichte in Bäumen am Waldrand (0 – 15 m Entfernung vom Rand) und im Waldesinneren (45 – 60 m Entfernung vom Rand) am Beispiel der Esche (links) und des Feldahorn (rechts). Die Steigungen der Ausgleichsgeraden betragen 1.33 ($R^2 = 0.92$) und 1.82 ($R^2 = 0.77$) für die beiden Größenklassen der Esche sowie 1.26 ($R^2 = 0.81$) für Feldahorn ($P < 0.0001$ für alle Regressionen)

Fig. 1: Comparison of hourly sap flux density as measured simultaneously in “edge” trees (0 – 15 m distance from forest edge) and “inner” trees (45 – 60 m distance from forest edge) for ash (left) and field maple (right). The slopes are 1.33 ($R^2 = 0.92$) for large ash trees, 1.82 ($R^2 = 0.77$) for small ash and 1.26 ($R^2 = 0.81$) for field maple ($P < 0.0001$ for all regressions)

Trägt man die mittels der potentiellen Verdunstung standardisierte Saftflußdichte sämtlicher Probebäume gegen die Entfernung vom Waldrand auf, so zeigt auch in dieser Darstellung die Esche den stärksten Randeffekt (Abb. 2). Während Feldahorn und Weißdorn einen deutlich schwächeren diesbezüglichen Trend aufwiesen (Daten nicht gezeigt), gab es bei der Eiche überhaupt keine Korrelation zwischen Saftflußdichte und Entfernung zum Waldrand. Stattdessen wurde eine hohe individuelle Streuung beobachtet (Abb. 2).

Die mittlere Saftflußdichte allein gibt jedoch noch keinen Aufschluß über den tatsächlichen Wasserverbrauch eines Baumbestandes. Entscheidend ist vielmehr die gesamte wasserleitende Querschnittsfläche aller Stämme in einem Bereich, aus der sich zusammen mit der Flußdichte das ins Kronendach transportierte Wasservolumen errechnet. Im untersuchten Wald war die Basalfläche aller Stämme, und damit auch der wasserleitende Querschnitt, am Waldrand deutlich höher als im Waldesinneren (Tab. 1), was vor allem auf das Vorhandensein von mehr und größeren Eichen, zwischen einer ähnlichen Anzahl von Bäumen der anderen Arten, zurückzuführen war.

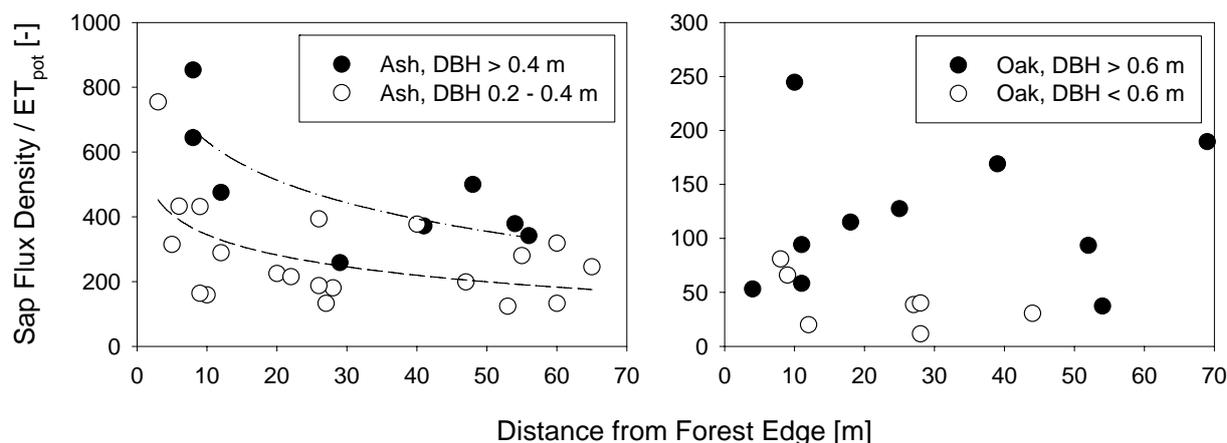


Abb. 2: Das Verhältnis von Saftflußdichte und potentieller Verdunstung in Abhängigkeit von der Entfernung vom Waldrand am Beispiel der Esche (links) und der Eiche (rechts). Die Ausgleichskurven entsprechen $y = -172.14 \ln(x) + 1028.72$ ($R^2 = 0.58$, $P = 0.03$) for große Eschen und $y = -190.31 \ln(x) + 552.23$ ($R^2 = 0.31$, $P = 0.01$) für kleine Eschen. Bei der Eiche gab es keinen signifikanten Trend ($P > 0.1$)

Fig. 2: The ratio between average hourly sap flux density and average hourly potential evaporation per tree, plotted in relation to the distance from the forest edge for ash (left) and oak (right). The regression curves are $y = -172.14 \ln(x) + 1028.72$ ($R^2 = 0.58$, $P = 0.03$) for large ash and $y = -190.31 \ln(x) + 552.23$ ($R^2 = 0.31$, $P = 0.01$) for small ash ($P > 0.1$ for oak)

Tab. 1: Basalfläche [$m^2 ha^{-1}$] pro Baumart für Zonen unterschiedlicher Entfernung zum Waldrand, basierend auf der Vermessung sämtlicher Stämme ($n = 546$) auf einer Fläche von 40×60 m am Südrand und 60×60 m am Nordrand von Wytham Woods

Tab. 1: Basal area [$m^2 ha^{-1}$] per species for zones in different distances from the forest edge. Data are based on a survey of all stems ($n = 546$) in a 40×60 m plot at the south edge and a 60×60 m plot at the north of Wytham Woods

Species	Distance from forest edge		
	0 – 15 m	15 – 30 m	30 – 60 m
Fraxinus excelsior	19.72	15.77	20.67
Quercus robur	21.93	9.88	8.50
Acer campestre	0.61	6.87	2.51
Crataegus monogyna	4.26	2.97	2.74
other	1.08	1.52	1.23
Total	47.60	37.00	35.65

Die auf die Grundfläche bezogene Bestandestranspiration über die gesamte Vegetationsperiode 2005 betrug im Waldesinneren 354 mm (Abb. 3, links). Dieser Wert stieg zum Waldrand hin auf 565 mm an und erreichte damit etwa die Höhe der potentiellen Verdunstung (571

mm). Im Falle der Esche wurde dieser Anstieg durch eine erhöhte Saftflußdichte verursacht, während die Zunahme der Transpiration der Eichen zum Waldrand hin erst auf der Bestandesebene auftrat.

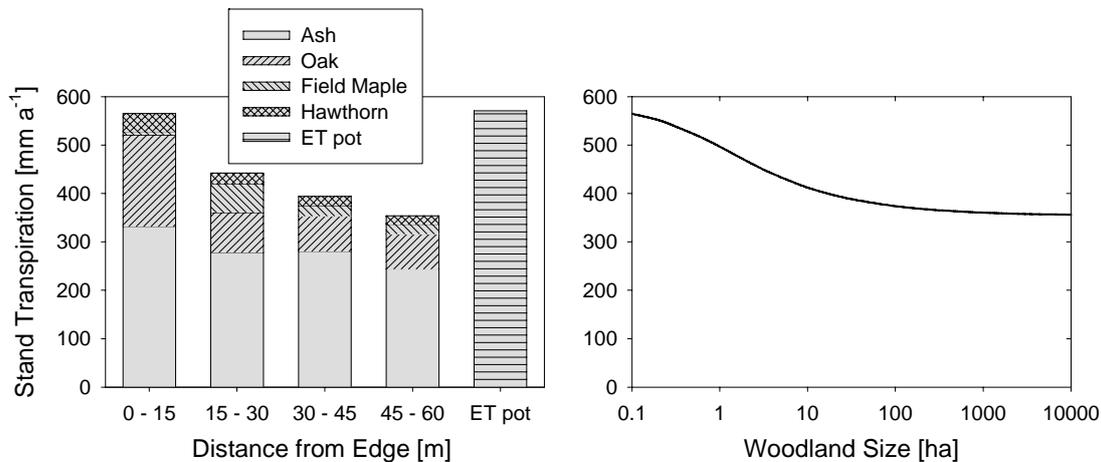


Abb. 3: Links: Bestandestranspiration über den Zeitraum 28.4. – 22.11.2005 für 4 verschiedene Zonen in unterschiedlicher Entfernung zum Waldrand, aufgeschlüsselt nach Baumarten und verglichen mit der potentiellen Verdunstung (571 mm). Die Transpiration in den 4 Zonen betrug 565, 442, 394 und 354 mm. Rechts: Hypothetische jährliche Transpiration eines Laubmischwalds in Abhängigkeit von seiner Größe, unter der Annahme einer quadratischen Grundfläche

Fig. 3: Left: Seasonal transpiration per forest zone calculated for the period 28 April to 22 November 2005, partitioned between the four main tree species and compared to potential evaporation (571 mm). Stand transpiration in the four zones was 565, 442, 394 and 354 mm. Right: Hypothetical annual transpiration for temperate deciduous forests of various sizes, assuming a quadratic ground area

Die für die vier Zonen bestimmten Verdunstungsraten wurden schließlich dazu verwendet, die jährliche Transpiration von Wäldern des gleichen Typs mit unterschiedlicher Ausdehnung zu berechnen. Vereinfachend wurde angenommen, daß diese hypothetischen Waldbestände eine quadratische Grundfläche haben und daß die für die Zone '45 – 60 m' bestimmte Transpiration mit weiter zunehmender Entfernung vom Waldrand nicht noch weiter absinkt. Es zeigt sich, daß der Randeffect den Wasserumsatz von Wäldern < 10 ha stark dominiert (Abb. 3, rechts) und daß er erst ab einer Bestandesfläche von mehr als 100 ha vollends zu vernachlässigen ist.

4 Diskussion

Vergleicht man die erzielten Ergebnisse bezüglich der erhöhten Transpiration am Waldrand mit den wenigen früheren Studien zu diesem Thema, so ergeben sich interessante Übereinstimmungen. Eine Differenz in der Saftflußdichte zwischen randständigen und zentralen Bäumen von 52 – 64% wurde für eine Eukalyptusplantage nachgewiesen (TAYLOR et al., 2001). Sie entspricht damit ziemlich genau dem Durchschnittswert der verschiedenen Größenklassen der in Wytham Woods dominierenden Esche. Auch GIAMBELLUCA et al. (2003) fanden eine um 56% erhöhte Saftflußdichte in exponierten Bäumen am Rand eines Tropenwaldfragmentes. Eine Hochrechnung auf die Bestandesebene wurde bislang nur von CIENCIALA et al. (2002) für borealen Nadelwald durchgeführt, und auch hier liegt der Anstieg von 53% am Waldrand in ähnlicher Größenordnung wie die 60% in Wytham Woods. Alle diese Studien beruhen allerdings auf einer deutlich schmaleren Datengrundlage als die vorliegende Arbeit, und sie sagen auch nichts über die räumliche Ausdehnung des Randeffectes

aus, der für eine Bilanzierung der Gebietsverdunstung entscheidend ist. Die für das Innere von Wytham Woods bestimmte Transpiration entspricht der vieler anderer europäischer Wälder (ROBERTS, 1983), und die Transpiration am Waldrand ist ähnlich hoch wie die von Hecken im selben Gebiet (HERBST et al., 2007). All dies könnte darauf hindeuten, daß trotz der großen Variabilität im Ausmaß des Randeffektes auf der Einzelbaumebene verschiedene Prozesse auf der Bestandesebene so zusammenwirken, daß insgesamt die prozentuale Erhöhung des Wasserumsatzes am Waldrand in aller Regel eine konstante Größenordnung aufweist.

5 Schlußfolgerungen

Größe und Form einer bewaldeten Fläche müssen berücksichtigt werden, wenn die Auswirkungen von Aufforstungen oder Kahlschlägen auf den Gebietswasserhaushalt abgeschätzt werden sollen. Auf einen Quadratmeter Grundfläche bezogen, steigt die Verdunstung mit abnehmender Flächengröße an. Der Grund dafür sind Randeffekte, die sich auf die Transpiration, nicht jedoch auf die Interzeptionsverdunstung auswirken.

Literaturverzeichnis

- CIENCIALA, E., P.-E. MELLANDER, J. KUČERA, M. OPLUŠTILOVÁ, M. OTTOSSON-LÖFVENIUS, K. BISHOP, 2002: The effect of a north-facing forest edge on tree water use in a boreal Scots pine stand. – *Can. J. For. Res.* **32**, 693-702.
- CLEARWATER, M.J., F.C. MEINZER, J.L. ANDRADE, G. GOLDSTEIN, N.M. HOLBROOK, 1999: Potential errors in measurement of nonuniform sapflow using heat dissipation probes. – *Tree Physiol.* **19**, 681-687.
- GIAMBELLUCA, T.W., A.D. ZIEGLER, M.A. NULLET, D.M. TRUONG, L.T. TRAN, 2003: Transpiration in a small tropical forest patch. – *Agric. For. Meteorol.* **117**, 1-22.
- GRANIER, A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. – *Ann. Sci. For.* **42**, 193-200.
- HERBST, M., J.M. ROBERTS, P.T.W. ROSIER, D.J. GOWING, 2006: Measuring and modelling the rainfall interception loss by hedgerows in southern England. – *Agric. For. Meteorol.* **141**, 244-256.
- HERBST, M., J.M. ROBERTS, P.T.W. ROSIER, D.J. GOWING, 2007: Seasonal and interannual variability of canopy transpiration of a hedgerow in southern England. – *Tree Physiol.* **27**, 321-333.
- KOMATSU, H., 2005: Forest categorization according to dry-canopy evaporation rates in the growing season: comparison of the Priestley-Taylor coefficient values from various observation sites. – *Hydrol. Proc.* **19**, 3873-3896.
- PECK, A., H. MAYER, 1996: Influence of stand parameters on evaporation in forests. – *Forstw. Cbl.* **115**, 1-9.
- ROBERTS, J.M., 1983: Forest transpiration: a conservative hydrological process? – *J. Hydrol.* **66**, 133-141.
- ROBERTS, J.M., P.T.W. ROSIER, 2006: The effect of broadleaved woodland on Chalk groundwater resources. – *Q. J. Engineer. Geol. Hydrogeol.* **39**, 197-207.
- TAYLOR, P.J., I.K. NUBERG, T.J. HATTON, 2001: Enhanced transpiration in response to wind effects at the edge of a blue gum (*Eucalyptus globulus*) plantation. – *Tree Physiol.* **21**, 403-408.

Anschrift des Autors

Dr. Mathias Herbst, Dr. John M. Roberts, Dr. David D. Gowing, Centre for Ecology and Hydrology, Crowmarsh Gifford, Wallingford OX10 8BB

The Influence of Climate Change and Land-use on the Water Budget of a Forested Catchment

Christian Bernhofer, Uwe Eichelmann, Johannes Franke, Valeri Goldberg,
Thomas Grünwald, Janet Häntzschel, Barbara Köstner, Heiko Prasse, Ronald Queck,
Andreas Schreiber, Jörg Seegert und Uwe Spank

Institute of Hydrology and Meteorology, Technische Universität Dresden

Abstract

Almost 40 yrs of water budget measurements of a forested watershed in Central Europe are utilised to investigate (i) effects of observed climate trends since the 1960ies, and (ii) effects of land-use changes due to a change in forest management since the 1990ies. Main focus is on evapotranspiration (ET) as it is expected to show the most pronounced response. Potential ET did increase due to changes in saturation deficit and radiation, though no changes are detectable in actual ET until mid of the 1990ies. Since then a clear trend of observed watershed ET exists. This can be attributed to a reduced amount of clear cuts and an increased proportion of under storey beech or a change in the reference meteorological or hydrological data used to construct watershed ET. Modelling with the lumped parameter model BROOK90 showed no change in modelled ET in the same period indicating that either parameters have to be adjusted or data need additional homogenisation.

1 Introduction

The interannual variation and trends in forest water budgets reflect both, land use change and change in climate. Today, with an already observed climate trend in Central Europe (e.g., of about 1K in the last 50 yrs in Germany; FRANKE et al., 2004) we investigate whether the climate signal in the observed long-term water budget can be separated from the “noise” originating from interannual variability and land-use change. Basis are flux measurements in a forested area near Tharandt (Tharandter Wald), about 25 km SW of Dresden/Saxony (GOLDBERG & BERNHOFER, 2006). This forest has a size of approximately 60 km², and a long history of forestry documentation (about 180 yrs.) as well as meteorological and hydrological measurements: (i) climate data since mid of the 19th century, (ii) continuous hydrological data of the Wernersbach catchment since 1968 (covering 4.6 km²), and (iii) continuous flux measurements by Eddy Covariance (EC) within EUROFLUX, Carbo-Euroflux, and Carbo-Europe since 1996 (representative for approximately 0.5 km²).

2 Material and Methods

Altitude of the Wernersbach catchment ranges from 323 to 424 m a.s.l., slopes are moderate (40 percent of slopes <1°, 54 percent of slopes 1 to 3°) and soils cover a variety of brown soils with podsoles in continuously wet parts of the catchment. The area is well drained with managed coniferous forests (see Fig.1) being the dominant cover (70% Norway spruce, total coniferous 82%) with a minor part of European beech (2%), European larch (7%) and other deciduous (9%). There are several recording stream gauges of sub-catchments, here only the main V-weir is used (built in 1967 with a concrete sealing across the valley to avoid by-pass flow). Mean run-off is 36 liter s⁻¹ (244 mm) which is about 30 percent of precipitation. The area averaged rainfall is measured by 6 precipitation gauges. Since 1994 there are equipped with automatic recording devices. Before 1994 precipitation was measured manually by three observations per week for each gauge. Losses due to evaporation between measurements and winter precipitation were corrected according to Flemming (personal communication). The

nearby climate station *Grillenburg* (mean annual temperature 7.2 °C, mean annual precipitation 853 mm; based on the period 1961 to 1990) is operated since 1955.

The EC flux measurements are performed at the Anchorstation Tharandt above a more than 100 yr old spruce forests. The site was selected to represent the dominating spruce forest in the area and is judged to reflect typical growth rates due to its average status in water and nutrient availability. The measurements include water and carbon fluxes by EC at a resolution of 30 min at the measurement height of 42 m above ground. The results of 9 years of continuous measurements indicate good quality of both water and carbon fluxes with low energy balance closure gaps (around 10 to 25 percent of available energy for the individual years).

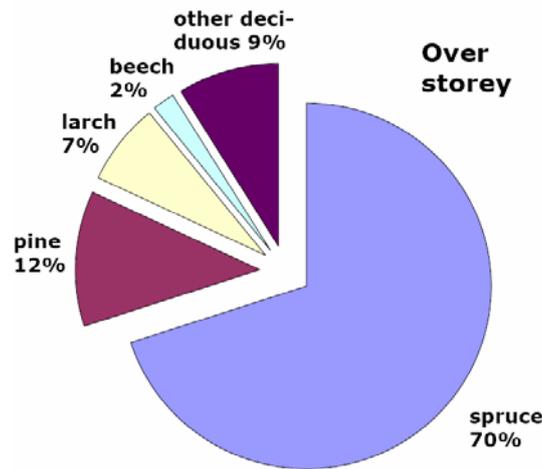


Fig. 1: Land-use in the Wernersbach catchment (based on recent data)

3 Results

The variability of ET between years and methods is large. The long-term watershed ET is characterised by infrequent droughts with an average return period of 10 years. Obviously storage effects reduce this variability somewhat; so we expect a larger interannual variability in actual ET. However, between 1997 and 2005 eddy covariance measurements show a variability of 129mm which is small compared to more than 400mm between the individual years of watershed ET (Tab.1, see also GRÜNWARD & BERNHOFER, 2007). Bowen ratio as an indicator of water availability was typically around 0.7, with 1.2 in the very dry year 2003.

Tab. 1: Water budget components in mm (uncorrected precipitation P_{UC} , micrometeorological evapotranspiration ET_{EC} and catchment evapotranspiration $P_{CO-R} = ET_{HY}$) and Bowen ratio BR_{EC} (dimensionless) for the Tharandt forest (dominated by Norway spruce)

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
P_{UC}	714	909	826	803	938	1098	501	874	898
ET_{EC}	485	499	518	537	487	445	389	438	478
ET_{HY}	627	753	666	635	879	721	446	950	
BR_{EC}	0.66	0.56	0.59	0.59	0.53	0.64	1.16	0.76	0.72

Analysis of trends in climate records reflects observations of regional climate studies of Saxony: no trend in precipitation, a clear trend in temperature and saturation deficit of the atmosphere, and an increase in solar radiation since 1990. These trends combine to a change in potential evaporation of 4% between the years 1991 to 2003 and the climate periods 1961-1990 and 1971-2000, respectively (Fig.2). The trend of 3.5% or 23 mm between 1961 and 2003 is not significant.

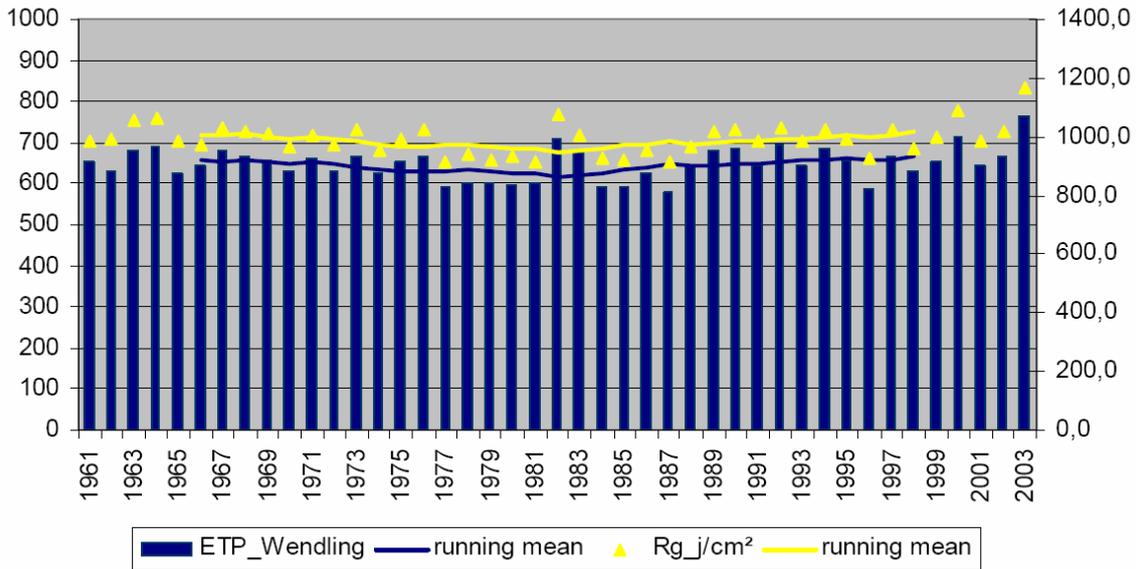


Fig. 2: Long-term trend in potential ET after Wendling (ATV-DVWK-MERKBLATT M 504); a running mean of 11 years was used to eliminate solar effects

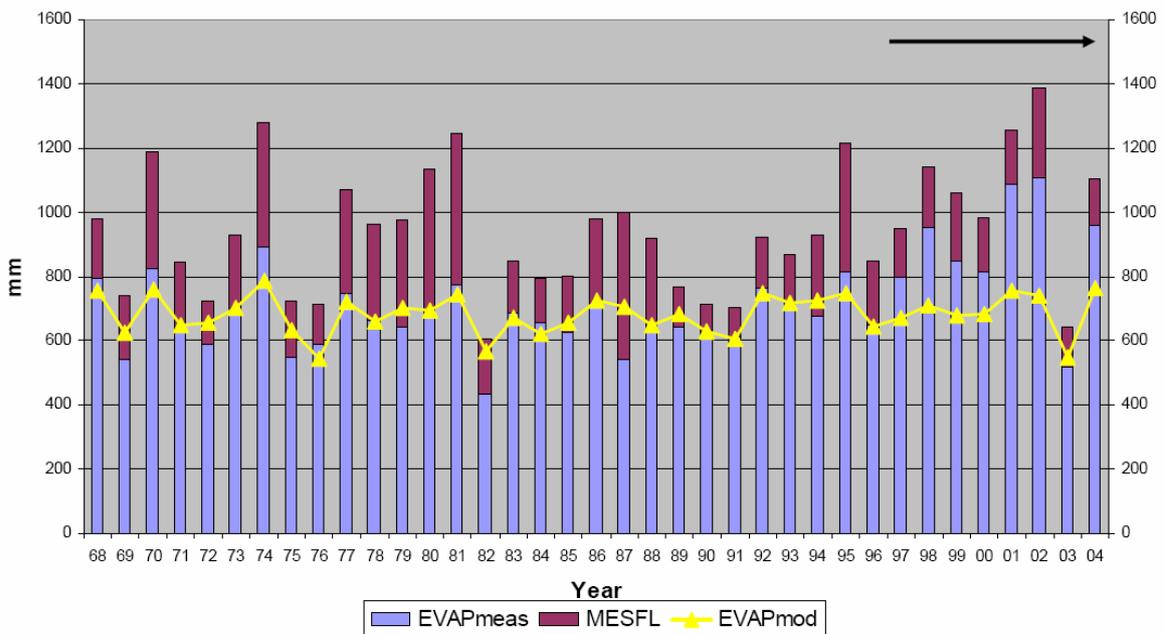


Fig. 3: Long-term trend in actual ET and runoff of the Wernersbach catchment; EVAPmeas is the difference of precipitation and runoff; MESFL is runoff and EVAPmod is modelled actual ET as output of BROOK90

To study climate and land-use effects separately the watershed model BROOK90 (FEDERER, 1995) was used. It was parameterised by objectively derived areal parameters; no specific calibration was done to fit observed and modelled runoff or ET (SEEGERT, 1998). In the period 1968 to 1995 a very good resemblance between measured and modelled ET was found (Fig.3). Since about 1996 a clear change in this relationship is observed: The measured watershed ET is typically larger than the modelled ET by up to 30%. Several hypotheses have been tested for this surprisingly large difference including measurement insufficiencies (i) of the runoff measurements or (ii) the meteorological input to BROOK90. A proof of such a large change was not detected, neither in the stream gauge records nor in the meteorological records, despite several inhomogenities in those data (Wollner, pers. communication). Alternatively land-use change was tested. Here, the most pronounced change is at one hand the reduction of clear cuts (until 1990 about 1-2% of the area of the catchment annually) and on the other hand the planting of beech in the under storey of the spruce canopy (about 10% of the area of the catchment since mid of the 1990ies). Other possible influences are a change in the draining of the catchment, especially the change in the maintenance of artificial drainage which would lead to a change in the runoff coefficient of the catchment.

4 Discussions and Conclusions

Actual evapotranspiration (ET_a) showed a very distinct behaviour after 1995. While potential ET increased only marginally, runoff statistics show a significant change which lead to a much higher actual ET of the watershed. However, changes in land-use point toward a possible influence of recent changes in forest management. It is not clear yet whether those changes can be attributed to changes in land-use alone or a combination of measurement insufficiencies, changes in run-off characteristics due to less artificial drainage or changes in land-use. Additional modelling with adapted parameters needs to be done to isolate these effects. If correct, the consequences of those changes might be severe and should be part of the risk analysis both in forestry and water issues.

Acknowledgement

The authors are grateful to the German tax payers, the Saxonian Ministry of Science and Art (as the major supporters of TU Dresden) and many projects that helped to continue those measurements over so many years, as well as to many students from undergraduates to graduate and PhD level for their enthusiasm and help.

References

- ATV-DVWK-Merkblatt M 504 (BERNHOFER, C., GUGLA, G., GOLF, W., GÜNTHER, R., JANKIEWICS, P., KLÄMT, A., MENZEL, L., MIEGEL, K., OLBRICH, H.-D. & U. WENDLING), 2002: Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. - *ATV-DVWK-Regelwerk*. 144pp.
- FEDERER, C. A., 1995: BROOK90: A Simulation Model for Evaporation, Soil Water and Streamflow, Version 3.1ff bzw. 4.0, Computer Freeware and Documentation – USDA Forest Service, Durham, USA.
- FRANKE, J., GOLDBERG, V., EICHELMANN, U., FREYDANK, E. & C. BERNHOFER, 2004: Statistical analysis of regional climate trends in Saxony. - *Climate Research*. 27:145-150.

- GOLDBERG, V. & C. BERNHOFER, 2006: Water balance of forested catchments. In: Global Change: Enough water for all? (eds. J.L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Menzel, C.-D. Schönwiese). - *Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg*. 72-76.
- GRÜNWALD, T. & C. BERNHOFER, 2007: A decade of carbon, water and energy flux measurements of an old spruce forest at the Anchor Station Tharandt. - *Tellus B*, in print.
- SEEGERT, J., 1998: Die interannuale Variabilität des Wasserhaushaltes des hydrologischen Experimentalgebietes Wernersbach vor dem Hintergrund forstlicher Nutzung. - Diplomarbeit, Institut für Hydrologie und Meteorologie, TU Dresden, 102 pp.

Authors' Address: Prof. Dr. Christian Bernhofer, Uwe Eichelmann, Johannes Franke, Dr. Valeri Goldberg, Dr. Thomas Grünwald, Dr. Janet Häntzschel, PD Dr. Barbara Köstner, Heiko Prasse, Dr. Ronald Queck, Andreas Schreiber, Jörg Seegert, Uwe Spank, Technische Universität Dresden, Institute of Hydrology and Meteorology, Department of Meteorology, Pienner Str. 23, D-01737 Tharandt, Germany

Modellierung des Bestandes-Innenklimas in Abhängigkeit klimabedingt veränderter Bestandesstruktur – Modellergebnisse vom Kranzberger Forst (Freising) und der Dübener Heide

Björn Fischer, Valeri Goldberg und Christian Bernhofer
Institut für Hydrologie und Meteorologie, TU Dresden

Zusammenfassung

Im Zuge des globalen Klimawandels führt die Veränderung des Regionalklimas zu einer Veränderung des Bestandes-Innenklimas, das wieder von den Beständen selbst mitgeprägt wird. Diese Interaktion kann die Wachstumsbedingungen von Wäldern wesentlich beeinflussen: Wachstumsfaktoren wie Wasser, Licht, Lufttemperatur und -feuchte, aber auch das Auftreten von Extremen (Frost, Dürre) werden im Wald vom Bestandes-Innenklima bestimmt. Für seine Quantifizierung unter geänderten Randbedingungen (Regionalklima, Bestandesstruktur, Bodenwasserhaushalt, etc.) sind rückgekoppelte Modelle notwendig, welche das Bestandes-Innenklima in Form von prognostischen Variablen explizit berücksichtigen. Im Teilprojekt Meteorologie des Verbundprojektes ENFORCHANGE wird das gekoppelte Vegetation-Atmosphären Grenzschichtmodell HIRVAC angewendet. Hierbei wurde zum Testen neuer Funktionen der Level II Standort Kranzberger Forst (TU München) herangezogen. Im Folgenden wurde für das ENFORCHANGE Untersuchungsgebiet Dübener Heide Modellsimulationen für Kiefern, Buchen und Mischwaldbestände vorgenommen, um die Unterschiede des Bestandes-Innenklimas in Abhängigkeit der Vegetationsart und -struktur zu untersuchen. Erste Ergebnisse zeigen, dass eine Reduzierung der Temperatur und der Verdunstung beim Übergang vom Kiefern- zum Buchenwald zu beobachten ist. Zum Verifizieren dieser Ergebnisse müssen weitere Untersuchungen an Beständen folgen.

Modelling of the canopy interior climate in dependence climatic conditional changed canopy structure - Model results of the Kranzberger Forst (Freising) and the Dübener Heide.

Abstract

The change of the regional climate leads to a change of the climate within the canopy, which is influenced again by the canopy. This interaction can affect the growth conditions of forests substantially: Growth factors like water, light, air temperature and -moisture, but also the occurrence of extremes (frost, drought) are affected by the climate inside the forest canopy. For its quantification under changed boundary conditions (regional climate, canopy structure, soil water regime, etc.) models are necessary, which consider feedback between the canopy and the atmosphere by prognostic variables. In the working group of the Dresden Department of Meteorology as part of the joint project ENFORCHANGE the coupled vegetation atmospheric boundary layer model HIRVAC was applied. For testing of new functions, data from the level II area Kranzberger Forst (TU München) were used. In the following, different model simulation for pine, beeches and mixed forest in the ENFORCHANGE investigation area Dübener Heide were used to show differences in the canopy climate dependent on the type of vegetation and vegetation structure. First results show a reduction of temperature and evaporation during the transition from a pine to a beech forest. To verify these results further investigations at canopies must follow.

1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes ENFORCHANGE soll eine Kopplung zwischen dem Waldwachstumsmodell BALANCE (TU München) und dem Atmosphären-Grenzschichtmodell HIRVAC (TU Dresden) vorgenommen werden. Hierbei sollen die Auswirkungen des Bestandes auf das Bestandes-Innenklima anhand der Dübener Heide und der Oberlausitz untersucht werden. Für die Untersuchung des Bestandes-Innenklimas wurden neue Funktionen in das Modell HIRVAC integriert. Zum Testen dieser Funktionen wurde ein Bestand im Kranzberger Forst (Freising bei München) herangezogen. An diesem wird die hohe Variabilität des Klimas im Bestand, in Abhängigkeit der Vegetation, dargestellt.

Im Anschluss wird die Untersuchung des Bestandes-Innenklimas in der Dübener Heide für unterschiedliche Bestände vorgenommen. Anhand einiger ausgesuchter Kernversuchsflächen können die klimatischen Unterschiede zwischen Kiefern-, Misch- und Buchenbeständen aufgezeigt und verglichen werden.

2 Modellbeschreibung HIRVAC

Bei dem Modell HIRVAC handelt es sich um ein 1,5 dimensionales Atmosphärische Grenzschicht Modell (AGS-Modell), dessen Grundversion Mitte der 1980er Jahre an der Humboldt-Universität Berlin entwickelt wurde (HUB, MIX, 1991) und durch MIX et al. (1994), ZIEMANN (1998) und GOLDBERG (1999) erweitert und getestet, sowie durch GOLDBERG und BERNHOFER (2001) auf aktuelle Probleme der Boden-Vegetations-Atmosphären-Wechselwirkungen angewendet.

Das Modell löst die prognostischen Gleichungen für Impuls, Temperatur und Feuchte in 120 Schichten bis zu einer Höhe von 2 km. Zur vertikalen Auflösung des Vegetationsraumes werden bis zu 60 Modellschichten auf die ersten Dekameter verteilt. Zur Schließung des Gleichungssystems wird ein K-Ansatz in Kombination mit der Lösung der Gleichung für die turbulente kinetische Energie (TKE) angewendet (Schließung 1.5facher Ordnung).

Die Vegetation wird durch zusätzliche Quell- und Senkenterme in den Grundgleichungen des Modells berücksichtigt. Diese Terme werden mit Vegetationsparametern parametrisiert und hängen von den Impuls-, Temperatur- und Feuchtegradienten zwischen Vegetationsoberfläche und der Atmosphäre sowie den stomatären und Grenzschichtleitwerten auf der Vegetationsoberfläche ab. Diese Leitwerte werden durch das mechanistische Photosynthesemodell PSN6 (Universität Bayreuth, FALGE et al., 1996) für unterschiedliche Vegetationstypen berechnet und zu jedem Zeitschritt und für jede Modellschicht im Vegetationsraum mit dem Grenzschichtmodell ausgetauscht.

BROOK90 ist ein Simulationsmodell für Bodenwassergehalt, Versickerung und Verdunstung und wurde mit einigen Modifizierungen und Vereinfachungen in das Bodenmodul von HIRVAC übernommen (BAUMS et al., 2004).

3 Standorte Kranzberger Forst und Dübener Heide

In einem ersten Schritt wurde die Vernetzung der Teilprojekte Waldwachstum (BALANCE, TU München) und Bestandes-Innenklima (HIRVAC) anhand eines Untersuchungsgebietes im **Kranzberger Forst (Level II Standort)** bei München getestet. Dieser Buchen-Eichen Mischwald besitzt eine Ausdehnung von ca. 70 * 70 m², in ca. 510 m Höhe ü. NN, mit einer Oberflächenneigung von 4° nach Süden. Hierbei wurden die Bestandesdaten (Blattflächenindex (LAI), Blattflächendichte (LAD), Wuchshöhe, Kronenschlussgrad) für einen Zeitraum von 1994 - 2003 genutzt um die Veränderung und Variabilität des Bestandes-Innenklimas zu beschreiben.

Die LAD, der LAI und die Wuchshöhe wurden aus den Daten der BALANCE Modellierung abgeleitet. Diese Einzelbäumdaten wurden in 25 Flächen von 15 m * 15 m zusammengefasst. Der Kronenschlussgrad wurde anhand der LAD und Baumanzahl bestimmt.

Die Entwicklung der Vegetation auf den Einzelflächen verläuft dabei sehr unterschiedlich. Die Wuchshöhe nimmt im Laufe der 10 Jahre zu, wobei in der zweiten Hälfte der Periode der stärkste Zuwachs zu beobachten ist (Abb. 1a). Bei der Entwicklung der LAD sind Zunahmen sowie Abnahmen im Kronen- und im Stammbereich auf den einzelnen Teilflächen zu beobachten. In der Summe nimmt die LAD in diesen 10 Jahren tendenziell ab, was mit dem Absterben kleiner Bäume und beschatteter Äste erklärt wird. Ein Beispiel für die LAD und die Entwicklung dieses Parameters ist in der Abbildung 1b wiedergegeben. Beim LAI sind nur sehr geringe Veränderungen beim gemittelten Verlauf zu beobachten. Hier gleichen sich die Zu- und Abnahmen gegenseitig aus. Die Variabilität auf der Untersuchungsfläche reicht von ca. 1.5 bis 4, wobei der Mittelwert bei ca. 2.6 liegt (Abb. 1c).

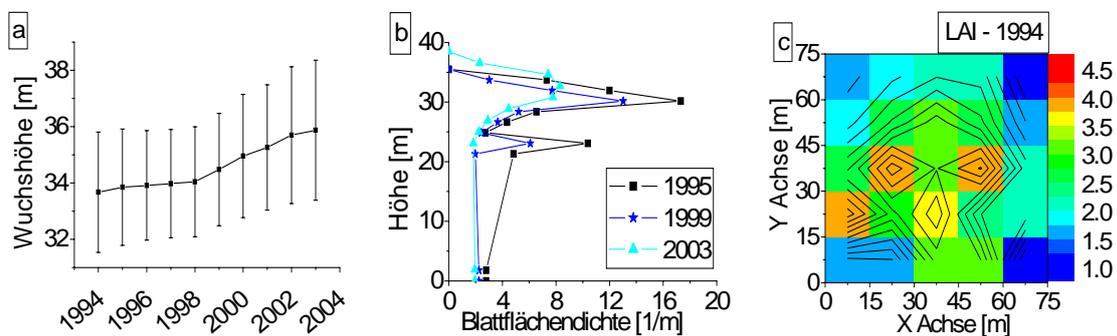


Abb. 1: Mittlere Wuchshöhe und Standardabweichung von 1994 - 2003 (a), Entwicklung der LAD für eine Flächen x-y (22.5m; 52.5m) (b) und des LAI für alle Teilflächen 1994 (c)

Fig. 1: Middle canopy height and standard deviation from 1994 - 2003 (a), development of the LAD for one subarea x-y (22.5m; 52.5m) (b) and LAI of all subareas 1994 (c)

Für die ersten Untersuchungen im Gebiet **Dübener Heide** liegen Bestandesdaten der Landesforstverwaltungen aus Sachsen und Sachsen-Anhalt vor. Von den 12 vom Projektverbund ausgewählten Kernversuchsflächen konnten anhand der vorhandenen Daten 7 Standorte in der

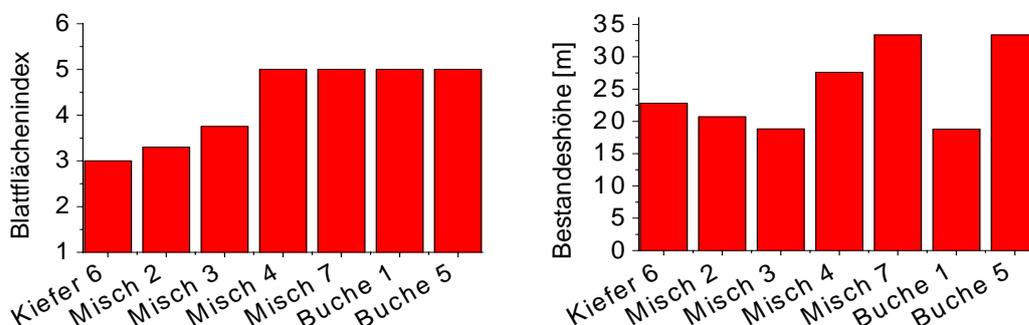


Abb. 2 und 3: LAI und Bestandeshöhe für sieben Kernversuchsflächen der Dübener Heide

Fig. 2 and 3: LAI and canopy height for seven sample area of the Dübener Heide

Dübener Heide identifiziert werden. Diese befinden sich in einer Höhe von 80 bis 150 m ü. NN, wobei das Alter der Bestände zwischen 60 und 200 Jahren schwankt. Weitere Angaben wurden zu Bestandesart, Wuchshöhe (Abb. 3) und Kronenschluss gefunden. Daten von LAI (Abb. 2) und LAD mussten aus der Literatur und angegebenen Bonitäten abgeleitet werden.

Für die Modellierung mit HIRVAC standen somit ein Kiefern-, zwei Buchen- und vier Mischstandorte zu Verfügung. Für die Mischwälder wurde eine Trennung der Bestände vorgenommen und unabhängig voneinander modelliert. Im Anschluss wurden die Ergebnisse, in Abhängigkeit ihrer Flächenanteile, gemittelt.

4 Ergebnisse und Auswertung vom Kranzberger Forst und Dübener Heide

Die modellierte **Verdunstung** im **Kranzberger Forst** variiert auf der Untersuchungsfläche von ca. 2.5 mm – 5 mm (Abb. 4). Der Mittelwert für einen wolkenfreien Julitag sinkt dabei von 3.5 mm (1994) auf 3.2 mm (2003). Die Abnahme der Verdunstung geht einher mit der Reduzierung der LAD und vom Kronenschlussgrad. Hier wird zum einen die Energieumsatzfläche im Kronenraum reduziert, zum anderen kann auch mehr Strahlung in den Bestand eindringen. Diese beiden Parameter kompensieren sich gegenseitig, wodurch es nur zu einer geringen Veränderung der Verdunstung kommt. Der gleich bleibende LAI hat keine Auswirkungen auf die Veränderung der Verdunstung.

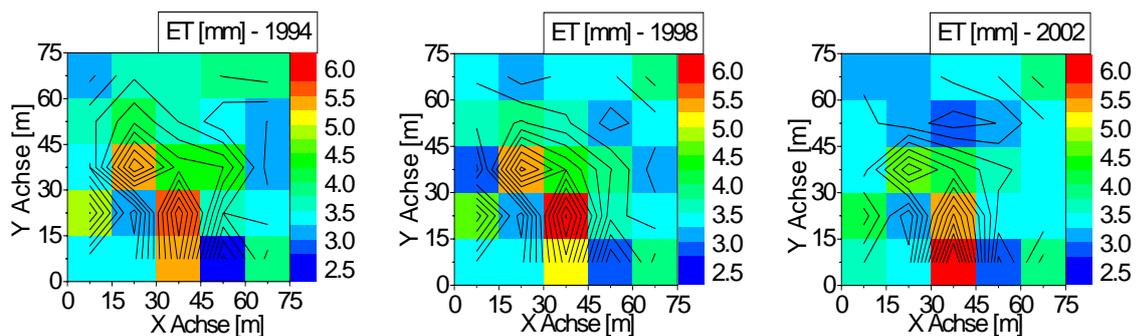


Abb. 4: Verdunstung eines wolkenfreien Julitages für 1994, 1998 und 2002 (Kranzberger Forst)

Fig. 4: Evaporation of a cloudless day in July for 1994, 1998 and 2002 (Kranzberger Forst)

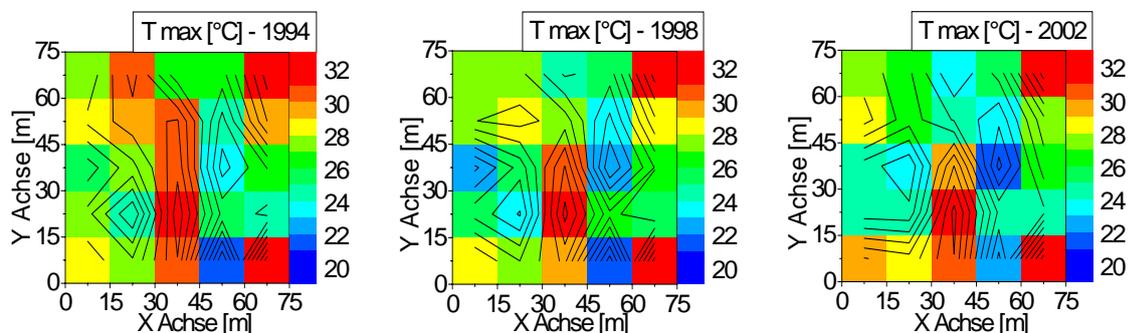


Abb. 5: Maximalen Temperatur eines wolkenfreien Julitages für 1994, 1998 und 2002 (Kranzberger Forst)

Fig. 5: Maximum temperature of a cloudless day in July for 1994, 1998 and 2002 (Kranzberger Forst)

Die Werte der **maximalen Temperatur** auf den einzelnen Zellen reichen etwa von etwa 22 bis 32 °C (Abb. 5). Die durchschnittliche Temperaturabnahme beträgt 1,5 °C, von 27,5 °C auf 26 °C in den Jahren 1994 bis 2003. Diese Werte stimmen sehr gut mit den gemittelten Messwerten aus den Jahren 1999 bis 2003 überein.

Es ist anzumerken, dass zwischen den einzelnen Teilflächen kein Austausch der jeweiligen Größen besteht, da das benutzte Modell nur in einer Dimension modelliert.

Für die Untersuchung der Bestände der **Dübener Heide** wurde in einem ersten Schritt das Bestandes-Innenklimas der Kernversuchsflächen für einen wolkenfreien Tag Anfang Juli simuliert. Als Randwerte für HIRVAC wurde ein geostrophischer Wind von 10 m/s und ein Matrixpotential von ca. -300 kPa angenommen.

In der Abbildung 6 ist die Verdunstung aller 7 Standorte wiedergegeben. Aufgrund der ähnlichen Lage und Meteorologie liegen die erzielten Ergebnisse nicht weit auseinander. Sie reichen von knapp 4 mm bis ca. 5.5 mm. So besitzen die beiden Buchenbestände trotz deutlicher Höhenunterschiede (Abb. 3) fast identische Verdunstungen. Am deutlichsten weichen die Werte vom Standort 7 (Buchen-Eichen-Mischwald) und vom Kiefernbestand ab. Die geringe Wuchshöhe und der niedrige LAI beim Kiefernbestand (Abb. 2) sorgen für eine gute Einstrahlung sowie für einen guten Luftmassenaustausch im Bestand, wobei der Boden für einen ausreichend Nachschub an Feuchtigkeit sorgt. Der Buchen-Eichen-Mischbestand sorgt mit seiner Wuchshöhe für eine verstärkte Beschattung und eine deutliche Abnahme des Windes im Bestand. Als Ergebnis besitzt dieser die geringste Verdunstung. Bei den restlichen Beständen liegen die Werte der Verdunstung sehr nah beieinander.

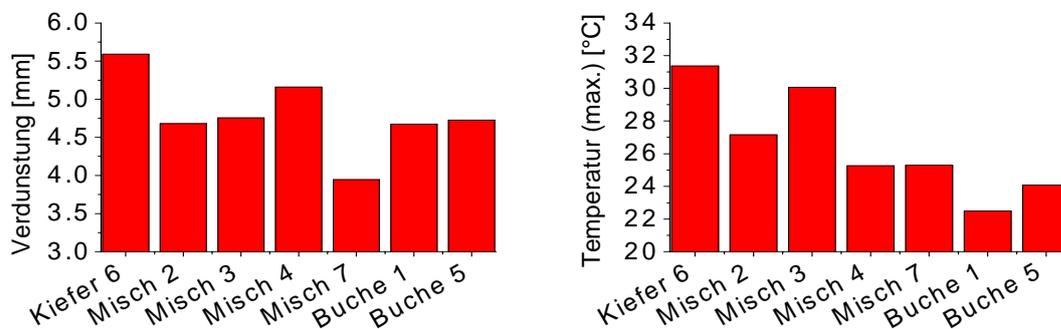


Abb. 6 und 7: Verdunstung und maximalen Temperatur aller 7 Standorte (Dübener Heide)

Fig. 6 and 7: Evaporation and maximum temperature of all 7 locations (Dübener Heide)

In der Abbildung 7 sind die maximalen Temperaturen der hier vorgestellten Bestände wiedergegeben. Der Kiefernbestand besitzt die höchsten Temperaturen, welche im Maximum bis ca. 31 °C reichen. Auch hier liegt die Begründung in der niedrigen und lockeren Vegetation, welche einen hohen Anteil an Strahlung in den Bestand lassen. Die geringste maximale Temperatur ist in dem Buchenbestand 1 zu beobachten. Hier liegen die Werte bei ca. 23.5 °C. Die Ursache hierfür liegt beim Buchenbestand in der geringen Wuchshöhe und dem dazugehörigen hohem LAI. Dadurch konzentriert sich die Vegetation auf sehr geringen Raum und sorgt so für eine intensivere Beschattung des eigenen Bestandes. Die Temperaturen der Mischbestände orientieren sich zwischen den Reinbeständen von Kiefer und Buche.

5 Schlussfolgerungen

Im Testbestand Kranzberger Forst lässt sich sehr gut die hohe Variabilität des Bestandes-Innenklimas beobachten. Die Unterschiede der Vegetation bei LAI, LAD, Kronenschlussgrad und Wuchshöhe haben in erster Linie Unterschiede bei der Einstrahlung und dem Turbulenzregime zur Folge. Hieraus ergeben sich die Differenzen in den Ergebnissen von Verdunstung und Temperatur. Bei der Verdunstung variieren die Werte zwischen bei 3 und 5 mm und bei der Temperatur sind Unterschiede von 10 °C zu beobachten. Aufgrund des nicht stattfindenden Austauschs von Energie und Stoffen zwischen den einzelnen Teilflächen, sind die Werte nur als Richtlinien zu verstehen. Sie zeigen aber wie unterschiedlich das Bestandes-Innenklima, besonders im unteren Bestandesbereich, aufgrund der Bestandesstruktur ausfallen kann.

Bei den Kernversuchsflächen in der Dübener Heide sind deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten zu beobachten. Der Kiefernbestand lässt mehr Energie (Strahlung) durch die Krone, wodurch mehr Strahlung in fühlbare und latente Wärme umgewandelt werden kann, was eine stärkere Erwärmung und Verdunstung zur Folge hat. Im Buchenbestand sorgt die Laubkrone für eine effektive Abschirmung vor Sonneneinstrahlung. Die geringere Energie sorgt dabei für geringere und ausgeglichene Wärmeströme, Temperaturen und Verdunstung. Die Mischbestände stellen einen Übergang zwischen diesen beiden Formen dar. In Abhängigkeit der Art (Laub- oder Nadel-Laubmischwald) und Mischanteil sind die Ergebnisse mehr zu Kiefern- oder Buchenbestand verschoben.

Unter den zu erwartenden klimatischen Bedingungen im Bereich der Dübener Heide (höherer Temperaturen und geringerer Niederschlag, IPCC) führt der Buchen- bzw. Buchen Mischbestand zu ausgeglicheneren Bestandes-innenklimatischen Bedingungen. Die geringere Einstrahlung im Buchenbestand führt zu geringeren Temperaturen und Verdunstungen, was sich positiv auf den Wasserhaushalt auswirkt.

Weiterführende Arbeiten zur Bestimmung des Bestandes-Innenklimas werden an modellierten Beständen (BALANCE, TU München) aus der Dübener Heide und der Oberlausitz durchgeführt.

Bedanken möchten wir uns bei Dr. Irrgang und Herrn Sonnemann vom Landesforstpräsidium Sachsen für die Bereitstellung der Forsteinrichtungsdaten sowie Dr. Rötzer und Herr Moshammer für Daten vom Level II Standort Kranzberger Forst (TU München).

6 Literatur

- BAUMS, A.-B., GOLDBERG, V., BERNHOFER, CH., 2004: Upgrading the Coupled Vegetation Boundary Layer Model HIRVAC by Including New Soil Water and Interception Modules. Submitted to Meteorologische Zeitschrift.
- FALGE, E., GRABER, W., SIEGWOLF, R. UND TENHUNEN, J. D., 1996: A model of the gas exchange response of *Picea abies* to habitat conditions. - *Trees*10, 277-287.
- GOLDBERG, V., 1999: Zur Regionalisierung des Klimas in den Hochlagen des Osterzgebirges unter Berücksichtigung des Einflusses von Wäldern. - *Tharandter Klimaprotokolle*, Band 2.
- GOLDBERG, V., BERNHOFER, CH., 2001: Quantifying the coupling degree between land surface and the atmospheric boundary layer with the coupled vegetation-atmosphere model HIRVAC. - *Annales Geophysicae*, 19, 581-587.
- MIX, W., 1991: Grenzschichtmodelle für die Umweltüberwachung. - *Meteorol. Rdsch.* 44: 43-55.

MIX, W., GOLDBERG, V., BERNHARDT, K. H., 1994: Numerical experiments with different approaches for boundary layer modelling under large-area forest canopy conditions. - Meteorol. Z. 3: 187-192.

ZIEMANN, A., 1998: Numerical simulation of meteorological quantities in and above forest canopies. - Meteorol. Zeitschrift, (N.F.) 7, 120-128.

Anschrift des Autoren

Björn Fischer, Dr. Valery Goldberg, Prof. Dr. Christian Bernhofer, TU Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur für Meteorologie, Piennner Str. 23, 01737 Tharandt

Kohlenstoffflüsse eines Kiefernwaldes bei temporärer Trockenheit

Jutta Holst, Dirk Schindler, Lutz Jaeger und Helmut Mayer

Meteorologisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Zusammenfassung

Die prognostizierten Klimaänderungen haben neben dem Anstieg der Lufttemperatur aufgrund der Verringerung der Niederschläge in der Vegetationszeit eine Verschlechterung der Wachstumsbedingungen für Pflanzen zur Folge. Auswirkungen sommerlicher Trockenheit auf die turbulenten Flüsse latenter Wärme und Kohlendioxid werden an der Forstmeteorologischen Messstelle Hartheim (südlicher Oberrhein) des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg untersucht. Es konnte eine deutliche Reduzierung der physiologischen Aktivität bei Trockenheit beobachtet werden. Diese führt in extremen Fällen sogar dazu, dass der Kiefernwald auch auf Monatsbasis als CO₂-Quelle fungiert (z.B. August 2003, Juli 2006).

Carbon fluxes of a Scots pine forest under the influence of temporary drought

Abstract

The expected climate change entails besides the increase of air temperature a degradation of the growth conditions for plants due to the decrease of the precipitation totals in the vegetation period. Consequences of summer droughts for the turbulent fluxes of latent heat and carbon dioxide are investigated at the Forest Meteorological Site Hartheim (southern Upper Rhine plain) of the Meteorological Institute of the University of Freiburg. During dry periods, a distinct decrease in physiological activity could be observed. During extreme drought events this leads to the fact that the Scots pine forest functions as a CO₂ source even on a monthly basis (e.g. August 2003, July 2006).

1. Einleitung

Aktuelle regionale Klimasimulationsmodelle prognostizieren für Mitteleuropa und damit auch für den Oberrheingraben neben steigenden Lufttemperaturen auch häufigere, länger andauernde Trockenperioden im Sommer. Das durch die Klimaänderung vergrößerte Energieangebot an der Erdoberfläche kann zu einer erhöhten Verdunstung führen. Durch die Kombination von potenziell verdunstungssteigernden klimatischen Randbedingungen und verdunstungshemmenden hydrologischen Zuständen wird die Wasserverfügbarkeit zu einem Stressfaktor für Pflanzen.

Die Limitierung der Wasserverfügbarkeit hat neben anderen Prozessen Einfluss auf Wachstum und Vitalität von Ökosystemen. Die genauen Prozesse sind bisher nur ansatzweise verstanden. Die Klimaänderung hat nicht nur Konsequenzen für die Biomassenproduktion und damit den Ertrag, sondern beeinflusst auch die CO₂-Senkenstärke von anthropogen genutzten Agroökosystemen und von Wäldern.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, den Wasserhaushalt und den CO₂-Konsum von C3- und C4-Pflanzen auf Trockenstandorten nach verschiedenen Methoden interdisziplinär zu analysieren, um zukünftige, klimaabhängige Rahmenbedingungen für Wachstum und Vitalität der betrachteten Ökosysteme zu charakterisieren sowie mögliche land- und forsthydrologische Konsequenzen der Wirkung von Klimaveränderungen zu quantifizieren.

2. Methodik

Seit Juli 2004 werden an der Forstmeteorologischen Messstelle Hartheim des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg, ca. 20 km südwestlich von Freiburg, kontinuierlich die Flüsse fühlbarer und latenter Wärme sowie von Kohlendioxid mittels der EC-Methode (CSAT3/Campbell sowie Li7500/LiCOR) in 1.2-facher Bestandeshöhe erfasst. Die Messstelle ist überwiegend mit *Pinus sylvestris* L. bestockt, die mittlere Bestandeshöhe betrug im Jahr 2006 bei einem mittleren Brusthöhendurchmesser von 18.93 cm 15.4 m. Die Bestandesdichte liegt aktuell bei 800 Bäumen pro Hektar, der projizierte Pflanzenflächenindex PAI betrug im Jahr 2005 $1.9 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Zur Berechnung der Flüsse wurden die Rohdaten des Ultraschallanemometers matrixkalibriert und in Hauptwindrichtung gedreht. Des Weiteren wurden die vorgeschlagenen Korrekturen von MOORE (1986, Sensorkopfseparation und Spektralkorrektur), SCHOTANUS et al. (1983, virtuelle Temperatur) sowie WEBB et al. (1980, Dichteschwankungen) angewendet. Um Zeitpunkte mit möglichen Fehlmessungen des Gasanalysators durch Niederschlag oder Betauung der Sensorfelder auszuschließen, wurde die *automatic gain control* des Li7500 verwendet.

3. Ergebnisse

Die Forstmeteorologische Messstelle Hartheim ist von regelmäßig auftretender sommerlicher Trockenheit betroffen. In extremen Fällen wie im Sommer 2003 oder im Juli 2006 steht den Kiefern über mehrere Wochen kein oder nur eine sehr geringe Menge an Wasser zur Verfügung. Im Rahmen der Klimaänderung ist damit zu rechnen, dass solche Situationen in Zukunft häufiger auftreten werden.

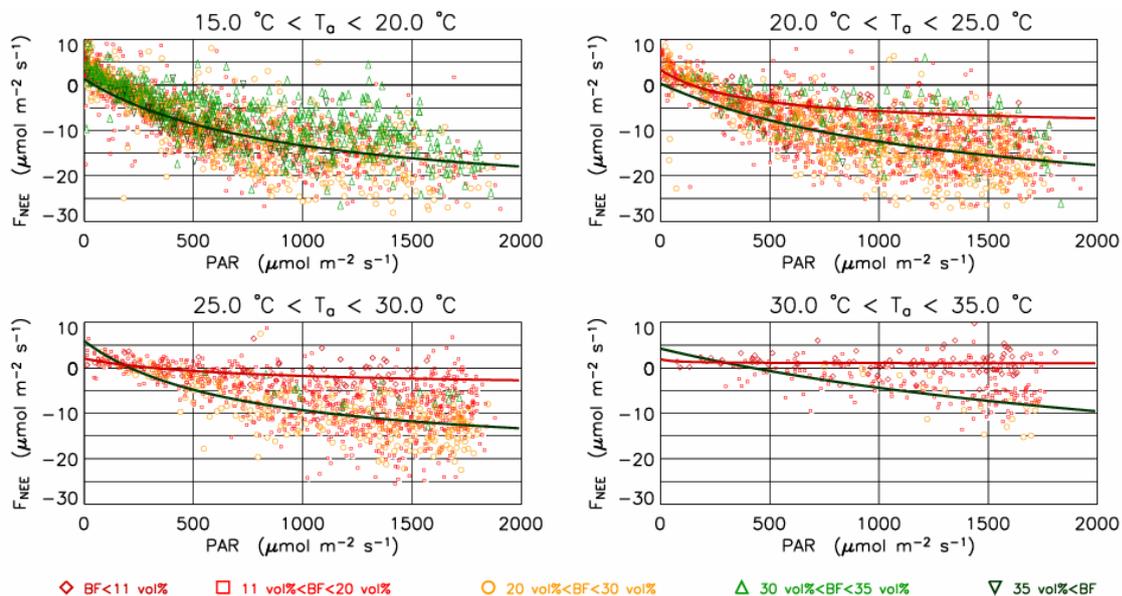


Abb. 1: Zusammenhang zwischen photosynthetisch aktiver Strahlung und CO_2 -Fluss für verschiedene Lufttemperaturklassen und verschiedene Bodenfeuchtereime. Die Ausgleichskurven wurden nach Michaelis und Menten (in Falge et al., 2001) für Bodenfeuchtwerte größer 12 vol% und solche kleiner 11 vol% berechnet

Fig. 1: Connection between carbon flux and photon flux densities for different classes of air temperature and soil moisture. Curves according to Michaelis and Menten (in Falge et al., 2001) have been calculated for soilmoisture above 12 vol% and below 11 vol%

Die Limitierung des pflanzenverfügbaren Wassers hat direkte Auswirkungen auf die physiologische Aktivität der Kiefern. In Abbildung 1 ist der CO_2 -Fluss F_{NEE} in Abhängigkeit zur photosynthetisch aktiven Strahlung PAR für verschiedene Lufttemperaturklassen aufgetragen. Regime unterschiedlicher Bodenfeuchte BF sind farblich bzw. mit Symbolen gekennzeichnet. Unterhalb des permanenten Welkepunktes zeigt die Photosyntheserate keinen Zusammenhang mehr mit der photosynthetisch aktiven Strahlung auf (Abb. 1): Die Ausgleichskurve nach Michaelis und Menten (FALGE et al. 2001) liegt in diesen Fällen ($\text{BF} < 11 \text{ vol}\%$) beinahe parallel zur x-Achse nahe Null.

Die Berücksichtigung der starken Reduzierung der Photosyntheseaktivität bei Dürre ist von großer Bedeutung bei der Auffüllung von Datenreihen, welche bei Messausfällen oder Verwerfung von Messwerten notwendig wird. Die verwendeten Ausgleichskurven haben einen erheblichen Einfluss auf die Jahressumme des Netto-Ökosystemaustauschs F_{NEE} .

In den Abbildungen 2 und 3 werden die Verhältnisse an der Forstmeteorologischen Messstelle Hartheim in den Jahren 2005 und 2006 gegenüber gestellt. Die beiden Jahre sind durch einen sehr unterschiedlichen Witterungsverlauf gekennzeichnet. Der Winter 2004/2005 war durch niedrige Lufttemperatur (Februar 05: $2.2 \text{ }^\circ\text{C}$ geringer als das langjährige Mittel 1978-2001; Imbery, 2004) und geringe Niederschläge (40-50% des langjährigen Mittels) charakterisiert. Die Vegetationsperiode 2005 hingegen begann mit hohen Niederschlagsraten in den Monaten März bis Mai, so dass bis zu 195% der Niederschlagsmenge des langjährigen Mittels erreicht wurden. Ab Ende Mai setzte sich überwiegend sonniges, niederschlagsarmes Hochdruckwetter mit hoher Lufttemperatur durch. Als Konsequenz nahm die Bodenfeuchte kontinuierlich ab (Abb. 2). Aufgrund regelmäßiger Niederschlagsereignisse lag das Niveau der Bodenfeuchte jedoch nur Anfang September für mehrere Tage am Stück im Bereich des permanenten Welkepunktes.

Die Witterung des Jahres 2006 war durch sehr variable Bedingungen geprägt. Zwei Drittel der Monate waren wärmer als im langjährigen Mittel (1978-2001; IMBERY, 2004), die Monatsmittelwerte der Lufttemperatur der Herbstmonate und des Julis lagen deutlich über denen des langjährigen Mittels. Lediglich das erste Viertel des Jahres sowie der August wiesen Monatsmittelwerte der Lufttemperatur unterhalb des langjährigen Mittels auf. Anfang März (06.03.2006) kam es an der Forstmeteorologischen Messstelle Hartheim aufgrund ergiebiger Schneefälle zu erheblichem Schneebruch. Die Niederschlagsverhältnisse in 2006 waren sehr variabel mit deutlich zu geringen Niederschlagssummen in den Monaten Januar – Februar, Juni - Juli und November – Dezember und deutlich zu hohen Niederschlagssummen in den Monaten März, August und September. Die hohen Niederschlagssummen im Spätsommer führten dazu, dass der Bodenwasserspeicher, der aufgrund der trockenen und heißen Bedingungen im Juli vollständig beinahe vollständig geleert war, bereits Ende August wieder bis zur Feldkapazität aufgefüllt war.

Die unterschiedliche Witterung spiegelt sich auch in den Tagessummen des CO_2 -Flusses sowie der Jahressumme des Netto-Ökosystemaustauschs wieder. Im Jahr 2005 verbleibt die Bodenfeuchte von Anfang Juli bis Mitte Oktober Nahe des Welkepunktes, die regelmäßigen Niederschlagsereignisse während dieser Zeit führen trotz geringer Niederschlagsmengen zu einer weitgehend ausreichenden Wasserversorgung des Bestandes. Nur während kurzer Zeiträume sind die turbulenten Flüsse von latenter Wärme und CO_2 aufgrund der Stomataregulierung der Vegetation reduziert (Ende Juni bzw. Anfang September).

Im Jahr 2006 hingegen führt eine ausgeprägte Hitzeperiode mit sehr geringen Niederschlagsmengen über mehrere Wochen (Mitte Juni bis Ende Juli) im Zusammenhang mit sehr hoher Lufttemperatur zu einer beinahe vollständigen Schließung der Stomata, wodurch der turbulen-

te Strom latenter Wärme auf Werte nahe Null zurückgeht und der Kiefernbestand über mehrere Wochen netto mehr CO₂ abgibt als aufnimmt (Tagesmittelwert des CO₂-Flusses positiv).

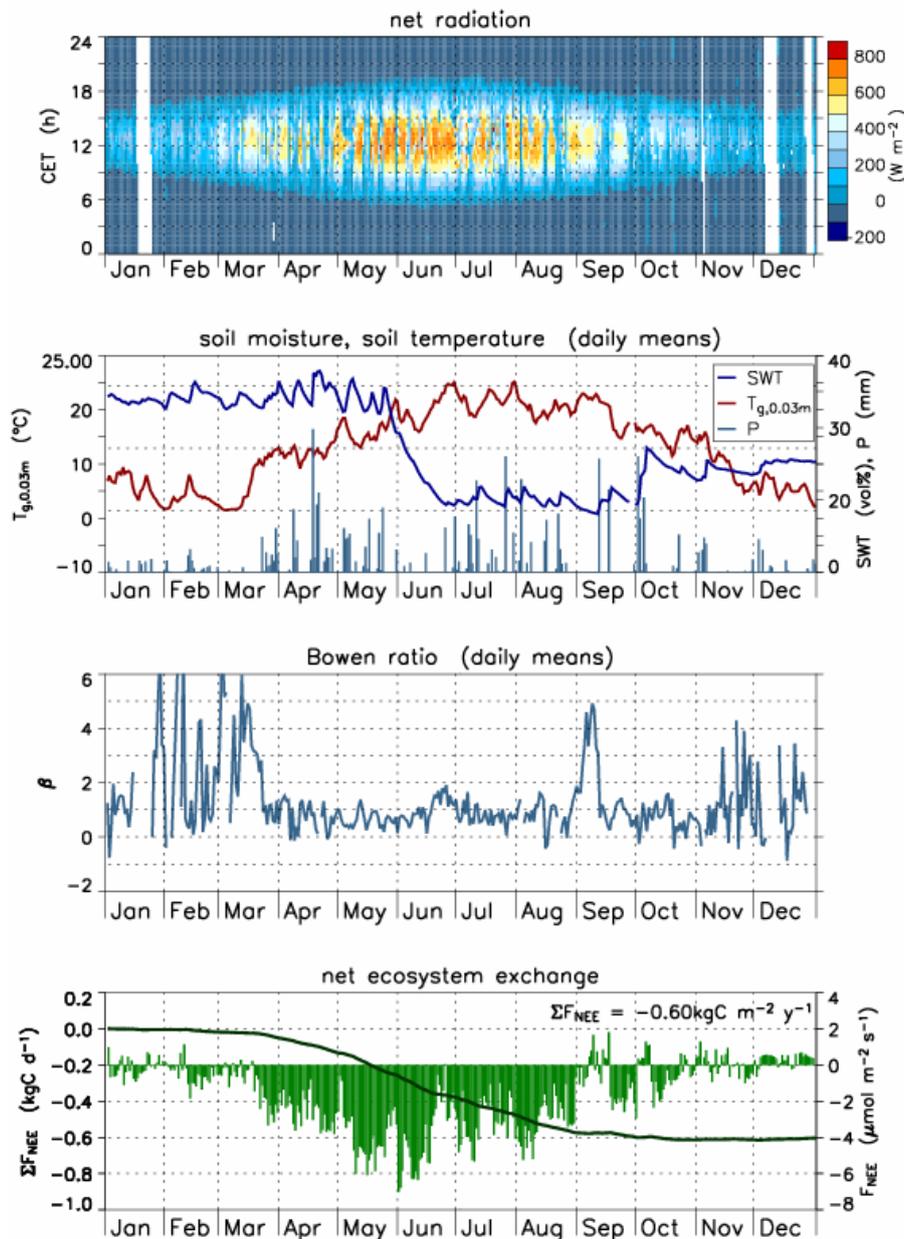


Abb. 2: Verläufe bestandesklimatischer Parameter sowie des Netto-Ökosystemaustauschs im Jahr 2005. Oberste Abbildung: Nettostrahlungsbilanz. Zweite Abbildung von oben: Tagesmittelwerte der Bodenfeuchte (SWT) und der Bodentemperatur (T_g) sowie Tagessummen des Niederschlags (P). Mittlere Abbildung: Tagesmittelwerte über Tagesstunden des Bowen-Verhältnisses (β). Unterste Abbildung: Tagesmittelwerte des turbulenten CO₂-Flusses (F_{NEE} – grüne Balken) sowie kumulierte Summe des Netto-Ökosystemaustauschs (ΣNEE) und Gesamtjahressumme des ΣNEE

Fig. 2: Courses of climatological parameters and net ecosystem exchange during 2005. Top figure: net radiation, 2nd from above: daily means of soil moisture content (SWT), soil temperature (T_g) and daily totals of precipitation (P). 3rd from above: daily means of the Bowen ration (daytime hours). Bottom figure: daily means of the turbulent CO₂ flux (F_{NEE} – green columns), cumulative sum of the net ecosystem exchange (ΣNEE), and the annual total amount of ΣNEE

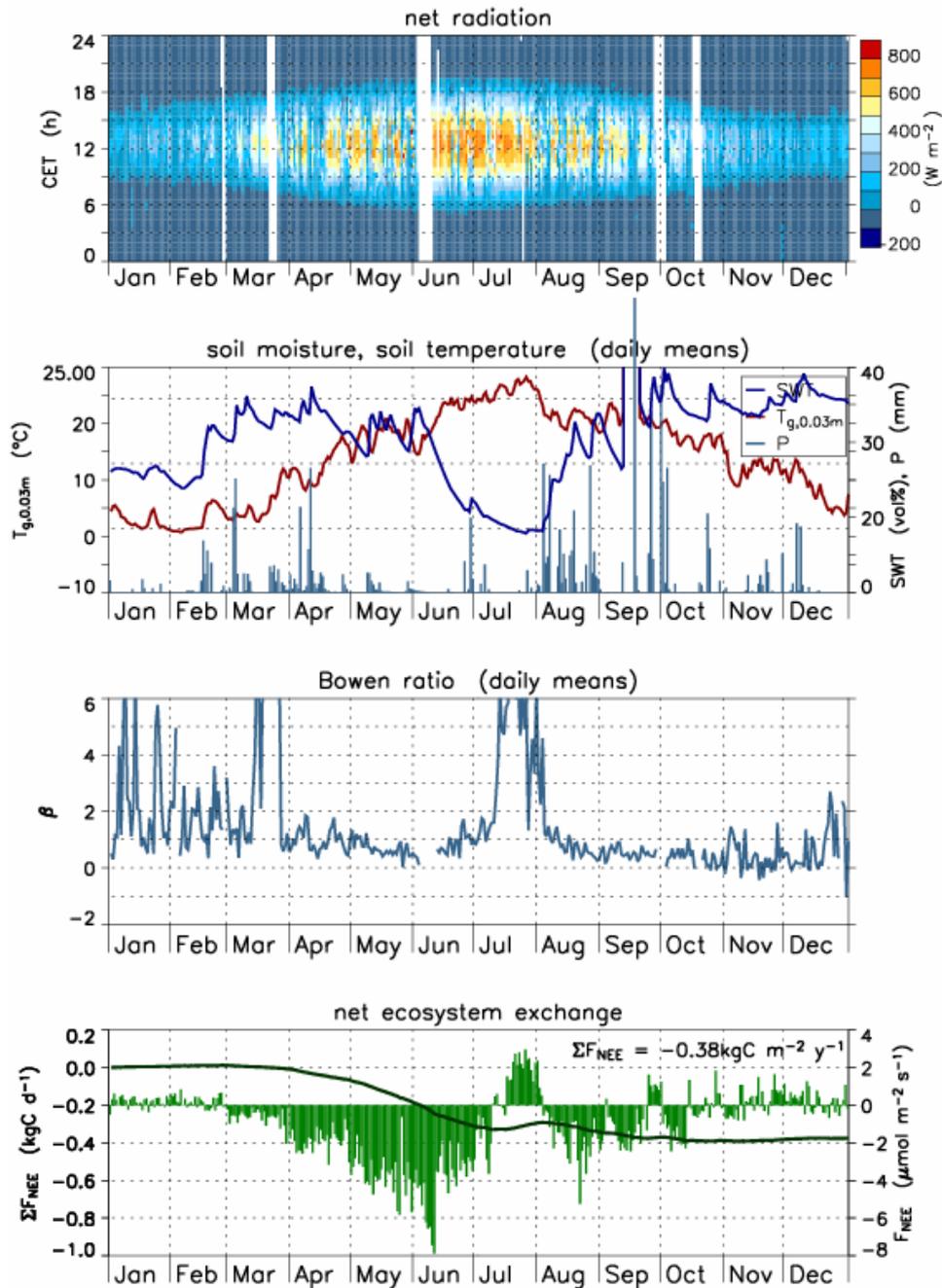


Abb. 3: Verläufe bestandesklimatischer Parameter sowie des Netto-Ökosystemaustauschs im Jahr 2006. Oberste Abbildung: Nettostrahlungsbilanz. Zweite Abbildung von oben: Tagesmittelwerte der Bodenfeuchte (SWT) und der Bodentemperatur (T_g) sowie Tagessummen des Niederschlags (P). Mittlere Abbildung: Tagesmittelwerte über Tagesstunden des Bowen-Verhältnisses (β). Unterste Abbildung: Tagesmittelwerte des turbulenten CO_2 -Flusses (F_{NEE} – grüne Balken) sowie kumulierte Summe des Netto-Ökosystemaustauschs (ΣNEE) und Gesamtjahressumme des ΣNEE

Fig. 3: Courses of climatological parameters and net ecosystem exchange during 2006. Top figure: net radiation, 2nd from above: daily means of soil moisture content (SWT), soil temperature (T_g) and daily totals of precipitation (P). 3rd from above: daily means of the Bowen ration (daytime hours). Bottom figure: daily means of the turbulent CO_2 flux (F_{NEE} – green columns), cumulative sum of the net ecosystem exchange (ΣNEE), and the annual total amount of ΣNEE

Die Jahresbilanz des Netto-Ökosystemaustauschs, welcher sich aus dem turbulenten CO₂-Fluss und dem CO₂-Speicherterm innerhalb des Bestandsvolumen zusammensetzt, lag im Jahr 2005 aufgrund der nur sehr kurzen sommerlichen Trockenheit im Spätsommer (Anfang September) bei -600 gC m⁻²a⁻¹. Die ausgeprägte Trockenheit im Juli 2006 führte zu einer deutlichen Reduzierung der Netto-CO₂-Aufnahme um nahezu 40% (Σ NEE(2006) = -380 gC m⁻²a⁻¹).

4. Schlussfolgerungen

Sommerliche Trockenheit, welche laut aktuellen Klimaprognosen in Zukunft in Mitteleuropa häufiger und länger anhaltend auftreten wird, hat einen wesentlichen Einfluss auf die physiologische Aktivität von Pflanzen. Unterhalb des permanenten Welkepunktes wird die Photosyntheseaktivität nicht mehr durch das Angebot an photosynthetisch aktiver Strahlung gesteuert. Die Verringerung der CO₂-Aufnahme durch die Pflanzen während Trockenphasen hat Konsequenzen für das Konkurrenzvermögen und die CO₂-Senkenstärke der Ökosysteme.

Literaturverzeichnis

- FALGE, E., D. BALDOCCHI, R. OLSON, P. ANTHONI, M. AUBINET, C. BERNHOFER, G. BURBA, R. CEULEMANS, R. CLEMENT, H. DOLMAN, A. GRANIER, P. GROSS, T. GRÜNWARD, D. HOLLINGER, N-O. JENSEN, G. KATUL, P. KERONEN, A. KOWALSKI, C. TA LAI, B.E. LAW, T. MEYERS, J. MONCRIEFF, E. MOORS, J.W. MUNGER, K. PILEGAARD, Ü. RANNIK, C. REBMANN, A. SUYKER, J. TENHUNEN, K. TU, S. VERMA, T. VESALA, K. WILSON, S. WOFSY, 2001: Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. - *Agric. Forest Meteorol.* **107**, 43-69.
- IMBERY, F., 2004: Langjährige Variabilität der aerodynamischen Rauigkeit und Energieflüsse eines Kiefernwaldes in der südlichen Oberrheinebene (Hartheim). Reports of the Meteorological Institute, University of Freiburg, No. **14**, 147S.
- MOORE, C-J., 1986: Frequency response corrections for eddy correlation systems. - *Boundary-Layer Meteorol.* **37**, 17-35.
- SCHOTANUS, P., F.-T.-M. NIEUWSTADT, H.-A.-R. DE BRUIN, 1983: Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. - *Boundary-Layer Meteorol.* **26**, 81-93.
- WEBB E.K., G.I. PEARMAN, R. LEUNING, 1980: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. - *Quart. J. R. Met. Soc.* **106**, 85-100.

Anschrift der Autoren

Dr. Jutta Holst, Dr. Dirk Schindler, Prof. Dr. Lutz Jaeger, Prof. Dr. Helmut Mayer, Meteorologisches Institut, Universität Freiburg, Werderring 10, 79085 Freiburg

Glasscherben als Ursache von Waldbränden?

Tanja Müller¹, Klaus-Peter Wittich² und Wolfgang Durner¹

¹TU Braunschweig, ²DWD Braunschweig

Zusammenfassung

Obwohl in Medienberichten über Waldbrände oft auf die Entzündungsmöglichkeit durch herumliegende Glasscherben oder -flaschen hingewiesen wird, finden sich hierzu in der Fachliteratur kaum Hinweise. Um den Sachverhalt näher zu untersuchen, erfolgten im Sommer 2006 unter optimalen Bedingungen Freilandexperimente mit geeigneten Glasscherben. Mittels Infrarotthermografie wurde die Temperaturentwicklung auf verschiedenen Streumaterialien erfasst. Obwohl im Lichtfleck einer Glasscherbe Oberflächentemperaturen von 300 °C auftraten, entzündete sich die Streu nicht. Die Experimente zeigten, dass eine Entzündung durch Glasscherben im Freiland als unwahrscheinlich angesehen werden kann.

Broken glass as a cause of forest fires?

Abstract

Media articles about forest fires often refer to the possibility of an ignition of the surface litter by glass fragments or bottles lying on the forest floor. Since only few research papers were found about this subject, outdoor experiments were carried out with suitable glass fragments in the summer of 2006. The surface temperature of different fine fuels heated by focussed sunrays was recorded using infrared thermography. Although the surface temperatures could sporadically reach 300 °C, no ignition of the fuel took place. Therefore, under field conditions, an ignition caused by glass fragments seems to be unlikely.

1 Einleitung

Die Meinung, dass Glasscherben oder -flaschen eine Sammellinse darstellen und durch den Brennglaseffekt einen Wald- oder Vegetationsbrand verursachen können, ist in der Öffentlichkeit weit verbreitet. Dieser Annahme widerspricht allerdings die geringe Anzahl bestätigender Untersuchungen in der Fachliteratur.

Versuche mit Glasböden von Bierflaschen führte beispielsweise GEIGER (1933) durch, wobei er zu dem Ergebnis kam, dass keine Entzündung mit ihnen möglich sei. Experimente, die eine Entzündung durch Glas ebenfalls widerlegen, wurden von dem INDEPENDENT FOREST FIRE PROTECTION LABORATORY (1982) durchgeführt. Eine Entzündung durch wassergefüllte Glasgefäße wurde dagegen von FUQUAY & BAUGHMAN (1965) als möglich angesehen.

Aufgrund einer Anfrage der Wochenzeitung "Die Zeit" an den Deutschen Wetterdienst, inwieweit Glas als Zündmöglichkeit für Waldbrände in Frage käme (DRÖSSER 2004), wurden erste, vorläufige Freilandexperimente von WITTICH & LEX (2005) im September 2004 durchgeführt. Mit einem Flaschenboden konnten auf Fichtennadeln Temperaturen von 100 °C erreicht werden, was weit unterhalb der Entzündungstemperatur lag, die für abgestorbenes Pflanzenmaterial bei etwa 300 °C angenommen wird (vgl. VON DEICHMANN, 1957). Weitere Untersuchungen mit einem breiteren Spektrum an Glasscherben und Streuarten wurden als notwendig erachtet. Teilergebnisse einer Diplomarbeit werden nachfolgend vorgestellt.

2 Versuche

In Laborvorversuchen haben sich Flaschenböden als einzige Scherbenteile erwiesen, die wie eine Sammellinse das Licht bündeln.

Die Entzündungsversuche im Freiland fanden an 21 Versuchstagen von Ende April bis Ende Juli auf dem Gelände des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Braunschweig statt. Sie wurden bei nahezu wolkenfreiem Himmel und geringen Windstärken um die Mittagszeit (10:00 bis 14:00 MEZ) durchgeführt. Die höchsten Werte der Globalstrahlung traten im Juni mit etwa 950 W/m^2 auf.

Aus einem Spektrum von 30 Scherben wurden für die Versuche fünf Flaschenböden ausgewählt, die das Licht am stärksten bündelten. Aluminiumschalen wurden mit sechs verschiedenen lufttrockenen Streumaterialien befüllt: Fichtennadeln (*Picea abies*), Kiefernnadeln (*Pinus sylvestris*), Buchenlaub (*Fagus sylvatica*), Gras (*Avenella flexuosa* und *Calamagrostis epigjos*) und Heidekraut (*Calluna vulgaris*). Die Streufeuchten lagen während der Versuchsdurchführung durchschnittlich bei etwa 10% der Trockenmasse. Die Schichtdicken der Streu betragen jeweils etwa 3 cm.

Die an Stativen befestigten Scherben wurden derart zur Sonne und Streuoberfläche ausgerichtet, dass sie eine maximale Lichtkonzentration erzeugten. Der Abstand betrug in der Regel etwa 20 bis 30 cm. Die Temperaturentwicklung auf der Streuoberfläche während der jeweils zehnmütigen Versuchsdauer wurde mit einer Thermografiekamera erfasst, die senkrecht über der Versuchsschale positioniert war (Abb. 1).

Neben Glasscherben fanden auch einzelne Zündversuche mit zylinder- und kugelförmigen Glasgefäßen sowie Lupen (Durchmesser 8,5 und 12,5 cm) statt.



Abb. 1: Versuchsaufbau. Die Glasscherben wurden mithilfe von Stativen derart positioniert, dass sie das Sonnenlicht möglichst scharf auf eine Streuoberfläche konzentrierten; die Oberflächentemperatur der Streu wurde mit einer Thermografiekamera erfasst

Fig. 1: Experimental setup. The glass fragments were positioned with the aid of tripods so that they concentrated the sunlight on the fuel surface in the most intense way; the surface temperature of the fine fuel was recorded by an infrared camera

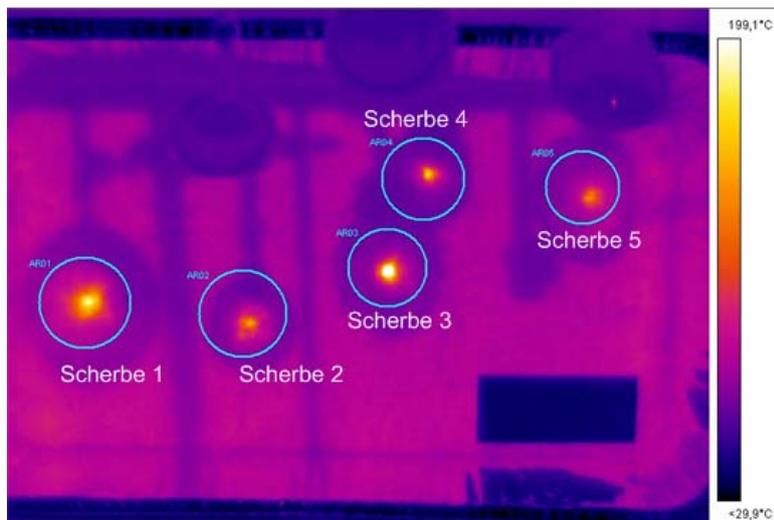


Abb. 2: Infrarotaufnahme der von den Glasscherben erzeugten Lichtflecke

Fig. 2: Infrared image of the light spots caused by glass fragments

3 Ergebnisse

Lediglich mit einem von fünf Flaschenböden (Scherbe Nr. 3) konnten Temperaturen über 200 °C auf allen Streuoberflächen erzeugt werden. Dabei erreichten die Temperaturen auf den Streuarten Fichte und Buche sogar Werte oberhalb von 300 °C (Tab. 1), die jedoch nur in einem sehr kleinen Bereich von 0,2 cm Breite des Lichtfleckes auftraten. Durch den Gang der Sonne bewegte sich der Lichtfleck langsam.

Eine Entzündung von Streumaterial konnte in keinem der etwa 120 Zündversuche beobachtet werden. Als Anzeichen einer thermischen Zersetzung trat lediglich im Lichtfleck der Scherbe Nr. 3 eine Schwarzfärbung einiger Streumaterialien (Fichte, Buche, Gras *Calamagrostis epigejos*) auf (Abb. 3).

Tab. 1: Maximale Oberflächentemperaturen in °C für verschiedene Kombinationen von Scherben und Streuarten *Maximum*

Tab. 1: Surface temperature in °C for different combinations of glass fragments and fine fuels

	Scherbe 3	Scherbe 1	Scherbe 4	Scherbe 5	Scherbe 2
Streuart	Temperatur [°C]				
Fichte	327	199	189	178	170
Buche	306	175	176	148	158
Calamagrostis epigejos	241	137	119	115	122
Kiefer	231	145	129	138	131
Calluna vulgaris	231	141	144	120	124
Avenella flexuosa	217	134	126	137	117



Abb. 3: Schwarzfärbung der Streuoberfläche aufgrund der Lichtfokussierung der Scherbe Nr. 3 auf den Streuarten a) Fichte, b) Buche, c) Gras (Calamagrostis epigejos)

Fig. 3: Charring of the fuel surface caused by the focusing of light by the glass fragment No. 3 on the fine fuels a) spruce, b) beech, c) grass (Calamagrostis epigejos)

Die zeitlichen Verläufe des Temperaturmaximums im Lichtfleck wurden für jede Versuchsvariante Streuart/Scherbe über alle 21 Versuchstage gemittelt. Die mittleren Verläufe zeigen innerhalb der ersten Minuten einen steilen Anstieg und verlaufen danach nahezu auf einem konstanten Niveau (Abb. 4 und 5). Die Temperaturwerte der Einzelversuche können von diesem Plateauwert je nach Streuart unterschiedlich stark abweichen, beispielsweise für die Scherbe Nr. 3 auf der Streuart Fichte um bis zu 100 °C.

Mittlere Verläufe des Temperaturmaximums im Lichtfleck (Streuart: Picea abies)

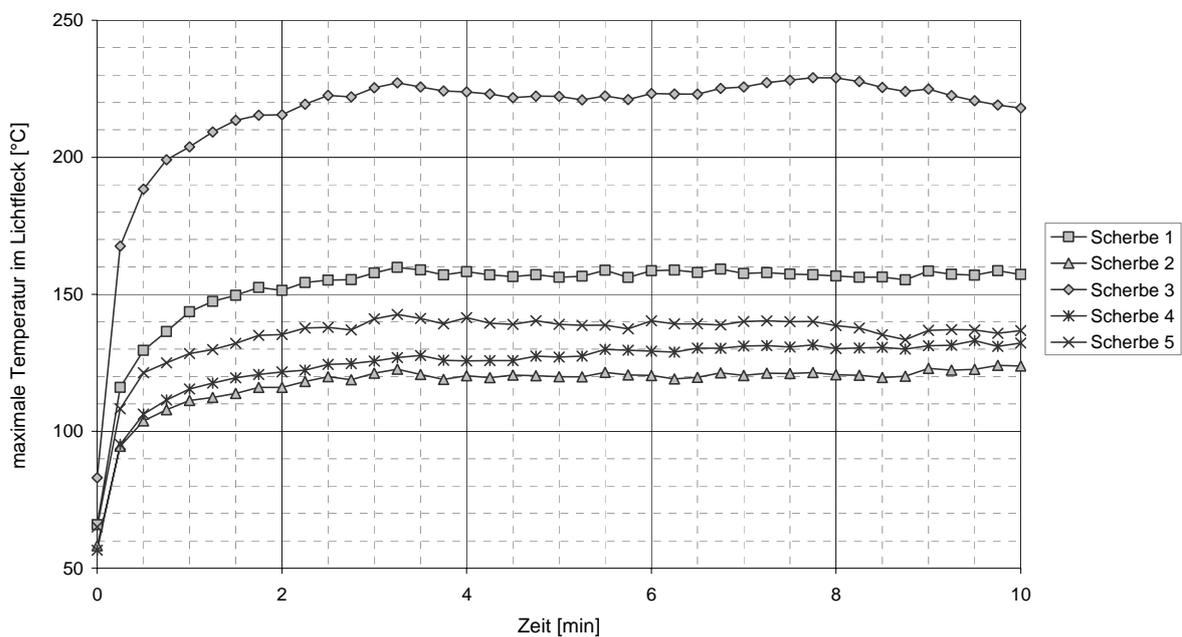


Abb. 4: Durchschnittliche Verläufe der maximalen Oberflächentemperatur in °C im Lichtfleck der verschiedenen Scherben auf der Streuart Fichte; Mittelwerte über 21 Versuchstage

Fig. 4: Average maximum surface temperature in °C in the light spot of different glass fragments on the fine fuel spruce; averaged over 21 experimental days

Mittlere Verläufe des Temperaturmaximums im Lichtfleck (Streuart: *Avenella flexuosa*)

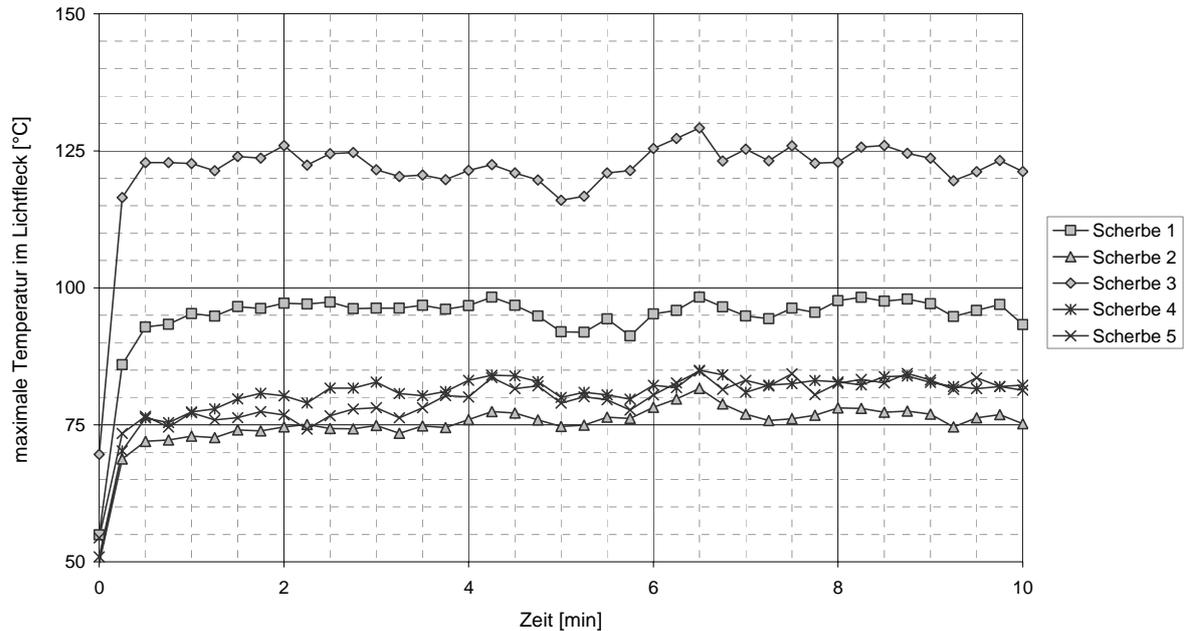


Abb. 5: Durchschnittliche Verläufe der maximalen Oberflächentemperatur in °C im Lichtfleck der verschiedenen Scherben auf der Streuart Gras (*Avenella flexuosa*), Mittelwerte über 21 Versuchstage

Fig. 5: Average maximum of the surface temperature in °C in the light spot of different glass fragments on the fine fuel grass (*Avenella flexuosa*), averaged over 21 experimental days

Eine Konzentration von Licht durch Glasgefäße war nur möglich, wenn diese mit Wasser gefüllt waren. Zylinderförmige Gefäße wie Flaschen, die auf die Streuoberfläche gestellt wurden, erzeugten lediglich Temperaturen um 100 °C. Wassergefüllte, kugelförmige Gefäße (1L-Labormesskolben mit 12,5 cm Durchmesser, Glasvase mit 20 cm Durchmesser) ließen die Temperaturen teilweise auf über 500 °C ansteigen, wobei allerdings weder eine Flammenbildung noch eine anhaltende Verbrennung beobachtet werden konnte.

Eine Lupe mit einem Durchmesser von 12,5 cm verursachte auf der Fichtenstreu Oberflächentemperaturen von 800 bis 1000 °C, eine Lupe mit einem Durchmesser von 8,5 cm Temperaturen um etwa 800 °C. Dabei traten zum Teil kurzzeitige Flammenerscheinungen von wenigen Sekunden Dauer auf. Eine fortschreitende Verbrennung nach Entfernung der Lupen blieb ebenfalls aus.

4 Schlussfolgerungen

Obwohl die Entzündungsversuche unter optimalen Bedingungen, d.h.

- (a) bei sommerlich-trockenen Wetterlagen mit ungehindertem Strahlungseinfall,
- (b) mit lichtbündelnden Flaschenböden,
- (c) mit optimalen lichtfokussierenden Abständen zwischen Glas und Streuoberfläche und
- (d) mit lufttrockenen Streumaterialien

erfolgten, konnte keine Entzündung durch Glasscherben beobachtet werden. Insofern sind Waldbrände, hervorgerufen durch den Brennglaseffekt, als extrem unwahrscheinlich anzusehen.

Da in den Zündversuchen selbst nachweislich hohe Oberflächentemperaturen der Streu, wie in den Versuchen mit Lupen, keine dauerhafte Entzündung hervorriefen, sind weitere Untersuchungen der Bedingungen, unter denen Entzündungen von Streu erfolgen, als sinnvoll zu erachten.

Literaturverzeichnis

DRÖSSER, C., 2004: Stimmt's? Glas unter der Lupe. - Die Zeit. Nr. 39, 16.09.2004 – online: http://www.zeit.de/2004/39/Stimmts_P_39, 28.01.07.

FUQUAY, D.M., R.G BAUGHMAN, 1965: Can glass and metal containers start forest fires? - Fire Control Notes **26** (2), 3-5.

GEIGER, R., 1933: Können herumliegende Bierflaschen einen Waldbrand verursachen? - Forstwissenschaftliches Centralblatt **55** (1933), 523-526.

INDEPENDENT FOREST FIRE PROTECTION LABORATORY, 1982: Bericht über die Untersuchungsergebnisse zur Entstehung von Waldbränden durch weggeworfenes Glas und Glasverpackungen (Original: Omówienie: Wyników badań zmierzających do ustalenia pożarów leśnych od porzuconego szkła i opakowań szklanych). - Sękocin: Independent Forest Fire Protection Laboratory (Raszyn), Forest Research Institute, Warsaw, Poland. unveröffentl. interner Bericht, Übersetzung in Teilen.

VON DEICHMANN, V., 1957: Untersuchungen über die Entzündlichkeit und Brennbarkeit von Bodendecken als Beitrag zu den Grundlagen einer Waldbrandprognose. - Dissertation, Universität Göttingen, Forstliche Fakultät.

WITTICH, K.-P., P. LEX, 2005: Waldbrände durch Glasscherben? - AFZ-DerWald, 12/2005, 625-626.

Anschrift der Autorin

Dipl.-Geoökol. Tanja Müller, Wolfgang Durner, Institut für Geoökologie, Technische Universität Braunschweig, Langer Kamp 19c, 38106 Braunschweig

Dr. Klaus-Peter Wittich, Agrarmeteorologische Forschung, Deutscher Wetterdienst, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

Dynamik der Austauschprozesse von CO₂ und ²²²Radon zwischen Waldboden, Waldbestand und Atmosphäre -

Profilmessung der Kohlendioxidkonzentration im Waldbestand und Messung der Radon-Isotop-Konzentration in Bodennähe als Tracer am Standort Waldstein, WALDATEM 2006

Johannes Lüers¹, Johanna Smaczny¹, Antoine Kies² und Jörg Bareiss³

¹Universität Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie

²Université du Luxembourg, Laboratoire Physique des Radiations

³Universität Trier, Fach Umweltmeteorologie

Zusammenfassung

Das Einrichten einer Dauermessstation zur Messung von Vertikalprofilen der Kohlendioxid- und ²²²Radon-Konzentration an der Station Waldstein Weidenbrunnen im oberfränkischen Fichtelgebirge (50°09' Nord und 11°52' Ost, 775 m ü. NN) gehörte zum Ziel der Messkampagne WALDATEM 2006, die von Juni 2006 bis März 2007 stattgefunden hat. Die CO₂-Profilmessungen in einem 19 m hohen Fichtenbestand erfolgen am dortigen Turm in acht verschiedenen Messhöhen zwischen 3 cm und 33 m und dienen der Untersuchung von Assimilations- und Respirationprozessen sowie des Netto-Ökosystem-Austauschs (Net Ecosystem Exchange, NEE) von Kohlendioxid in einem Fichtenbestand. Zum Verständnis mikrometeorologischer Austauschprozesse (Entkopplung, Inversion und Counter Gradienten) werden neben Kohlendioxid auch ²²²Radon-Isotope als Tracer im Boden und in Bodennähe erfasst. Es werden erste Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen beider Spurengase hinsichtlich saisonaler Variation der Austauschbedingungen zwischen Sommer- und Winterhalbjahr in einem Fichtenbestand einer höheren Mittelgebirgslage präsentiert.

Dynamics of exchange processes of CO₂ and ²²²Radon between forest floor, forest canopy and atmosphere

Abstract

The implementation of a long-term observation station to measure vertical profiles of the carbon dioxide and ²²²Radon concentration at the international FLUXNET site Waldstein Weidenbrunnen (Germany, 50°09' N, 11°52' E, 775 m a.s.l.) was part of the measurement campaign WALDATEM-2006 during June 2006 and March 2007. The new developed CO₂-profile-system attached to the 32 m tall main flux-tower is designed to measure at eight different heights above ground level (0.03 m up to 32 m) within and above a 19 m tall spruce forest simultaneously and to serve for the investigation of assimilation and respiration processes as well as the Net Ecosystem Exchange (NEE) of carbon dioxide in a tall canopy. For a better understanding of micrometeorological exchange processes (decoupling, inversion, counter gradients) ongoing extensive measurements of the ²²²Rn isotope as a tracer in the soil air and the near surface atmosphere in the sub-canopy layer are realized. First results are presented of the ongoing measurements of both trace gases regarding seasonal variation of exchange conditions between summer and winter half year in a European spruce forest of a mid altitude mountain area.

1. Theoretischer Hintergrund

Der granitische Untergrund des Fichtelgebirges begünstigt wegen seiner geologischen Beschaffenheit und Bodenporosität das Vorkommen erhöhter Radonkonzentrationen (^{222}Rn). Die Nutzung von Radon als Tracergas bei der Untersuchung bodennaher Grenzschichten oder der Bestimmung des NEE fand bereits in Arbeiten über tropischen Regenwäldern (Brasilien) Anwendung (MARTENS, 2004). Die Zerfallsreihe des Urans im Gestein und der Bodenschicht ist die einzige Radonquelle; der weitere radioaktive Zerfall (Halbwertszeit 3.825 Tage) die einzige Senke. Zusätzlich verhält sich Radon chemisch inert. Es bietet sich daher als ideales Tracergas bei der Untersuchung bodennaher mikrometeorologischer Austauschprozesse an. Die bodennahe Radonanreicherung unterliegt meteorologisch bedingten jahres- und tageszeitlichen Schwankungen. So behindert Bodenfrost oder eine Eis- und Schneeaufgabe beispielsweise eine Emanation. Kurzzeitige Schwankungen können insbesondere während starker Niederschlagsereignisse auftreten. Dabei werden die Radon-Folgeprodukte (Polonium, Blei, Wismut) bei Regen ausgewaschen oder in Niederschlagstropfen inkorporiert. Zudem kann bei Starkregen die Bodenausgasung erheblich verhindert werden (KAMINSKI, 1999). Einen erheblichen Anteil an der Variation der CO_2 - und Rn-Konzentration am Standort Waldstein wird durch typische atmosphärische Austauschbedingungen in einem hohen Pflanzenbestand (Fichtenforst) beeinflusst (REBMANN et al., 2004; WICHURA et al., 2004; THOMAS and FOKEN, 2005; THOMAS and FOKEN, 2007a und 2007b). Unter entkoppelten Bedingungen (stabile Schichtung) wird der vertikale Luftaustausch zwischen Pflanzenbestand und Atmosphäre verhindert, Kohlendioxid und Radon akkumuliert in Bodennähe. Bei labiler Schichtung (gekoppelter Zustand) kommt es durch Turbulenz zur ausreichenden Durchmischung bis zum Waldboden. Radonmessungen und abgeleitete Parametrisierungen wie sie z.B. von MARTENS (2004) anhand von Radon-Bodenausgasung (S) im Bezug zum Verhältnis von CO_2 - und Rn-Profilen im Bestand vorgestellt wurden,

$$NEE_{Rn} = S \frac{\Delta(\text{CO}_2)}{\Delta(\text{Rn})}$$

können bei der Bestimmung des Netto-Ökosystem-Austausches von Kohlendioxid als zusätzliche Gap-Filling-Strategie dienen, insbesondere dann, wenn Messungen des Kohlendioxidflusses mit Hilfe der Eddy-Kovarianz-Methode aufgrund fehlender atmosphärischer Turbulenz während ruhiger, windstillen Nächten zu einer Unterschätzung der Bilanzierung des NEE_{CO_2} führen (RUPPERT et al., 2006; LEE, 1998; MARTENS, 2004). Auch bei der Quantifizierung advektiver Prozesse im Bestand, die zur Misschätzung v. a. nächtlicher Flusses führen können (AUBINET, 2003), können - durch bodenbiologische Prozesse unbeeinflusste - Radonmessungen hilfreich sein.

2. Gerätetechnik und Methodik

Die Kohlendioxidprofilanlage WACO2P wurde von der Abteilung Mikrometeorologie (RUPPERT, 2005) für das Experiment WALDATEM 2003 (THOMAS et al., 2004) entworfen. Die Steuer-Software wurde in LABVIEW programmiert. Die Messung erfolgt kontinuierlich mit einer Probenahmefrequenz von 2 Hz (LiCor 820). Jede Messhöhe wird eine Minute lang gemessen. Abzüglich einer Spülzeit (Totzeit) von 14.5 Sekunden, ergibt sich pro geschaltetem Ventil ein Datenumfang von 88 Messwerten pro Minute. Durch eine Spülluftpumpe wird über acht einzelne Spülflaschen (2.5 Liter) kontinuierlich Luft im Kreislauf angesaugt und in spezieller an hohe Vegetation angepasste Reihenfolge durch eine elektronische Ventilsteuerung in den Messkreislauf inklusive einer Trocknungsspirale zum Gasanalysator (LiCor 820) geführt. Die Ventilschaltung wird dabei extern durch einen am PC angeschlossenen Mem-IO-Port gesteuert und von einer USV-Anlage vor Stromausfällen gesichert. Als Radon-Messsysteme wurde ein AlphaGuard (Genitron Instruments, Deutschland) in der Messhöhe

20 cm und zwei Radim3a (SMM, Tschechien), Messhöhen 50 cm und 170 cm, eingesetzt. Diese Geräte werden pumpengestützt im Durchflussbetrieb betrieben. Die Messluft wird aufgrund der Feuchtigkeitsanfälligkeit des Verfahrens vorgetrocknet. Die Messung der Radon-Isotop-Konzentration erfolgt bei allen Geräten alphaspektrometrisch. Zur Datenverarbeitung wurden im Vorfeld zwei Programmroutinen (Compaq Visual Fortran) entwickelt, die zum einen eine Messkanaltrennung und Verkettung der Messwerte zu jeweiligen Tagessätzen zulassen und zum anderen minütliche Mittelwerte und Standardabweichungen berechnen. Für weitere statistische Ausarbeitungen (Tiefpassfilter, Autokorrelation, Regression) wurde auf bewerte Programmroutinen zurückgegriffen.

3. Erste Vergleiche CO₂- und Rn-Messungen

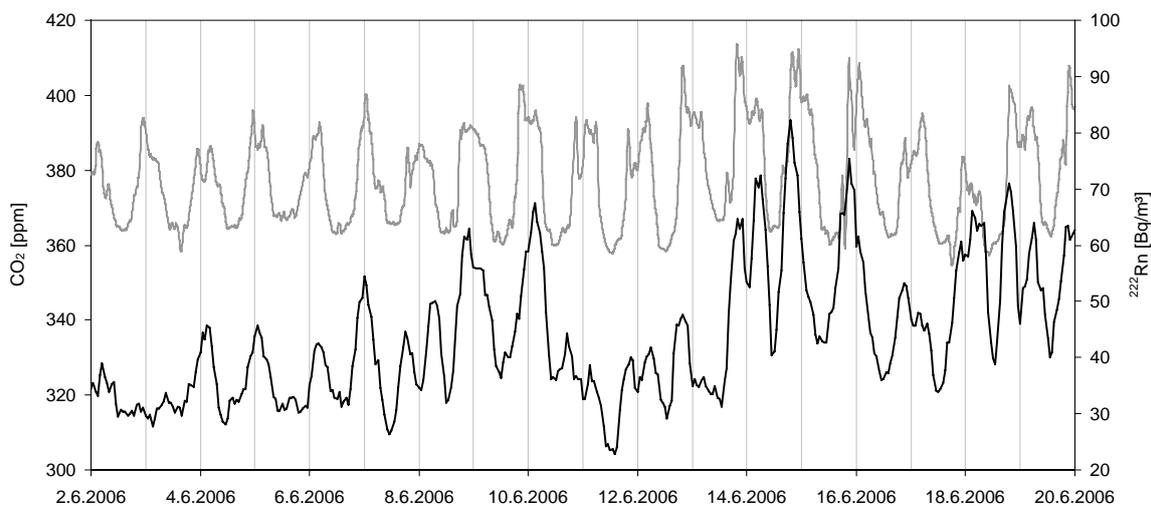


Abb. 1: ²²²Rn (0.20 m, schwarz) und CO₂ (0.25 m, grau) Konzentrationen, Juni 2006, Waldstein-Weidenbrunnen

Fig. 1: ²²²Rn (0.20 m, black) and CO₂ (0.25 m, grey) concentrations, June 2006, Waldstein-Weidenbrunnen

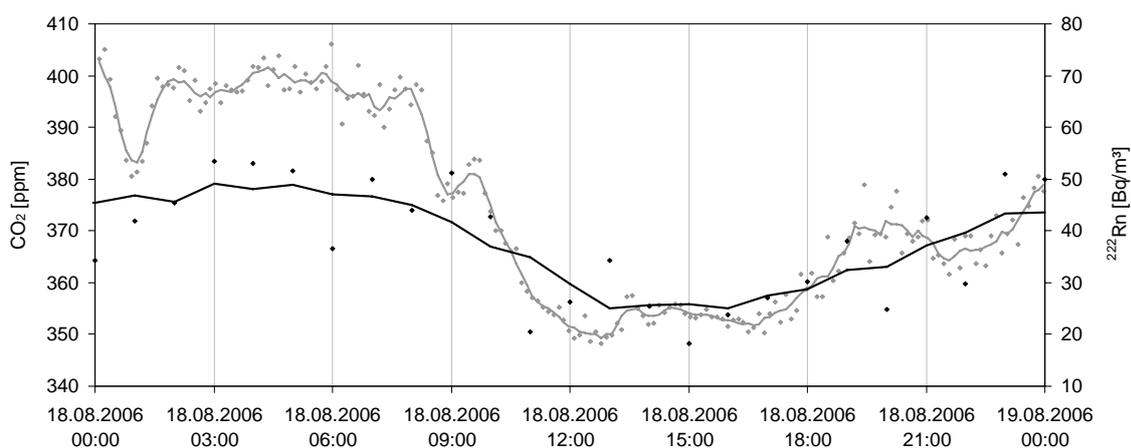


Abb. 2: ²²²Rn (0.20 m, schwarz) und CO₂ (0.25 m, grau) Konzentrationen, Tagesgang, 18.08.06, Waldstein-Weidenbrunnen

Fig. 2: ²²²Rn (0.20 m, black) and CO₂ (0.25 m, grey) concentrations, diurnal variation, 2006-08-18, Waldstein-Weidenbrunnen

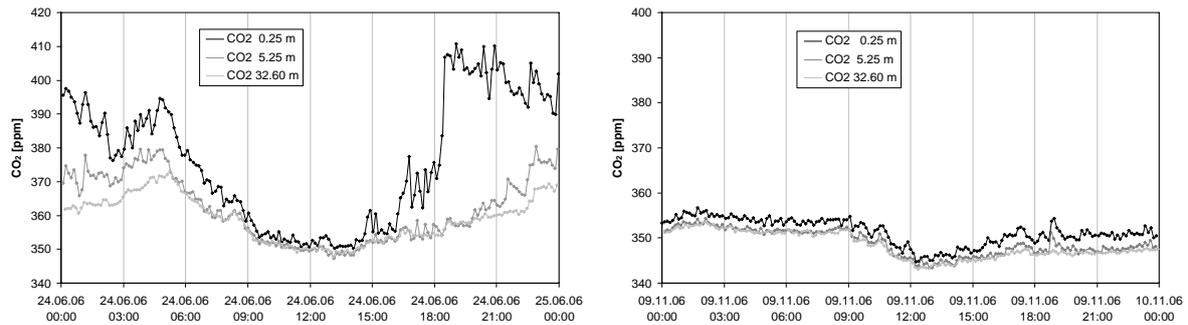


Abb. 3: CO₂-Profilmessungen (0.25 m, schwarz, 5.25 m, grau, 32.60 m hellgrau), Tagesgang, links: Sommer (24.06.06), rechts: Winter (09.11.06), Waldstein-Weidenbrunnen

Fig. 3: CO₂ profile measurements (0.25 m, black, 5.25 m, grey, 32.60 m light grey), diurnal variation, left: summer (06-06-24), right: winter (06-11-09), Waldstein-Weidenbrunnen

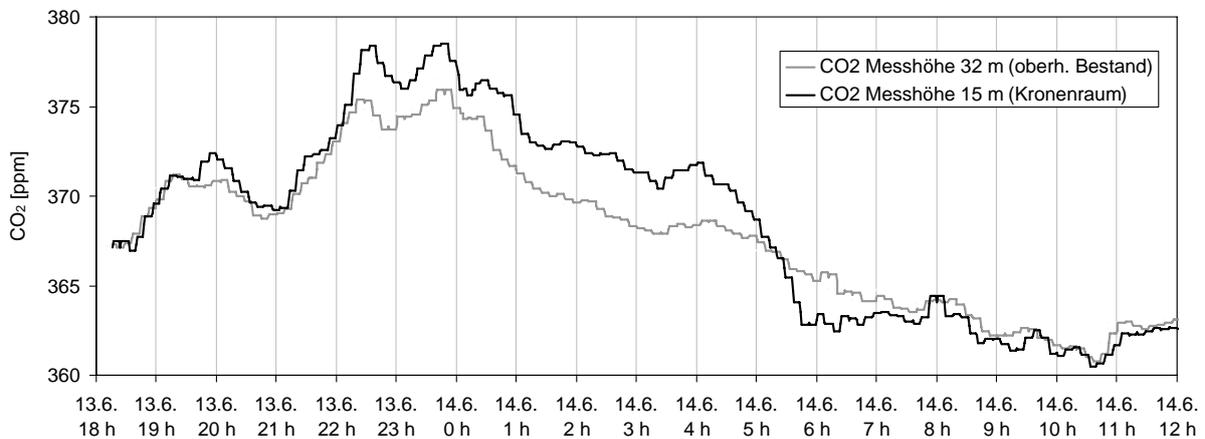


Abb. 4: CO₂-Profilmessungen (15 m, schwarz, Kronenraum; 32 m, grau, oberhalb Bestand) 13./14.06.06

Fig. 4: CO₂- profile measurements (15 m, black, canopy; 32 m, grey, above canopy) 06-06-13/14

Die Variation der CO₂- und Rn-Konzentrationen, gemessen in vergleichbaren Höhen über Grund (25 cm bzw. 20 cm) am Standort Waldstein-Weidenbrunnen für eine ausgewählte Sommerperiode (2.6. bis 20.6.2006, Abb. 1) bzw. einen typischen Sommertag (18.8.2006, Abb. 2) zeigt ausgeprägte – zwischen beiden Spurengasen korrespondierende – Tagesgänge, gesteuert durch bodennahe Anreicherung in der Nacht bei stabilen, entkoppelten Austauschbedingungen und fehlender Assimilation und Nivellierung auf den atmosphärischen Hintergrundwert bzw. die Hintergrund-Emanation bei turbulenter, gekoppelter Durchmischung am Tage und aktiver Assimilation des Pflanzenbestandes.

Obwohl die Entkopplung Bestand/Atmosphäre unter autochthonen Witterungsbedingungen insbesondere in der warmen Jahreshälfte extreme vertikale Gradienten der CO₂-Konzentration hervorruft bleibt jedoch bei komplementärer Witterung ein erheblich geringerer, doch erkennbarer Konzentrationsgradient erhalten (Abb. 3).

Der Tagesgang der CO₂-Konzentration wird im Wesentlichen durch Respirations- und Assimilationsprozesse der Vegetation und des Bodens durch Überlagerung unterschiedlicher atmosphärischer Austauschbedingungen innerhalb und oberhalb des Pflanzenbestandes verursacht. Die Rn-Konzentration wird nicht von biologischer Aktivität beeinflusst, die Variationsursachen reduzieren sich auf meteorologische, bodenphysikalische (und auf geologische) Einflussgrößen. Der Einfluss biologischer Aktivität wird in Abb.5 verdeutlicht. Der Verlauf der CO₂-Konzentration in 15 m ü. G. (mittlerer Kronenraum) zeigt beginnend ab ca. 20 Uhr (13.6.) eine Anreicherung von CO₂ im Kronenraum (Entkopplung, fehlende Assimilation) gegenüber die Messhöhe in 32 Metern (rund 13 m ü. Baumhöhe). Mit beginnender Photosynthese kurz nach Sonnenaufgang (4:30 MEZ) fällt die CO₂-Konzentration rasch bis ca. 7 Uhr morgens auf deutlich unter die der Messhöhe oberhalb des Bestandes in 32 Metern, um sich dann bei durchsetzender Turbulenz gegen Mittag zu nivellieren.

4. Schlussfolgerungen

Parallele Messungen der vertikalen Verteilung der CO₂- und Rn-Konzentration in einem Waldbestand im Rahmen einer Langzeitroutine ermöglicht einerseits klimatologische Studien hinsichtlich tageszeitlicher und jahreszeitliche Schwankungen und deren verursachenden Prozesse und andererseits durch die biologisch inerte Radon-Emanation zahlreiche Möglichkeiten Austausch-, Respirations- und Assimilationsprozesse zu trennen. Diese Frage wird Gegenstand weiterer Forschung am Standort Waldstein-Weidenbrunnen sein.

Literaturverzeichnis

- AUBINET, M., B. HEINESCH, M. YERNAUX, 2002: Horizontal and vertical CO₂ advection in a sloping forest. - *Boundary-Layer Meteorology* **108**, 397-417.
- BALDOCCHI, D. et. al., 2001: FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. - *Bulletin of the American Meteorological Society* **82**, 2415-2434.
- BETTS, A. K., 2004: Coupling between CO₂, water vapor, temperature, and radon and their fluxes in an idealized equilibrium boundary layer over land. - *Geophysical Research* **109**.
- DENMEAD, D. T., E.F. BRADLEY, 1985: Flux-gradient relationships in a forest canopy. - *The forest-atmosphere interaction*, 421-442.
- FOKEN, T., 2006: *Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden*, 2. überarb. u. erw. Aufl., 326 S.
- KAMINSKI, U., S. GILGE, 1999: Die Bedeutung von Radon als Tracer im luftchemischen Meßprogramm der Gaw Globalstation Zugspitze/Hohenpeißenberg. - *Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium*.
- KLEMM, O., H. LANGE, 1999: Trends of air pollution in the Fichtelgebirge Mountains, Bavaria. - *Universität Bayreuth, Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK)*.
- LEE, X., 1998: On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. - *Agricultural and Forest Meteorology* **91**, 39-49.
- MARTENS, C. S., T.J. SHAY, 2004: Radon fluxes in tropical forest ecosystems of Brazilian Amazonia: night-time CO₂ net ecosystem exchange derived from radon and eddy covariance methods. - *Global Change Biology* **10**, 618-629.

- REBMANN, C., P. ANTHONI, E. FALGE, M. GÖCKEDE, M. MANGOLD, J. SUBKE, C. THOMAS, B. WICHURA, E.-D. SCHULZE, J.D. TENHUNEN, and T. FOKEN, 2004: Carbon budget of a spruce forest ecosystem - Ecological Studies, Springer-Verlag, E. Matzner (Ed.), Biogeochemistry of Forested Catchments in a Changing Environment **172**.
- RUPPERT, J; M. MAUDER, C. THOMAS, J. LÜERS: Innovative gap-filling strategy for annual sums of CO₂ net ecosystem exchange. - Agricultural and Forest Meteorology **138**, 5-18.
- RUPPERT, J., 2005: ATEM Software for Atmospheric Turbulent Exchange Measurements using Eddy Covariance and Relaxed Eddy Accumulation Systems + Bayreuth whole-air REA system setup - University of Bayreuth, Department of Micrometeorology, Arbeitsergebnisse Nr. **28**.
- THOMAS, C., T. FOKEN, 2004: Detection of long-term coherent exchange over spruce forest using wavelet analysis. - Theoretical and Applied Climatology **80**, 91-104.
- THOMAS, C; T. FOKEN, 2005: Organised motion in a tall spruce canopy: temporal scales, structure spacing and terrain effects. - Boundary-Layer Meteorology **122**, 123-147.
- THOMAS, C; T. FOKEN, 2005: Flux contribution of coherent structures and its implications for the exchange of energy and matter in a tall spruce canopy - Boundary-Layer Meteorology, DOI 10.1007/s10546-006-9144-7.
- THOMAS, C., J. MAYER, 2005: Analysis of the low-frequency turbulence above tall vegetation using a Doppler sodar. - Boundary-Layer Meteorology **119**, 563-587.
- THOMAS, C., J. RUPPERT, J. LÜERS, J. SCHRÖTER, J-C. MAYER, T. BERTOLINI, 2004: Documentation of the WALDATEM-2003 Experiment, April, 28th to August, 03rd 2003 - University of Bayreuth, Department of Micrometeorology, Arbeitsergebnisse Nr. **24**.
- TRUMBORE, S. E., M. KELLER, S.C. WOFSEY, et al., 1990: Measurements of soil and canopy exchange rates in the Amazon rain forest using radon-222. - Journal of Geophysical Research **95**, 16865-16873.
- WICHURA, B., J. RUPPERT, A.C. DELANY, N. BUCHMANN and T. FOKEN, 2004: Structure of carbon dioxide exchange processes above a spruce forest. - Ecological Studies, Springer-Verlag, E. Matzner (Ed.), Biogeochemistry of Forested Catchments in a Changing Environment **172**.

Anschrift der Autoren

Dr. Johannes Lüers, Johanna Smaczny, Abt. Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, 95440 Bayreuth

Dr. Jörg Bareiss, Universität Trier, Fach Umweltmeteorologie/Klimatologie, D-54286 Trier

Prof. Dr. Antoine Kies, Laboratoire Physique des Radiations, Faculty of Science, Technology and Communication, University of Luxembourg, Campus Limpertsberg, 162a, avenue de la Faïencerie, L-1511 Luxembourg

Konzept zur Erstellung neuer hochaufgelöster Klimakarten für die Wälder Bayerns als Bestandteil eines forstlichen Standortinformationssystems

Lothar Zimmermann¹, Thomas Rötzer², Uwe Hera³, Harald Maier⁴, Christoph Schulz¹ und Christian Kölling¹

¹Bay. Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, ²Waldwachstumskunde-TU München, ³geoKlim, ⁴DWD

Zusammenfassung

Das Klima ist neben dem Boden der entscheidende forstliche Standortsfaktor. Zur klimatischen Charakterisierung von Waldstandorten wurde bisher der Bayerische Klimaatlas (1996) herangezogen, der nun unter Nutzung neu vorliegender Information (Digitales Höhenmodell DGM25, Zeitraum 1971-2000) aktualisiert werden soll. Angesichts des Klimawandels ist eine möglichst genaue Kenntnis der aktuellen Standortseigenschaften nötig, um die Empfindlichkeit der Standorte für zukünftige Veränderungen abzuschätzen und Anpassungsschwerpunkte hinsichtlich Baumarteneignung zu definieren. Diese höher aufgelösten und aktuelleren Klimakarten sind ein wichtiger Baustein um die Wasserhaushaltsansprache in der forstlichen Standortskartierung zu einem objektivierten und modellbasierten Verfahren zu verbessern.

Abstract

Climate is beside soil the decisive factor for forest sites. Till now for characterizing forest sites the Bavarian Climate Atlas (1996) was used. Maps from this atlas will now be updated with new information (digital elevation model DGM25, time series 1971-2000). Before the background of climate change, knowledge of the actual site properties is essential, in order to determine the sensitivity of sites for future changes and to define adaptation foci for tree species selection. These highly resolved and more up-to-date climate maps are an important modul to improve water budget classification in forest site mapping with an objective and model-based approach.

Problemstellung

Das Klima ist neben dem Boden der entscheidende forstliche Standortsfaktor. Zur klimatischen Charakterisierung von Waldorten wurde bisher der Bayerische Klimaatlas (ENDERS ET AL., 1996) herangezogen. Die Karten arbeiten mit durchschnittlichen Klimadaten aus den Zeiträumen 1951 bis 1980 (Temperatur) bzw. 1961 bis 1990 (Niederschlag) und mit einer räumliche Auflösung von 400 m x 400 m. Die Werte sind in groben Klassen wiedergegeben. Diese Art der Darstellung (grobes Raster, weite Klassen) lässt eine Verwendung des Atlas nur auf der größten Maßstabsebene zu (kleiner als 1: 200 000). Die Verwendung von 1°C-Klassen bei der Jahrestemperatur (Abb. 1) führt beispielsweise dazu, dass 63 % der Landesfläche Bayerns in die Klasse 7-8 °C fallen. Innerhalb dieser Klasse kann bislang nicht weiter differenziert werden. Die räumliche Auflösung mit einem Raster von 400 x 400 m führt auf niedrigeren Maßstabsebenen zu einer unbefriedigenden Darstellung des Geländeform und aller daraus abgeleiteten klimatischen Parameter (Abb. 3 u. 4). Ein weiterer Nachteil des Klimaatlas ist seine mangelnde Aktualität. Es fehlen zwei warme Dekaden (1981-1990 und 1991-2000) in denen sich der Klimawandel möglicherweise bereits abzeichnet.

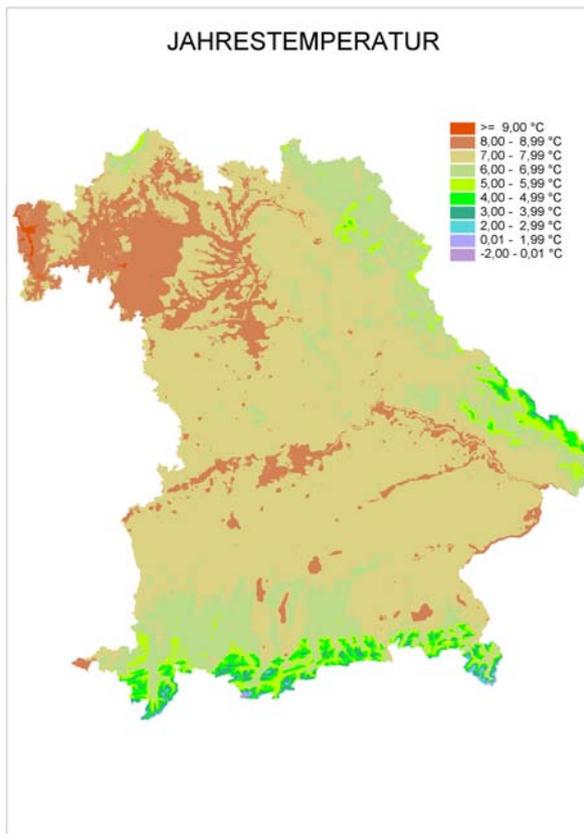


Abb. 1: Jahrestemperatur nach dem Klimaatlas für Bayern (ENDERS ET AL., 1996). Die Klasse 7-7,99 °C nimmt 63% der gesamten Landesfläche ein

Fig. 1: Annual air temperature acc. To the climate atlas of Bavaria (ENDERS et al., 1996). The class 7 to 7.99°C covers 63% of total state area

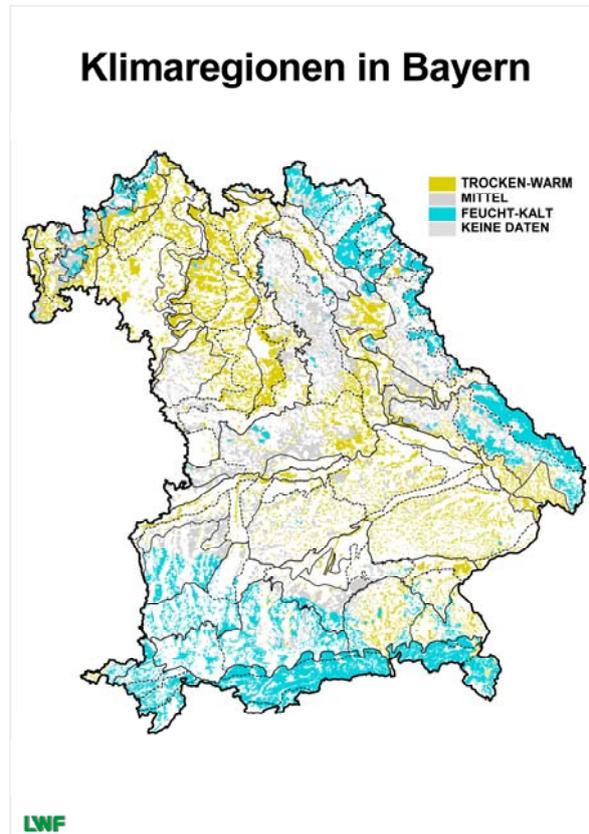


Abb. 2: Karte der Klimaregionen in Bayern (Borchert u. Kölling, 2004), basierend auf den Karten des Klimaatlas für Bayern (Enders et al.,1996)

Fig. 2: Map of climate regions in Bavaria (Borchert und Kölling, 2004), based on maps from the climate atlas of Bavaria (Enders et al.,1996)

Angesichts des Klimawandels ist eine möglichst genaue Kenntnis der aktuellen Standortseigenschaften nötig, um die Empfindlichkeit der Standorte für zukünftigen Veränderungen abzuschätzen und Anpassungsschwerpunkte zu definieren (KÖLLING UND AMMER 2006). Die für das Anpassungsprogramm WUKS (BAYSTMLF 2004) und für das Mittelfranken-Projekt (AMMER ET AL. 2006) verwendete Klimatypenkarte (Abb. 2, BORCHERT und KÖLLING 2004; KÖLLING 2005; KÖLLING 2006) basiert allein auf den Angaben des Bayerischen Klimaatlas, die grob klassiert sind und für Standortfragen eine zu geringe räumliche Auflösung aufweisen. Angesichts dieser dringenden Anforderungen ist eine Neubearbeitung des Atlas und die Konstruktion neuer, aktualisierter Klimakarten erforderlich.

Ziel des Vorhabens

Um für Waldstandorte Klimainformationen zur Verfügung zu haben, müssen punktuell an Klima- oder Niederschlagsmessstationen gewonnene Klimadaten auf die Fläche übertragen, d.h. regionalisiert werden. Die forstliche Standortserkundung benötigt bei der klassischen Ansprache der Wasserhaushaltsstufe solche Information auf Bestandesebene (bspw. BOKU-INSTITUT FÜR WALDBAU 2005). Um die Wasserhaushaltsansprache im Sinne eines modernen forstlichen Standortinformationssystems künftig auf eine verbesserte, quantitative und objektive Basis zu stellen, wurde von SCHULTZE et al. (2005) ein Konzept vorgeschlagen, das mit

Hilfe von Modellrechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell LWF-BROOK90 für ausgewählte Standorte eine Regionalisierung der Modellzielgröße Transpirationsdifferenz T_{diff} (Potentielle Transpiration – aktuelle Transpiration) erlaubt. Hierzu wird eine multiple Regression der Wasserhaushaltsgrößen zu den langjährigen klimatischen Größen wie auch zu topographischen Parametern verwendet. Entscheidend für die Auflösung der regionalisierten Zielgröße des Wasserhaushalts ist jedoch die räumliche Auflösung der verwendeten Klimainformation. Diese war bisher limitiert durch die Auflösung von $400 * 400 \text{ m}^2$ im Bayerischen Klimaatlas (ENDERS ET AL. 1996, vgl. Abb. 3), in dem die Klimagrößen zudem nur klassifiziert wiedergegeben wurden, was die Genauigkeit weiter einschränkte (vgl. Abb. 1). Durch die Verwendung des mittlerweile von der Bayerischen Landesvermessungsverwaltung flächendeckend erarbeiteten digitalen Höhenmodells DGM 25 und aktualisierter Witterungsdaten des Deutschen Wetterdienst können nun deutlich verbesserte Klimakarten erstellt werden. Als Ergebnis des Vorhabens werden Karten erstellt, die sich durch folgende Merkmale auszeichnen:

- eine Auflösung von $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$,
- aktualisierte Klimawerte für den Zeitraum von 1971 bis 2000
- unklassierte (kontinuierliche) Werte

Die im Verfahren erarbeiteten Regionalisierungsmethoden können darüber hinaus künftig auch für die Regionalisierung regionaler Klimaszenarien (z.B. JACOB ET AL. 2006, SPEKAT ET AL. 2006) verwendet werden, um die Auswirkungen der aktuell deutlicher werdenden Klimaänderung für den Wald regional höher aufgelöst abschätzen zu können. Darüber hinaus stellt diese Klimaregionalisierung eine wichtige Datengrundlage für weitere forstliche Fragestellungen wie bspw. im Waldschutz dar.

Geplante Vorgehensweise

Die Regionalisierung der klimatischen Größen soll analog zum Agrar- und Umweltklimatologischen Atlas Bayerns (RÖTZER ET AL. 1997) bzw. Klimaatlas von Bayern (ENDERS ET AL. 1996) unter Nutzung der vorliegenden Erfahrungen über die Art des Regressionsansatzes und der verwendeten Regressoren durchgeführt werden.

Bisher ist man davon ausgegangen, dass die forstliche Standortserkundung weitgehend unveränderliche Umweltgrößen erfasst. Die Klimaentwicklung der letzten Jahrzehnte zeigt jedoch einen deutlichen Wandel, so dass aktuellere Bezugsperioden verwendet werden sollten, um eine Anpassung der klimatischen Grundlagen in der Standortserkundung zu ermöglichen. Zielgrößen sind daher die langjährigen Mittelwerte der aktuellen Klimanormalperiode 1971-2000.

Folgende meteorologische Größen sollen flächenhaft berechnet werden:

- Jahrestemperatur (Klimaatlas Bayern Karte Nr. 2)
- Monatsmitteltemperatur Januar (Klimaatlas Bayern Karte Nr. 3)
- Monatsmitteltemperatur Juli (Klimaatlas Bayern Karte Nr. 5)
- Temperatur Vegetationsperiode (Klimaatlas Bayern Karte Nr. 7)
- Dauer der Vegetationszeit (Klimaatlas Bayern Karte Nr. 17)
- Jahresniederschlagssumme (Klimaatlas Bayern Karte Nr. 25)
- Niederschlag Vegetationsperiode (bislang nicht vorhanden im Klimaatlas Bayern, dort wurde die Periode Mai-Oktober verwendet)
- Häufigkeit extremer Trockenperioden in der Vegetationsperiode

Zum Abschluss des Projektes sollen Rasterdaten für die genannten Klimagrößen als Rasterdaten für ganz Bayern vorliegen. Im Gegensatz zu den früheren bayerischen Klimaatlantenn ist dabei die räumliche Auflösung um den Faktor 64 verbessert (siehe Abb. 4). Die Information einer jeden Rasterzelle wird nicht als Klasse, sondern als absoluter, stetig verteilter Wert ausgegeben.

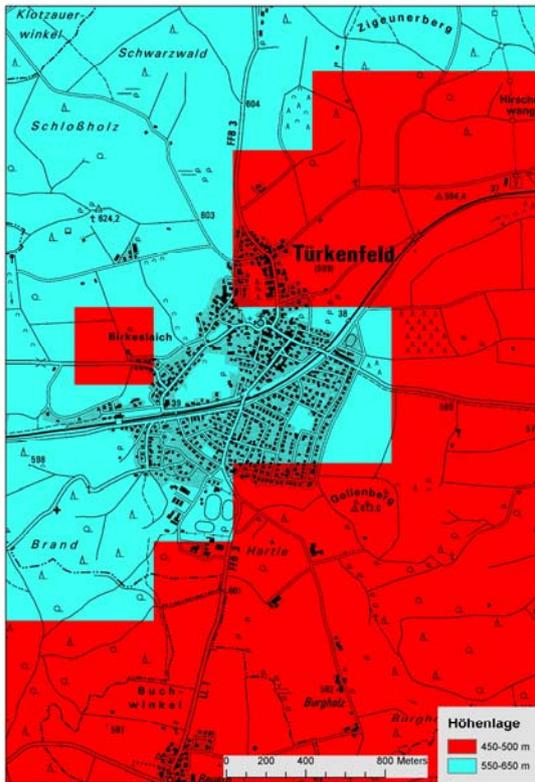


Abb 3: Grob aufgelöste ($400 \times 400 \text{ m}^2$) und weit klassierte Darstellung (100 m-Stufen) der Höhenlage im Klimaatlas für Bayern (ENDERS et al., 1996)

Fig. 3: Coarsely resolved ($400 \times 400 \text{ m}^2$) and widely classified representation (100 m steps) of altitude in the climate atlas of Bavaria (ENDERS et al., 1996)

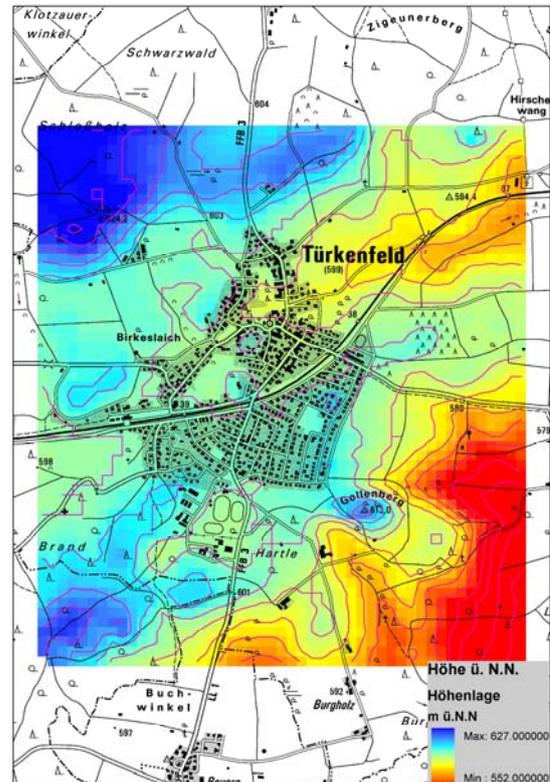


Abb 4: Fein aufgelöste ($50 \times 50 \text{ m}^2$) und unklassierte Darstellung der Höhenlage im DGM 25

Fig. 4: Highly resolved ($50 \times 50 \text{ m}^2$) and unclassified representation of altitude in the DEM 25

Meteorologische Größen, die in Karten- oder Rasterform wiedergegeben werden sollen, basieren auf unregelmäßig verteilten Stationswerten. Die Ermittlung von Flächenwerten (Regionalisierung) soll mit einem objektiv nachvollziehbaren, mathematischen Verfahren erfolgen. Für die Übertragung von punktuellen Klimadaten von Stationen auf die Fläche (Regionalisierung) gibt es unterschiedliche Ansätze: Isolinienkonstruktion, Gradientmethode, Interpolationsverfahren (Methode der inversen Abstandsquadrate (IDW), Kriging) bzw. Regressionsverfahren (FELBERMEIER, 1993; GOLDBERG, 1999). Da jedoch meteorologische Elemente stark von anderen raumbezogenen Parametern beeinflusst werden, ist eine reine Interpolationsmethode nur selten zulässig. So überlagert bei Temperaturwerten die Höhenlage die Nachbarschaftswirkung erheblich. Würde sich z.B. ein Berg zwischen zwei Temperaturmessstationen

befinden, so würden bei einer reinen Interpolation der Werte zwischen den beiden Stationen zu hohe Werte für die dazwischenliegenden Rasterpunkte ermittelt werden. Die Abhängigkeit der Temperatur von der Höhenlage muss folglich berücksichtigt werden. Gut geeignet sind statistische Verfahren wie die Regressionsanalyse, mit der ein numerischer Wert für die jeweilige Abhängigkeit ermittelt werden kann. Letztere versuchen Klimagrößen in Abhängigkeit von Geofaktoren wie bspw. Geländehöhe darzustellen (ENDERS, 1979). Die Regionalisierung der klimatischen Größen erfolgte im Agrar- und Umweltklimatologischen Atlas Bayerns (RÖTZER et al., 1997) bzw. Klimaatlas von Bayern (ENDERS et al. 1996) mittels einer multiplen Regression der Stationsdaten mit ihren zugehörigen Geofaktoren. Als Geofaktoren wurden die

- Höhe über NN,
- geographische Länge und Breite,
- Geländeneigung,
- Strahlungsexposition,
- Landnutzung (Bebauungsindex),
- relative Lage zu Gebirgen (Luv-/Lee-Effekt),
- Größe von Kaltlufteinzugsgebieten und
- Nebelhäufigkeit

für die verschiedenen Klimagrößen in Betracht gezogen. Da zumeist mehrere dieser Geofaktoren gleichzeitig zu berücksichtigen waren, musste die Abhängigkeit der meteorologischen Größen von diesen Geofaktoren über eine multiple Regressionsanalyse ermittelt und die Signifikanz der einzelnen Faktoren über statistische Tests bestimmt werden. Bei Verwendung einer rein statistischen Methode wie der Regressionsanalyse entstanden an den Stationen teilweise deutliche Abweichungen zwischen den gemessenen Werten und den statistisch bestimmten Werten. Diese Abweichungen oder Residuen waren jedoch nicht ausschließlich auf Beobachtungsfehler zurückzuführen, sondern beruhten auch auf in der Regressionsanalyse nicht berücksichtigten, weiteren Geofaktoren bzw. enthielten charakteristische, kleinräumige Einflüsse auf die Stationen. Mit Hilfe einer Interpolation der durch Regression nicht erklärten Abweichungen (Residuen) und anschließender Glättung konnten auch diese Einflüsse bei den bayerischen Klimaatlantanten berücksichtigt werden (RÖTZER UND WÜRLÄNDER 1994). Die Addition der aus der Regressionsanalyse und der Residueninterpolation erhaltenen Werte ergab das endgültige Raster mit den Werten der klimatischen Größen.

Schlussfolgerungen

Vergleichbare Ansätze zur Regionalisierung von klimatologischen Größen wie langjährigen Mittelwerten von Niederschlag und Temperatur wurden bereits für die forstliche Anwendung in Niedersachsen (MUES, 2000) und für das Osterzgebirge (GOLDBERG, 1999) wie auch allgemein in gröberer Auflösung (1 km²) im Klimaatlas Deutschland (MÜLLER-WESTERMEIER 1995, 1999, 2001) angewendet. Derzeit werden in Sachsen im ENFORCHANGE-Projekt Meteorologie („Regionalisierung und Modellierung von Klimagrößen in den Modellregionen Dübener Heide und Oberlausitz“) regionalisierte Klimadaten für andere Teilprojekte sowie als Input für Waldwachstumsmodelle (GOLDBERG, 2006) über vergleichbare Verfahren bereitgestellt. Für die Regionalisierung von Strahlung oder Wind müssen komplexere Modelle eingesetzt werden.

Literatur

- AMMER, C., BOSCH, T., DULLY, I., FAIBT, G., IMMLER, T. KÖLLING, C., MARX, N., SEIDL, G., SEITZ, R., WOLF, M. WOLFERSTETTER, T., 2006: Hinweise zur waldbaulichen Behandlung von Borkenkäferkalamitätsflächen in Mittelfranken. - LWF Wissen 54, 60 S.
- BAYER. STMLF, 2004: Waldumbau: Bayern spurtet in Richtung Mischwald "Waldumbau-programm Klimawandel im Staatswald" (WUKS) vorgestellt - Sonderprogramm startet an sieben Forstämtern. Pressemitteilung vom 3.5.2004.
- BOKU-INSTITUT FÜR WALDBAU, 2005: Bioklimatischen Charakterisierung der forstlichen Wuchsgebiete Österreichs. Eine bioklimatische Ergänzung zur Wuchsgebietgliederung nach Kilian et al. (1994). CD, Institut für Waldbau, BOKU Wien.
- BORCHERT, H., KÖLLING, C., 2004: Waldbauliche Anpassung an den Klimawandel jetzt beginnen. - LWF aktuell 43, 28 – 30.
- ENDERS, G., 1979 : Theoretische Topoklimatologie. Nationalpark Berchtesgaden: Forschungsbericht 1, 92 S.
- ENDERS, G. ET AL. (Hrsg.), 1996: Klimaatlas von Bayern / Bayerischer Klimaforschungsverbund, BayFORKLIM. München, 48 S., 57 Bl. : graph. Darst., zahlr. Kt., ISBN 3-00-000638-9.
- FELBERMEIER, B., 1993: Der Einfluß von Klimaänderungen auf die Areale von Baumarten : Methodenstudie und regionale Abschätzung für die Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) in Bayern. Forstliche Forschungsberichte München, 134, 214 S.
- GOLDBERG, V., 2006: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_wasserwesen/ifhm/meteorologie/forschung/ag/folder.2006-08-03.9074079748/TUD_Meteorologie2006-A2.pdf
- GOLDBERG, V., 1999: Zur Regionalisierung des Klimas in den Hochlagen des Osterzgebirges unter Berücksichtigung des Einflusses von Wäldern. - Tharandter Klimaprotokolle Bd. 2, 193 S.
- JACOB, D., LORENZ, P., GÖTTEL, H., MÖLLER, M., KOTLARSKI, S., 2006: Klimaänderungen in Deutschland, Österreich und der Schweiz bis 2100: erste Analysen des regionalen Klimamodells REMO - Mittelwerte und Extrema. <http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz/veranstaltungen/04jacob2.pdf> .
- KÖLLING, C., 2005: Waldbau im Klimawandel. Mit Mischwald nachhaltig die Zukunft gestalten. Festschrift 20 Jahre VfS. Hrsg.: Verein für Standortserkundung e.V., München , 20 - 23
- KÖLLING, C., 2006: Waldbau im Klimawandel - eine Herausforderung für die Forstliche Standortserkundung. - Forstinfo 3, 1 - 4
- KÖLLING, C., AMMER, C., 2006: Waldumbau unter den Vorzeichen des Klimawandels. Zahlen der Bundeswaldinventur zeigen Anpassungsschwerpunkte. - AFZ/DerWald 61.
- MÜLLER-WESTERMEIER, G., 1995: Numerisches Verfahren zur Erstellung klimatologischer Karten. - Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 193, Offenbach.
- MÜLLER-WESTERMEIER, G.; KREIS, A.; DITTMANN, E., 1999: Klimaatlas der Bundesrepublik Deutschland, Teil 1, Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- MÜLLER-WESTERMEIER, G.; KREIS, A.; DITTMANN, E., 2001: Klimaatlas der Bundesrepublik Deutschland, Teil 2, Deutscher Wetterdienst, Offenbach.

- MUES, V., 2000: GIS-gestützte Regionalisierung von Klima- und Depositionsdaten in Niedersachsen. Diss. Uni Göttingen 223 S. <http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2000/mues>
- RÖTZER, T., WÜRLÄNDER, R., 1994: Neuartige phänologische Karten von Bayern und deren Anwendungsmöglichkeiten in der Landschaftsökologie und Landschaftsplanung. Ber. d. Bay. Akademie für Naturschutz und Landespflege, Kirchzarten 18: 131-145.
- RÖTZER, T. ET AL. (Hrsg.) (1997): Agrar- und umweltklimatologischer Atlas von Bayern : (1961 - 1990), 1 CD-ROM ; 12 cm , Dateiverzeichnis (13 S.) Zolling : Deutscher Wetterdienst, Weihenstephan, ISBN 3-88148-334-9.
- SCHULTZE, B., KÖLLING, C., DITTMAR, C., RÖTZER, T., UND ELLING, W. (2005) Konzept für ein neues quantitatives Verfahren zur Kennzeichnung des Wasserhaushalts von Waldböden in Bayern: Modellierung – Regression – Regionalisierung. - Forstarchiv 76, 155 – 163.
- SPEKAT, A., ENKE, W., KREIENKAMP, F., 2006: Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Projektbericht im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens: “Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland - Phase I: Erstellung regionaler Klimaszenarios für Deutschland” des Umweltbundesamtes. Förderkennzeichen 204 41 138

Adressen der Autoren:

Dr. Lothar Zimmermann, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, SG 2.2 Klima und Wasserschutz, Am Hochanger 11, 85354 Freising, Tel. 08161-71-4914

Dr. Thomas Rötzer, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, TU München, Am Hochanger 13, 85354 Freising, Tel. 08161-71-4665

Dr. Uwe Hera, GeoKLIM, Birkenstraße 33a, 85757 Karlsfeld, Tel.08131-998276

Dr. Harald Maier, DWD-Abt. Agrarmeteorologie, Außenstelle Weihenstephan, Alte Akademie Nr. 16, Weihenstephaner Berg, 85354 Freising

Christoph Schulz, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, SG 2.2 Klima und Wasserschutz, Am Hochanger 11, 85354 Freising

Dr. Christian Kölling, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, SG 2.1 Boden und Standortkunde, Am Hochanger 11, 85354 Freising

Modellierung der klimabedingten Wachstumsdynamik von Waldbeständen

Thomas Rötzer

Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, TU München

Zusammenfassung

Die Wachstumsdynamik von Waldbeständen ist vor allem durch die Umweltbedingungen und die Bestandesstruktur geprägt, die wiederum von zahlreichen Interaktionen beeinflusst werden. Anhand von physiologischen Wachstumsmodellen wie z.B. BALANCE können solche Prozesse, Zyklen und Rückkopplungen beschrieben und analysiert werden. Simulationen mit BALANCE für einen Fichten-Buchenmischbestand im Kranzberger Forst über die Jahre 2000 bis 2005, sowie für zwei Klimaszenarien und einen Witterungsverlauf mit vermehrten Extremjahren zeigten einen Rückgang der Verdunstung unter veränderten Klimaverhältnissen, aber auch unter vermehrten Extrempersistenzen. Aufgrund eines erhöhten Wasserstresses nimmt dadurch auch der Biomassezuwachs ab. Reduziert man die Bestandesdichte, ist der Rückgang des Biomassezuwachses gegenüber den jeweiligen Simulationen des Ausgangsbestandes bei den Szenario- bzw. Extrempersistenzläufen deutlich verringert.

Modelling growth dynamics of forest sites as affected by climate

Abstract

Growth dynamics of forest stands is characterized particularly by the environmental conditions and the site structure, which in turn are influenced by numerous interactions. By using physiological growth models like e.g. BALANCE, these processes, cycles and feedbacks can be described and analysed. Simulations with BALANCE of a mixed spruce-beech stand in the Kranzberg forest for the years 2000-2005 as well as for two climate scenarios and a climate with more extreme years showed a drop of the evapotranspiration in all three scenarios. Due to increased water stress biomass increment decreases. If stand density is reduced, the decrease of the biomass increment for the three scenarios is distinctly smaller compared to the corresponding simulations of the original stand.

1 Einleitung

Die räumliche und zeitliche Wachstumsdynamik von Waldbeständen wird von den komplexen Beziehungen zwischen Umwelteinflüssen, Einzelbaum und Bestand sowie deren Interaktionen bestimmt. Sie hängt sowohl von der Kondition der Baumindividuen wie auch von dem Zusammenwirken und den Rückkopplungen der meteorologischen, hydrologischen, pedologischen und biologischen Prozesse auf Baumebene ab. Mittels waldbaulicher Maßnahmen und anderer struktureller Änderungen im Bestand lässt sich das Bestandeswachstum zusätzlich beeinflussen. Prozessorientierte Wachstumsmodelle können solche Auswirkungen differenzierter Umweltbedingungen und deren Änderungen sowie den Einfluss von Eingriffen auf das Waldwachstum aufdecken. Anhand von Simulationen mit dem Wachstumsmodell BALANCE soll beispielhaft für den Fichten-Buchen-Mischbestand in Kranzberg (Bayern) gezeigt werden, wie sich ein Bestand gegenüber veränderten klimatischen Umweltbedingungen verhält und wie mit forstlichen Maßnahmen, d.h. einer Verringerung der Bestandesdichte, darauf reagiert werden kann.

2 Modellbeschreibung

Das physiologische Wachstumsmodell BALANCE beschreibt die dreidimensionale Entwicklung von Einzelbäumen in Abhängigkeit der äußeren Umweltfaktoren Witterung, CO₂, Bodenbedingungen sowie Schadstoffen und der individuellen Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe. Bei der Modellierung mit BALANCE werden zum einen die wesentlichen Flussgrößen des Wasser-, Kohlenstoff- und Stickstoffhaushalts, zum anderen das Wachstum der Bäume, das von diesen Größen abhängt, und die Konsequenzen, die sich daraus für die Bestandesstruktur ergeben, betrachtet.

Neben täglichen Witterungswerten und Bodenkenngrößen benötigt BALANCE als Initialgrößen Baumart, Stammfuß-Koordinaten, Baumhöhe und Stammdurchmesser. Aus dieser Bestandesbeschreibung können Kronenformen und Wurzelraumdimensionen abgeleitet werden, die wiederum als Grundlage für die Initialisierung der Laub-, Stammholz-, Ast-, Grob- und Feinwurzelbiomassen sowie der Blatt- und Wurzeloberflächen dienen. Die unterschiedlichen räumlichen Ebenen der Berechnung reichen vom gesamten Bestand über Einzelbäume und Baumkompartimente (Krone, Stamm, Wurzel) bis hin zu detaillierten Angaben zu einzelnen Kronen- und Wurzelschichten. Diese einzelnen Segmente stellen die Berechnungsgrundlage aller Kreisläufe und Prozesse dar (Abbildung 1).

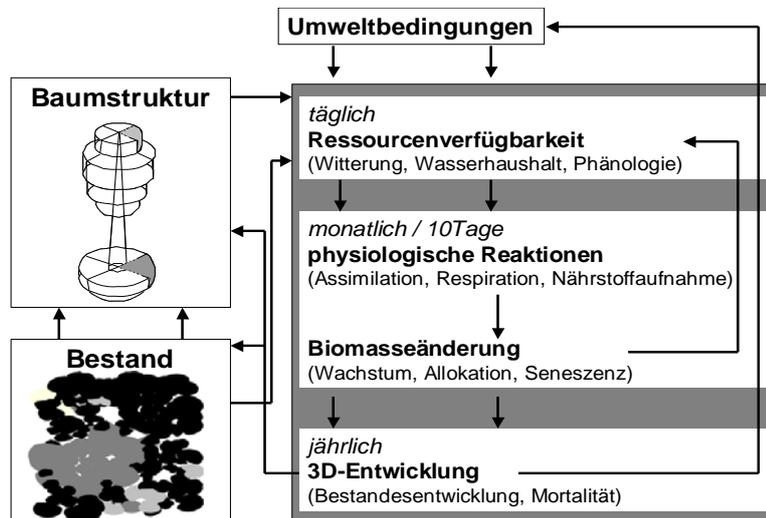


Abb. 1: Räumliches- und zeitliches Prozessschema des Modells BALANCE

Fig. 1: Spatial and temporal process scheme of the model BALANCE

Die das Wachstum eines Einzelbaumes bestimmenden Prozesse laufen im Modell BALANCE in zeitlich unterschiedlicher Auflösung ab. In Tagesschritten wird die Ressourcenverfügbarkeit, d.h. Werte der Witterung, des Wasserhaushalts und der Phänologie für jeden einzelnen Baum bzw. jedes einzelne Segment berechnet. Diese Berechnungen benötigen die Bereitstellung von Tageswerten der Witterung (Temperatur, Strahlung, Niederschlag, Wind und relative Feuchte) und der Luftchemie (CO₂, Luftschadstoffe, N-Deposition), sowie Informationen zum Boden (Schichtung, Nährstofffreisetzung, maximale Wasserverfügbarkeit). Die Simulation des Wasserhaushaltes berücksichtigt die Bodenbedingungen in verschiedenen Schichten sowie die Beeinflussung der Interzeption und Perkolation durch die Schirmflächen- und Wurzelverteilung. Die Verdunstung wird als das Minimum aus potentieller Evapotranspiration und maximaler Evaporation beschrieben (MONTEITH, 1965). Die Nährstoffaufnahme ergibt sich als Minimum von Bedarf, Angebot und Aufnahmevermögen (GROTE, 1998), wobei zu-

nächst lediglich der Stickstoffkreislauf als wichtigstes Nährelement berücksichtigt wird. Um die Entwicklung eines Baumes im Jahreslauf beschreiben zu können, muss der jährliche Laubzyklus bekannt sein. Mit dem Laubaustrieb verändern sich Biomasse bzw. Blattfläche aber auch Lichtgenuss und Strahlungsabsorption. Damit bestimmen das Austriebs- und das Laubfalldatum eines Baumes nicht nur seine Assimilations- und Respirationssumme sondern beeinflussen auch die Umweltbedingungen der Nachbarbäume. In BALANCE wird der Austriebsbeginn mit einem Temperatursummenmodell berechnet (RÖTZER et al., 2004) und die Laubseneszenz in Abhängigkeit der potentiellen Respirationssumme abgeschätzt (RÖTZER, 2003).

Am Ende jedes Monats bzw. jeder Dekade (= 10 Tage) werden aus den aufsummierten Daten der Ressourcenverfügbarkeit die physiologischen Reaktionen und die Biomasseänderungen berechnet, das sind Photosynthese, Respiration und Nährstoffverfügbarkeit. Die Photosynthese wird auf der Grundlage der Netto-Kohlenstoffgewinne und der Effizienz einzelner Kronen- und Wurzelraumteile simuliert. Sie stellt eine Funktion von Blattfläche, Licht, Temperatur und CO₂-Konzentration dar (HAXELTINE und PRENTICE, 1996) und wird durch Wasser- und Nährstoffmangel sowie Schadstoffe reduziert. Die Atmung setzt sich aus der Erhaltungsaerobic-Atmung als Funktion von Temperatur und Biomasse und der Wachstumsaerobic-Atmung als festen Anteil der Bruttoassimilation zusammen. Bei der Verteilung der Biomasse, d.h. der Allokation, wird die neu gewonnene Biomasse auf das Laub, die Äste, die Wurzeln und das Stammholz verteilt (GROTE, 1998). Die Verteilung der Nettoassimilation und der Stickstoffaufnahme richtet sich nach dem Bedarf der einzelnen Kompartimente, die auf der „functional balance“-Theorie bzw. der „pipe-model“-Theorie basieren.

Einmal jährlich, d.h. am Ende jeder Vegetationsperiode, werden die dreidimensionale Struktur eines jeden Baumes sowie die gesamte Bestandesentwicklung und die Mortalität berechnet. Entsprechend den Biomasseveränderungen werden Höhe, Durchmesserwachstum und Kronenausdehnung eines jeden Baumes bestimmt. Die Dimensionsveränderung erfolgt einmal im Jahr aus der über das Jahr realisierten Zunahme von Stammholz, Grobwurzeln und Astholz. Dabei richtet sich der Anteil, der jedem Segment zugeordnet wird, nach seiner Effektivität, d.h. nach dem Verhältnis zwischen Kohlenstoffaufnahme und -abgabe. Eine ausführliche Beschreibung sowie Validierungsergebnisse des Modells BALANCE sind in GROTE und PRETZSCH (2002) sowie in RÖTZER (2003) und RÖTZER et al. (2005) enthalten.

3 Bestandesbeschreibung

Der Kranzberger Forst liegt am Südrand des Tertiären Hügellandes, ca. 40 km nördlich von München auf einer Höhe von 500 m über dem Meeresspiegel. Der Boden lässt sich als tonig-sandiger Lehm charakterisieren, der gut durchwurzelbar ist. Die für die Simulationen benötigten Werte zur Feldkapazität (34 mm/dm) bzw. zum Welkepunkt (14 mm/dm) wurden der Beschreibung des Level II Standorts Freising entnommen, der in unmittelbarer Nähe liegt (Rötzer et al. 2005). Der verwendete Waldbestand ist aus 172 Fichten (*Picea abies* [L.] KARST.) und 37 Buchen (*Fagus sylvatica* L.) aufgebaut. Der Mischbestand ist in etwa 55 Jahre alt. Für die Simulationen wurden alle Bäume verwendet. Um jedoch Randeffekte auszuschließen, wurden die äußeren beiden Baumreihen nicht in die Auswertung einbezogen. Die Analysen beruhen daher auf Ergebnissen von 87 Fichten und 32 Buchen.

Tabelle 1 gibt die Charakteristik des analysierten Bestandes wieder. Etwa zwei Drittel aller Bäume sind Fichten. Sie nehmen eine Grundfläche von 35,6 m²/ha ein und weisen eine mittlere Höhe von 23,5 m bei einem mittleren Durchmesser von 27,0 cm auf.

Tab. 1: Charakteristik des analysierten Waldbestandes in Kranzberg

Tab. 1: Characteristics of the analysed forest site in Kranzberg

Baumart	Alter (Jahre)	Anzahl	h_{mittel} (m)	$\text{dbh}_{\text{mittel}}$ (cm)	GF (m ² /ha)
Fichte	50	87	23,5	27,0	35,6
Buche	56	32	23,1	23,0	9,3
gesamt		119			44,9

In dem Mischbestand stehen zudem 32 Buchen mit einer Grundfläche von 9,3 m²/ha, einer mittleren Höhe von 23,1 m und einem Mitteldurchmesser von 23,0 cm. Eine exakte Beschreibung des gesamten Forstbestandes Kranzberg ist in PRETZSCH et al. (1998) nachzulesen.

Klimatische Grundlage der Simulationen bilden Daten der Jahre 2000 bis 2005, die von der nahegelegenen Klimastation der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft erhoben werden. Die Entfernung der Klimastation zum Waldbestand beträgt etwa 2 km.

4 Sensitivitätsanalysen

In Tabelle 2 sind die Mittelwerte der verwendeten Witterungsdaten über den gesamten Zeitraum sowie die Mittelwerte der unterstellten Szenarien dargestellt. Im Mittel der 6 Jahre ergibt sich für den Standort Kranzberg bei einer Niederschlagssumme von 814 mm eine Temperatur von 8,7 °C. Damit entspricht der Niederschlag dem klimatischen Mittel für diese Region, das für den Zeitraum 1961-1990 mit 750-850 mm angegeben ist (BAYFORKLIM, 1996). Die Temperatur dagegen liegt deutlich über dem klimatischen Mittel der Region mit 7-8°C. Auch die Strahlung liegt mit 1205 J/cm² im Mittel der Jahre 2000-2005 über dem langjährigen Mittel der Region von 1015 J/cm².

Tab. 2: Mittelwerte der Temperatur, des Niederschlags und der Strahlung am Standort Kranzberg (Zeitraum 2000-2005 und Szenarien)

Tab. 2: Means of temperature, precipitation and radiation at the site Kranzberg (period 2000-2005 and scenarios)

Lauf	Niederschlag [mm] (mm)	Temperatur (°C)	Strahlung (J/cm ²)
2000-2005	814	8,7	1205
Niederschlag80%	651	8,7	1205
Szenario 1	651	11,7	1447
3x2003	692	8,9	1253

In zwei Szenarien wurden die Witterungswerte verändert: Zunächst wurde der Niederschlag um 20 % gekürzt, wodurch sich ein mittlerer Jahresniederschlag von 651 mm ergibt. Im zweiten Schritt wurde zusätzlich die Temperatur um 3°C und die Strahlung um 20% erhöht. Da das IPCC (2000) auch von einer Häufung von Extremereignissen ausgeht, wurde in einem dritten Szenarium das extrem trockene Jahr 2003 mehrfach wiederholt. Anstelle der Jahre 2001 und 2005 wurde der Witterungsverlauf des Jahres 2003 verwendet, wodurch sich der mittlere Niederschlag auf 692 mm absenkte, die Temperatur und die Strahlung dagegen nur geringfügig um 0,2 °C bzw. 48 J/cm² anstieg.

Die Auswirkungen der Szenarien auf den Wasserhaushalt sind in Abbildung 2 dargestellt. Bei einem auf 80 % reduzierten Niederschlag ergibt sich ein Rückgang der Gesamtverdunstung (=Summe aus Evapotranspiration und Interzeptionsverdunstung) von 713 mm auf 641, d.h. von 15 %. Werden zudem Temperatur und Strahlung erhöht, steigt die Gesamtverdunstung wieder leicht auf 656 mm an. Unter häufigeren Extremjahren lässt sich ein Rückgang der Gesamtverdunstung auf 672 mm feststellen. Das Verhältnis von tatsächlicher zu potentieller Evapotranspiration, das als Maß für die Trockenheit verwendet werden kann, ist für den Szenario 1 Lauf mit 0,51 am geringsten (=größter Wasserstress), während bei der Variante „Niederschlag 80%“ der geringste Rückgang (0,59 gegenüber 0,69 für den Zeitraum 2000-2005) zu verzeichnen ist.

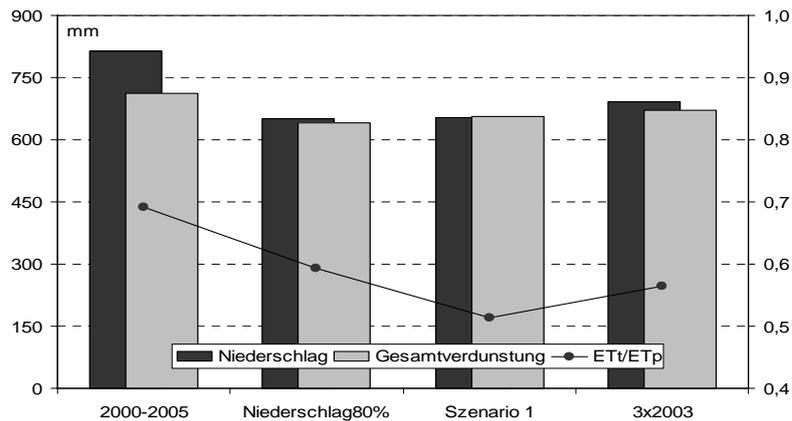


Abb. 2: Niederschlag und Verdunstung des Mischbestandes in Kranzberg im Mittel der Jahre 2000-2005 sowie für 3 Szenarien

Fig. 2: *Precipitation and evapotranspiration for the mixed forest in Kranzberg on average of the years 2000-2005 and for the scenarios*

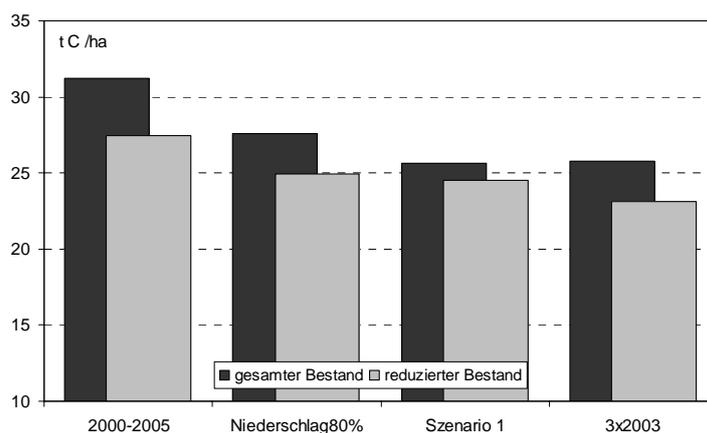


Abb. 3: Biomassezunahme des Fichten-Buchenmischbestandes in Kranzberg für den Ausgangs- und den reduzierten Bestand im Mittel der Jahre 2000-2005 sowie für 3 Szenarien

Fig. 3: *Biomass increase of the mixed spruce/beechn stand in Kranzberg for the original and the reduced density stand averaged over the years 2000-2005 and for the 3 scenarios*

Betrachtet man die über die sechs Jahre aufsummierten Biomassezunahmen (Abbildung 3), ergibt sich ein klarer Rückgang des Zuwachses bei allen drei Szenarien von 31,2 t C/ha auf 27,6 bis zu 25,6 tC/ha. Während der Zuwachs beim „Niederschlag 80%“ - Szenario um lediglich 3,6 tC/ha zurückgeht, wird bei der „3x2003“-Variante mit einer Zuwachsreduktion von 5,4 tC/ha fast der Wert von Szenario 1 mit 5,6 tC/ha erreicht.

In weiteren Simulationsläufen wurde die Bestandsdichte verringert, d.h. es wurden die 29 schwächsten Fichten sowie die 11 schwächsten Buchen entnommen. Für den reduzierten

Bestand ergab sich so eine Grundfläche von 38,5 m²/ha. Die Biomasse des gesamten Bestandes sank von 71,8 tC/ha auf 64,6 tC/ha. Über die Jahre 2000 bis 2005 berechnete BALANCE eine Biomassezunahme von 27,5 tC/ha. Dies bedeutet einen Rückgang gegenüber dem Ausgangsbestand um 3,8 tC/ha. Unter den Bedingungen der einzelnen Szenarien lassen sich gegenüber den jeweiligen Läufen des Ausgangsbestandes durchweg geringere Abnahmen im Zuwachs feststellen (Abbildung 3). Bei den Varianten „Niederschlag 80%“ und „3x2003“ liegt die Biomasseabnahme bei jeweils 2,7 tC/ha. Bei Szenario 1 ist die Differenz der Biomassezunahme von Ausgangs- und reduziertem Bestand lediglich 1,1 tC/ha.

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Gründe für den geringeren Rückgang des Biomassezuwachses bei einer reduzierten Bestandesdichte unter den Bedingungen der drei Szenarien im Vergleich zur Witterung der Jahre 2000-2005 sind sicherlich in der Ressourcenverteilung zu suchen. So liegen beispielsweise die Gesamtverdunstungssummen aller drei Varianten des reduzierten Bestandes etwas höher als die des Ausgangsbestandes, und das, obwohl weniger Bäume verdunsten. Bei Szenario 1 kommt zusätzlich ein höherer Strahlungsgenuss des Laubes zur Wirkung.

Erste eingehendere Analysen zu den Gründen der unterschiedlichen Biomassezuwächse weisen auf Unterschiede im Respirations- und Assimilationsverhalten hin, auch die Allokation des Kohlenstoffs scheint sich unter veränderten Klimabedingungen zu verschieben. So wird unter Wasserstress mehr Kohlenstoff in das Wurzelwachstum umgeleitet, wodurch das oberirdische Wachstum eingeschränkt wird. Der nächste Schritt im Rahmen dieser Untersuchungen ist, die Ursachen näher zu durchleuchten, die Simulationen über längere Perioden laufen zu lassen und die Ergebnisse mit den Resultaten anderer Forschungsgruppen (z.B: Williams et al. 2005 oder deWit et al. 2006) zu untermauern.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei allen Kollegen und Mitarbeitern des SFB 607 „Wachstum und Parasitenabwehr“ für die Bereitstellung von Daten, aber auch für Diskussionen und Kommentare. Die Arbeiten werden im Rahmen der Projekte CSWH und ENFORCHANGE vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF gefördert.

Literaturverzeichnis

BAYFORKLIM, 1996: Klimaatlas von Bayern. - Buchhandlung Kanzler, München.

DEWIT, H.A., PALOSUO, T., HYLEN, G., LISK, I.J., 2006: A carbon budget of forest biomass and soils in southeast Norway calculated using a widely applicable method. - *Forest Ecology and Management* 225, 15-26.

GROTE, R., PRETZSCH, H., 2002: A model for individual tree development based on physiological processes. - *Plant Biol.* 4, 167-180.

HAXELTINE, A., PRENTICE, I.C., 1996: A general model for the light use efficiency of primary production by terrestrial ecosystems. - *Functional Ecology* 10, 551-561.

- IPCC, 2000: Land, use, land use change and forestry. In: IPCC special report. Watson R. T., Noble I. R., Bolin B, Ravindranath N. H., Verardo D. J., Docken, D. J. Cambridge University Press, Cambridge, 337 Seiten.
- MONTEITH J.L., 1965: Evaporation and environment. In: The state and movement of water in living organisms (ed): GE Fogg, Academic Press, London.
- PRETZSCH, H., KAHN, M., GROTE, R., 1998: Die Fichten-Buchen-Mischbestände des Sonderforschungsbereiches „Wachstum oder Parasitenabwehr?“ im Kranzberger Forst. - Forstw. Cbl. 117, 241-257.
- RÖTZER, T., 2003: Modellierung der Baumkronenentwicklung mittels eines ökophysiologischen Prozessmodells. Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft Ref. 533, Bonn, 73-42.
- RÖTZER, T., GROTE, R., PRETZSCH, H., 2004: The timing of bud burst and its effect on tree growth. - Int. J. of Biometeorology 48, 109-118.
- RÖTZER, T., GROTE, R., PRETZSCH, H., 2005: Effects of environmental changes on the vitality of forest stands. - European Journal of Forest Research 124, 349-362.
- WILLIAMS, M.; SCHWARZ, P.A.; LAW, B. E.; IRVINE J.; KURPIUS, M. R., 2005: An improved analysis of forest carbon dynamics using data assimilation. - Global Change Biology 11, 89-105.

Anschrift des Autors

Dr. Thomas Rötzer, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, TU München, Am Hochanger 13
D- 85354 Freising

Prognose des Diasporentransports in einer turbulenten Atmosphäre

S. Horn, A. Raabe und M. Wilsdorf

Institut für Meteorologie, Universität Leipzig

Zusammenfassung

In dem Beitrag geht es um die Modellierung der Ausbreitung von Diasporen mit dem Wind. Besondere Aufmerksamkeit wird dabei der Fernausbreitung ($>100\text{m}$) gewidmet, da diese erhebliche Auswirkungen auf eine Vielzahl von ökologischen und evolutionsbiologischen Prozessen hat. Im Interesse des Projektes liegt es somit die turbulenten Strömungsfelder, die für die Ausbreitung der Diasporen ausschlaggebend sind, auch für strukturiertes Gelände experimentell zu charakterisieren und numerisch zu simulieren. Dabei wird auch untersucht in welchem Maß thermisch induzierte Aufwinde zur Fernausbreitung beitragen. Zu diesem Zweck wird einerseits mit dem Trajektorienmodell DiasporeDispersal auf einen Lagrangeansatz zurückgegriffen und andererseits werden die mikroskaligen Strömungsfelder mit dem Strömungsmodell ASAM simuliert. Die im Zusammenhang stehenden Diasporen – Flugexperimente wurden vom Institut f. Botanik Univ. Regensburg durchgeführt.

Modeling diaspore dispersal in a turbulent atmosphere

Abstract

The objective of this contribution is to model diaspore dispersal by wind. The main focus lies on long range transport (>100), because it has significant effects on many ecological and evolutionary processes. So the interest of this project is to characterize the turbulent flow field for structured landscapes through experiments and to simulate the flow field and the diaspora transport through numerical models. Another point of interest is the influence of thermal induced turbulence on long range transport of diaspores. Therefore a Lagrange approach is used in the trajectory model DiasporeDispersal and in addition the micro scale background flow will be computed with the flow model ASAM. The additionally used diaspore flight experiments are carried out by the Inst. f. Botanik of Univ. Regensburg.

1. Experimente und Messtechnik

Zur Bestimmung und Überprüfung der Berechnungsverfahren sind im Rahmen dieser Studie drei Freiluftexperimente in Melpitz, auf dem Islinger Feld südlich von Regensburg und in Deuerling (bei Regensburg) durchgeführt worden. Während Melpitz und das Islinger Feld eine sehr ebene Experimentallandschaft boten, zeichnete sich Deuerling hingegen durch eine stark strukturierte Landschaft aus. Die Messzeit orientiert sich an der Flugzeit der Pflanzensamen. Deren Startplatz lag generell in der Nähe eines akustischen Anemometers, im Messgebiet Deuerling auf einem kleinen Plateau an einem Südhang. Die Experimente hatten eine Laufzeit von ein bis drei Wochen.

Bei allen Experimenten kamen für die Messungen der meteorologischen Parameter gleichzeitig mehrere Ultraschallanemometer zum Einsatz. Die hier verwendete relativ hohe Messfrequenz von 10Hz stellt zeitgleich die drei Komponenten des Windvektors an verschiedenen Orten zur Verfügung – Ausgangspunkt für Modellvalidierung und für die Interpretation der Flugweitenexperimente.

Tab. 1: Experimente im Rahmen des Projektes

Tab. 1: *Experiments within the project*

	Zeitraum	Anzahl der Pflanzensamen-Flugzeiten (10min Zeitabschnitte)	Abgedeckter Stabilitätsbereich (vgl Tab.2)
Melpitz	26.09.05 - 03.10.05	99	A, B, C, D, E
Islinger Feld	23.03.06 - 07.04.06	152	--
Deuerling	30.06.06 - 06.07.06	185	A, B, C

2. Turbulenz

Wir die atmosphärische Turbulenz als eine Überlagerung von Wirbeln vieler verschiedener Wellenlängen verstanden, dann kann man sich zur Charakterisierung der spektralen Analyse bedienen. Zu diesem Zweck wird durch eine Fourier-Transformation der gemessenen Zeitreihen das Turbulenzspektrum ermittelt. In diesem sind die spektrale Verteilung der Energie über der Wellenlänge und die Phaseninformation der jeweiligen Schwingung zu erkennen. In der Meteorologie ist es üblich nicht das komplexe Fourier-Spektrum sondern das Leistungsspektrum zu betrachten, das sich aus dem Betrag des komplexen Ergebnisses der Fourier-Transformation ergibt. Somit verliert man bei dieser Transformation die Information über die Phase der jeweiligen Schwingung. Das generalisierte Leistungsspektrum der Turbulenz wird in meteorologischen Lehrbüchern (z.B. FOKEN, 2006) u. a. für verschiedene Stabilitätsklassen angegeben. Die verallgemeinerten Spektren gehen weitgehend auf experimentelle Arbeiten von KAIMAL et al. (1972) zurück, die in flachem Gelände durchgeführt wurden. Inwiefern diese Strukturen auf komplexes Gelände übertragbar sind, war hier Teil der experimentellen Untersuchungen.

Die generalisierten Leistungsspektren der verschiedenen Windgeschwindigkeitskomponenten unterscheiden sich deutlich in ihren Energiedichtemaxima und der Stabilitätsabhängigkeit. So liegt das Energiedichtemaximum des Vertikalwindes bei Frequenzen von 0.1Hz bis 1Hz und das des Horizontalwindes eine Größenordnung tiefer. Das Spektrum des Vertikalwindes zeigt diese typische Verschiebung des Maximums zu den hohen Frequenzen für alle Stabilitäten. Bei Skalaren wie beispielsweise der Temperatur ist das Energiedichtemaximum in den niederfrequenten Bereich verschoben (Foken, 2006).

Tab. 2: Darstellung der Stabilitätsklassen nach Pasquill (Foken, 2006)

Tab. 2: *stability classes after Pasquill (FOKEN, 2006)*

	z/L	Pasquill-Klassen
sehr labil	≤ -0.33	A
labil	-0.1 bis -0.33	B
neutral bis leicht labil	-0.033 bis -0.1	C
neutral bis leicht stabil	0.002 bis 0.04	D
stabil	0.04 bis 0.17	E
sehr stabil	≥ 0.17	F

In den Arbeiten von (KAIMAL et al., 1972) ist auch eine Abhängigkeit der Leistungsspektren von der Stabilität beschrieben. Die Bestimmung der Stabilität erfolgt über eine Parametrisierung von Mischungsschichthöhe, Rauigkeitslänge und dem Monin-Obukov-Stabilitätsparameter z/L . Die Einteilung der gemessenen Stabilität erfolgt in die sehr verbreiteten Pasquill-Klassen.

3. ASAM

Das Modell ASAM ist in den letzten Jahren am Institut für Troposphärenforschung in Leipzig entstanden (KNOTH, 2006; HORN, 2006) und wird nun auch im Rahmen dieses Projektes weiterentwickelt. Es handelt sich dabei um ein kompressibles, ein- bis dreidimensionales Strömungsmodell mit einem integrierten Zweigleichungsturbulenzmodell. Die Berechnung der Strömung erfolgt über ein System aus partiellen Differentialgleichungen.

Es besteht im Wesentlichen aus der Kontinuitätsgleichung für die Massenerhaltung, den Gleichungen für die Impulse in den drei Raumdimensionen und der Gleichung für die Energieerhaltung. Zusätzlich kommen noch die beiden Gleichungen für die turbulente kinetische Energie und die Dissipation hinzu.

Besonders vorteilhaft für den Einsatz im Rahmen dieses Projektes ist die Möglichkeit, die strukturierte Unterlage auf relativ genaue Weise abzubilden, um so die Geländeform im Umkreis der Diasporenstartplätze berücksichtigen zu können.

Im Modellgebiet vorhandene Strukturen wie Hügel oder Gebäude werden durch angeschnittene Zellen, so genannte Cutcells, repräsentiert. Das sind Gitterzellen in denen nur vorher berechnete Flächen, für die Flüsse in und aus der Zelle, und ein bestimmtes Volumen für die Strömung zur Verfügung stehen. Durch diesen Ansatz und durch die frei wählbare Auflösung des Modells, eignet es sich besonders für die Berechnung mikroskaliger Strömungsfelder, die bei in diesem Projekt typischen Transportweiten in der Größenordnung von ca. 100m und darüber besondere Berücksichtigung finden müssen.

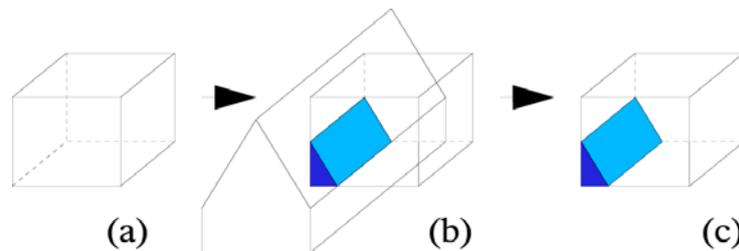


Abb. 1: Schematische Darstellung der Berechnung der Cutcells für eine gegebene Geometrie

Fig. 1: Schematic construction of a cutcell for a given geometry

Das Strömungsmodell ist mit dem Strahlungsmodell von Fu-Liou verknüpft (Fu-Liou, 1997). Dieses kann atmosphärische Gegebenheiten wie Wolken, Ozon, Wasserdampfanteil und verschiedene Aerosole berücksichtigen und die am Boden auftreffende Strahlung berechnen, die dann dazu verwendet werden kann die unteren Luftschichten aufzuheizen. Somit ist es möglich thermisch induzierte Aufwinde, beispielsweise an der sonnenzugewandten Seite eines Hügels, zu modellieren und deren Einfluss auf die Diasporenausbreitung zu untersuchen.

4. DiasporeDispersal

Bei dem Modell DiasporeDispersal handelt es sich um ein Trajektorienmodell mit dem für eine vorgegebene wetterlagen- und geländeformabhängige Hintergrundströmung, die zuvor beispielsweise mit dem Modell ASAM berechnet wurde, für viele verschiedene Diasporen die

Trajektorien berechnet werden können. Dazu werden Advektionsgleichungen für die Diasporen gelöst und mit einer modellierten turbulenten Zeitreihe überlagert. Der Vorteil gegenüber der im ASAM integrierten Ausbreitungsrechnung liegt darin, dass für verschiedene Diasporenmassen, Fallgeschwindigkeiten und Startplätze die Ausbreitung modelliert werden kann, ohne dass jedes mal die relativ zeitaufwendige Berechnung der Strömungsverhältnisse nötig ist. Zudem ist die Modellierung der turbulenten Vertikalbewegung, mit der die Advektion überlagert werden soll, vom Strömungsmodell entkoppelt, und kann so in kürzerer Zeit überprüft und entwickelt werden. Zum derzeitigen Entwicklungsstand wird hierbei die Zeitreihe noch aus einem stochastischen stabilitätsabhängigen Zufallsprozess gewonnen.

5. Das Leistungsspektrum als Ausgangspunkt für die Modellierung turbulenter Zeitreihen

In (Abb.2) sind die normierten Leistungsspektren für die erste Messung vom 01.07 in Deurling (dataA,) und vom 30.09 in Melpitz (dataD) dargestellt. Am 01.07. lagen sehr labile Verhältnisse vor die einer Pasquill- Stabilitätsklasse A entsprachen ($z/L= -2,3$). Als Vergleich dazu die Messreihe vom 30.09 unter leicht stabilen Verhältnissen.

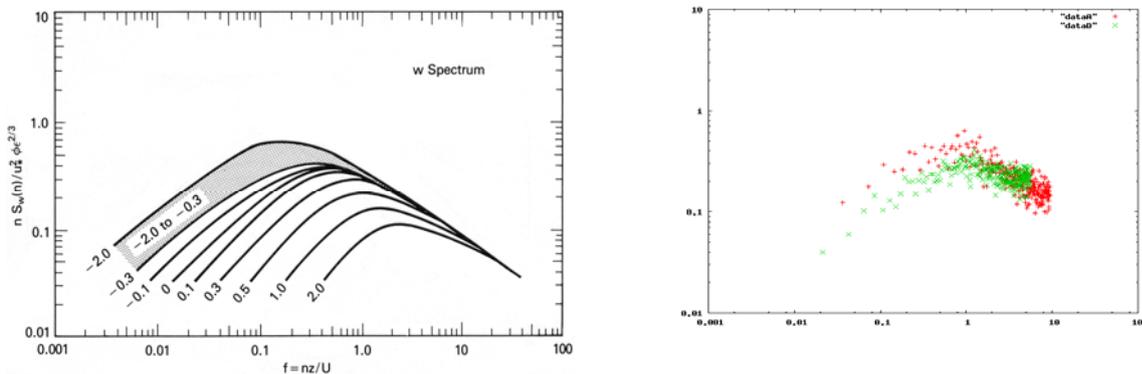


Abb. 2: Normierte Leistungsspektren für die Vertikalgeschwindigkeit. Links die Spektren die sich aus der Theorie ergeben (nach Kaimal et al.) und rechts zwei gemessene Spektren für die Stabilitätsklassen A (dataA) und D (dataD)

Fig. 2: Normalized powerspektra for vertical velocity. left theoretic spectra (after Kaimal et al.), right two measured spectra für stability class A(dataA) and D(dataD)

Obwohl die Messungen u. a. in komplexem Gelände durchgeführt wurden, stimmen die Ergebnisse gut mit den verallgemeinerten Spektren (nach Kaimal et al.) überein. Die charakteristische Abhängigkeit der Spektren von der Stabilität und die höheren Amplituden bei den niederfrequenten Anteilen der Turbulenz bei instabiler Schichtung ist zu erkennen. D.h. die für die verschiedenen Stabilitätsklassen vorgegebenen, generalisierten Leistungsspektren können als Ausgangspunkt für die Synthese turbulenter Zeitreihen herangezogen werden. Dazu werden mit Hilfe des zu einer bestimmten Stabilitätsklasse gehörigen theoretischen Leistungsspektrums und beispielsweise der modellierten turbulenten kinetischen Energie aus einer Simulation des Modells ASAM die mittleren Amplituden für die Schwingungen der einzelnen Wellenzahlen berechnet. Diese werden dann mit einer zufälligen Phase auf den Realteil und Imaginärteil eines Fourier-Spektrums verteilt. Daraus kann dann mittels einer inversen Fouriertransformation eine turbulente Zeitreihe berechnet werden, die in ihrer Struktur den spektralen Vorgaben bei einer bestimmten Stabilitätsklasse entspricht. Für ein mittels einer Fouriertransformation über 2048 Messwerte ermitteltes Leistungsspektrum ist der Vergleich der Rekonstruktion mit der gemessenen Reihe in Abb.3 dargestellt. Die Rekonstruktion hat einen wesentlich realistischeren Charakter als beispielsweise eine normal verteilte Turbulenz, da

auch turbulente Strukturen wie Böen, die für die Diasporenausbreitung von Bedeutung sind, nachgebildet werden können.

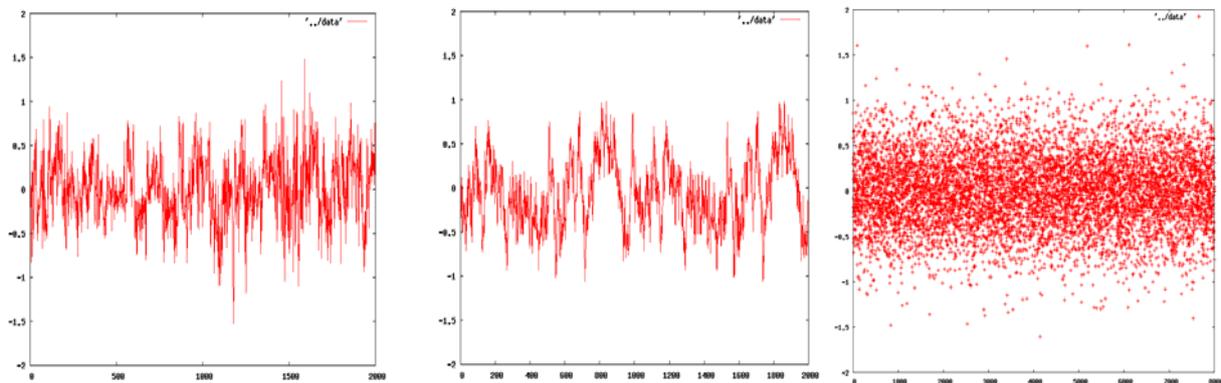


Abb. 3: links: gemessene Zeitreihe für w' (in m/s), mitte: aus dem gemessenen Leistungsspektrum rekonstruierte Zeitreihe mit zufälligen Phaseninformationen für w' , rechts: normalverteilte Turbulenz

Fig. 3: *Left: measured time series for w' in [m/s], middle: from measured powerspektrum reconstructed turbulent time series with random phase, right: normal distributed turbulence*

6. Schlussfolgerungen

Die einer bestimmten Stabilitätsklasse zugeordnete und aus einem gemessenen Leistungsspektrum rekonstruierte Turbulenz (Abb.3) eignet sich um die mit dem Modell **ASAM** berechneten geländeabhängigen Hintergrundströmungen zu überlagern und so eine realistisch wirkende turbulente Atmosphäre zu modellieren. In dieser wird dann mit dem Trajektorienmodell **DiasporeDispersal** die Ausbreitung der Diasporen simuliert. Nicht durch experimentelle Daten abgedeckte Stabilitätsklassen werden durch verallgemeinerte Leistungsspektren ergänzt.

Literatur

- BLACKWELDER, R.F., KAPLAN,R.E., 1976: On the wall structure of the turbulent boundary layer. - Journal of Fluid Mechanics **76**, 89-112.
- FOKEN, T., 2006: Angewandte Meteorologie, 2. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- FU, Q., AND K.-N. LIU, 1993: Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds. - J. Atmos. Sci. **50**, 2008-2025.
- FU, Q., K. LIU ET AL. 1997: On multiple scattering in thermal infrared radiative transfer. - J. Atmos. Sci. **54**, 2799-2812.
- HORN, S., 2006: Implementierung eines Strahlungsmodells in das Strömungsmodell ASAM und Untersuchung der Einflüsse solarer Einstrahlung auf die Strömungsverhältnisse in Straßenschluchten, Diplomarbeit, Fak. für Physik und Geowissenschaften, Universität Leipzig.

- KAIMAL ET AL., 1972: Spectral characteristics of surface layer turbulence. - Quarterly Journal of Royal Meteorological Society **98**, 563-689.
- KAIMAL, J. C., FINNIGAN J. J., 1994: Atmospheric Boundary Layer Flows, Oxford University Press, New York/ Oxford.
- KNOTH, O. 2004: A-SAM, pers. Mitteil. Inst. f. Troposphärenforschung, Leipzig..
- SHAW, R.H., TAVANGAR, J., WARD, D.P., 1983: Structure of the Reynolds Stress in a Canopy Layer. - Journal of Climate and Applied Meteorology **22**, 1922-1931.
- STULL, R. B., 1988: An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/ Boston/ London.
- TETZLAFF, G., ARNOLD, K., A. RAABE, A., ZIEMANN, A., 2002: Observations of area-averaged near-surface wind- und temperature-fields in real terrain using acoustic travel time tomography. - Meteorol. Z. **11**, 273-283.

Anschrift der Autoren

Dipl. Phy. S. Horn, Dr. A. Raabe, Institut für Meteorologie, Universität Leipzig, Stephanstraße 3, 04103 Leipzig

Bestimmung der turbulenten CO₂- und Wasserdampf Flüsse eines Weizenfeldes im oberen Rheintal anhand der Eddy-Kovarianz-Methode

(Projekt INTERREG IIIa 3c.10)

Markus Zygmuntowski (1,2), Daniel Viville (3), Georges Najjar (4), Lutz Jaeger (1) and Pierre Kastendeuch (3)

(1) Meteorologisches Institut der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg, Germany

(2) Geographische Fakultät der Louis-Pasteur-Universität in Strasbourg, France

(3) CGS, (UMR 7517 CNRS/ULP), Strasbourg, France

(4) LSiiT, (UMR 7005 CNRS/ULP), Strasbourg, France

Zusammenfassung

Die Messkampagne zur Bestimmung der turbulenten CO₂- and H₂O-Flüsse in einem elsässischen Weizenfeld in Hohengoeft begann am 1. April 2005 und endete am 31. Dezember 2006. Neben den turbulenten Flüssen von latenter und fühlbarer Wärme sowie dem CO₂-Fluss wurden meteorologische Parameter wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windrichtung und Windgeschwindigkeit, Strahlungsflüsse und Niederschlag ebenfalls gemessen. Zu den Bodenparametern gehören die Bodentemperatur, die Bodenfeuchte und der Bodenwärmestrom. Technische Unwägbarkeiten führten zu unvollständigen Datensätzen. Die Datenausgabe der Flussmessung erfolgte mit einer Frequenz von 20 Hz und in Form von 10 min Mittelwerten. Die Strahlungsflüsse und der Bodenwärmestrom wurden in Ein-Minuten-Mittelwerten abgespeichert. Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Niederschlag wurden in 30 min Mittelwerten gesichert. Die genannten Daten sind in einer spezifisch entwickelten Datenbankstruktur abgelegt. Es wird die Anwendung statistischer Prüfverfahren und die Verwendung der Eddy-Kovarianz-Methode erläutert, um ihre Notwendigkeit und Bedeutung zu schildern. Die Ergebnisse zeigen nicht nur den Umfang einer Qualitätskontrolle und Flusskorrektur sondern auch welche Fehler bei unterlassenem Gebrauch entstehen können.

Determining of turbulent CO₂ and H₂O fluxes over a wheat field in the Upper Rhine Valley by using the eddy-covariance-method

(Project INTERREG IIIa 3c.10)

Abstract

The measurement campaign for determining turbulent CO₂ and H₂O fluxes in an Alsatian wheat field in Hohengoeft started on 1st April 2005 and ended on 31st December 2006. Turbulent fluxes of sensible and latent energy had been measured as well as the CO₂ flux. Meteorological parameters as air temperature, relative humidity, wind direction, wind velocity, radiation fluxes and precipitation had been measured as well as soil temperature, soil moisture, and the soil heat flux. Technical imponderablenesses led to incomplete data sets. The data output of the flux measurement system is stored in a frequency of 20 Hz and in 10 min means. Radiation fluxes and soil heat flux are stored in one minute means. Air temperature, relative humidity, wind direction, wind velocity and precipitation are stored in 30 min means. A specific data base had been developed for this measurements. The application of statistic quality assessment procedures and the eddy-covariance-method are illustrated to explain their necessity and importance. The results present the extent of quality assessment and flux corrections as well as the errors which exist if the methods have not been used.

1. Einleitung

Eine Verdoppelung des CO₂-Gehalts in der Erdatmosphäre führe nach Schätzungen in den 1970er Jahren zu einer Zunahme der mittleren globalen Lufttemperatur von 1.5 °C bis 4.5 °C (CLIMATE RESEARCH BOARD, 1979). Gekoppelte numerische Klimamodelle zeigen diese Unsicherheitsspanne des Anstieg in Berechnungen bis 2100 (IPCC, 2001). Regionale Klimamodelle prognostizieren eine Zunahme der mittleren Lufttemperatur in Mitteleuropa von 0.4 °C pro Dekade (PARRY, 2000) und temporär ausgedehnte immer häufiger auftretende Trockenperioden im Sommer (BAYFORKLIM, 1999). Die anthropogen verursachte Klimaänderung wird seit dem letzten Jahrzehnt als bestätigt oder mindestens für hochwahrscheinlich gehalten (HARVARD UNIVERSITY PRESS, 2003). Die klimatischen Veränderungen werden infolge des reduzierten Wasserangebots zu einer Verringerung der Evaporation führen. Unter diesen hydrologischen Bedingungen ist die Wasserversorgung ein Stressfaktor für Pflanzen und der Wassermangel wird sich auf die Biomasseproduktion auswirken. Die Auswirkungen des zukünftigen Klimas auf das Wachstum und die Lebensdynamik von Ökosystemen erfordert eine Analyse der Wasser- und der Kohlendioxidbilanz von C3- und C4-Pflanzen. C3-Pflanzen (u.a. Weizen) nutzen das zur Verfügung stehende Kohlendioxid besser aus als C4-Pflanzen (u.a. Mais). Daher ist die Ertragssteigerung bei einer Erhöhung des CO₂-Gehalts bei C3-Pflanzen größer als bei C4-Pflanzen (KRUPA und KICKERT, 1993). Dies führt zu veränderten CO₂ Bilanzen. Das INTERREG IIIa Nr.3c.10 Projekt betreibt auf diesem Gebiet Forschung an drei Messstandorten im oberen Rheintal (Weizen / Hohengoef, Kiefern / Hartheim, Mais / Eimeldingen). Die hier dargestellten Daten wurden im elsässischen Hohengoef für Winterweizen (*triticum aestivum*) erhoben. Im Folgenden soll die Methodik geschildert werden, mit der die Wasserdampf- und Kohlendioxidbilanzanalyse durchgeführt wird.

2. INTERREG Messstelle Hohengoef

2.1 Untersuchungsstandort

Hohengoef ist ein kleiner Ort 25 km nordwestlich von Strasbourg im Elsass. Insgesamt besteht das ca. 240 m breite und 400 m lange Weizenfeld aus drei kleineren Parzellen. Von Südost nach Nordwest erstreckend unterliegt das Weizenfeld einem Höhenanstieg von 26 m in der mittleren und östlichen Parzelle. Die Aussaat des Winterweizens erfolgt jeweils im Oktober und die Ernte in der zweiten bis dritten Juliwoche des darauffolgenden Jahres. 2004/2005 befand sich auf der westlichen Parzelle noch ein Maisfeld.

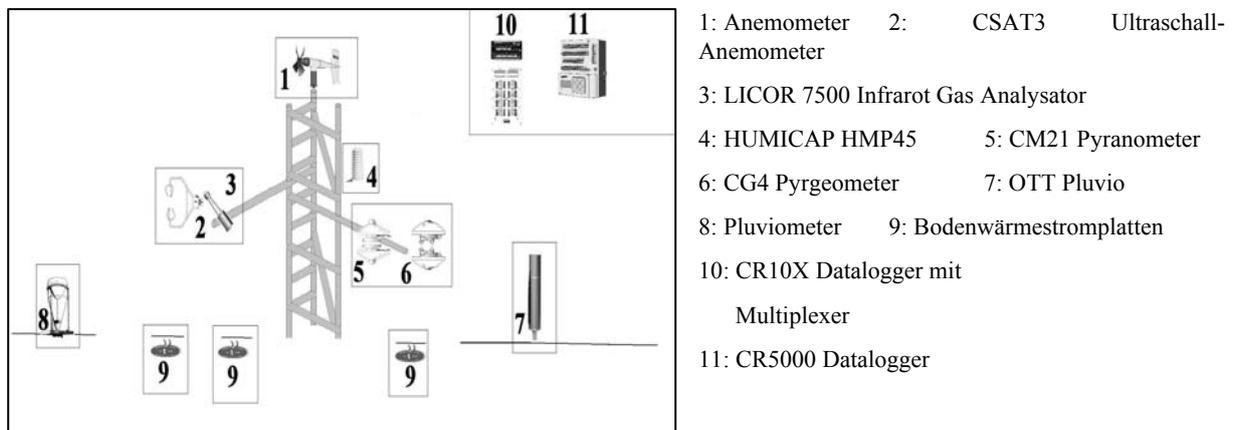


Abb. 1: Messgeräte in Hohengoef

Fig. 1: Measurement equipment in Hohengoef

2.2 Messsysteme

Der Messturm befindet sich im Zentrum des Weizenfeldes mit der hier dargestellten Anordnung von Messgeräten (Abb. 1). Der CR5000 dient der Speicherung der hochfrequenten Daten. Hierzu gehören Windrichtung und die drei Windgeschwindigkeitskomponenten, gemessen durch das CSAT3, CO₂/H₂O Konzentration gemessen durch das LICOR 7500, die Strahlungsflüsse, gemessen durch je ein dem Erdboden zu- und abgewandtes CM21 und CG4 sowie der Bodenwärmestrom, gemessen durch drei Bodenwärmestromplatten. Der CR10X, erweitert mit einem Multiplexer, dient der Speicherung der niederfrequenten Daten. Windrichtung und horizontale Windgeschwindigkeit werden durch ein YOUNG Anemometer gemessen, relative Luftfeuchte und Lufttemperatur durch ein HUMICAP HMP45, die Bodenfeuchte durch sieben horizontal angeordnete CS616 Sensoren und einen vertikal angeordneten CS616 Sensor (Abb. 2), die Bodentemperatur durch sieben T107 Temperatur Sensoren (Abb. 2) sowie der Niederschlag durch ein automatisches OTT Pluvio. Die Bodenfeuchtespannung wird außerdem manuell durch sieben Tensiometer (Abb. 2) und der Niederschlag durch ein Pluviometer erfasst.

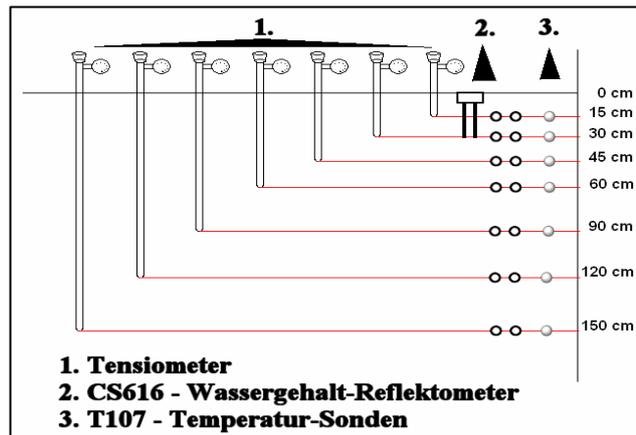


Abb. 2: Bodensensorik im Profil

Fig. 2: Soil sensors technology in cross section

3. Methodik

3.1 Datenmanagement und Qualitätskontrolle

Strukturiertes Datenmanagement ermöglicht nicht nur zum aktuellen Zeitpunkt, sondern auch bei späterem Bedarf eine schnelle zielgerichtete Selektion der Daten. Die Datenausgabe des CR10X ist leicht zu handhaben. Der CR5000 speichert Informationen inklusive Diagnosegrößen in drei Dateien ab (10 min Mittelwerte der unkorrigierten turbulenten CO₂- und H₂O-Flüsse, 1 min Mittelwerte der Strahlungsflüsse, 20 Hz Daten zur Flussberechnung). Alle Dateien werden im binären und ASCII Format abgespeichert. Die Dateien sind in einer entsprechenden Verzeichnisstruktur in BIN und ASC Nomenklatur sowie mit Zeitmarkern abgelegt. Alle ASCII Dateien werden auf 30 min Dateien zurechtgeschnitten. Diese Dateien benötigen im Gegenteil zur Ausgangsdatei mit einer Größe von ca. 1GB nur noch eine Speicherbelastung von ca. 4 MB und ermöglichen schnellere Berechnungen.

Ausgangspunkt für alle weiteren Berechnungen sind die 30 Minuten Dateien. Enthält eine Datei weniger als 36000 Werte, so wird sie verworfen. In allen folgenden Tests und Korrekturen führen Fehlschläge zur Belegung mit einem definierten Fehlwert. Zunächst erfolgt ein Output-Range-Test für das CSAT3. Der David-Test auf Normalverteilung wird bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0 % auf ein Intervall von 30 Werten angewendet (SACHS, 1997). Die Normalverteilung einer Datenreihe ist die Voraussetzung für den Grubbs-Ausreißer-Test (GRUBBS, 1969). Er wurde für ein Konfidenzniveau von 99 % angewendet. Im Anschluss erfolgten einige Plausibilitätstests. Für die Windgeschwindigkeitskomponenten wurden Werte größer 60 m/s als Fehlwerte interpretiert (VDI, 2000 und DEGAETANO, 1997). Für den Luftdruck wurde der niedrigste und höchste jemals in Deutschland gemessene Luftdruck als untere und obere Grenze gewählt. Für die Massen- und Molarkonzentration des

CO₂ wurde das Minimum der letzten Eiszeit von 180ppm gewählt (PETIT ET AL., 1999). Das Maximum wurde anhand der 30 Minuten Mittelwerte festgelegt. Ebenso ergaben sich Molar- und Massenkonzentration von H₂O. In einem zweifachen Despiking wurde im ersten Durchgang die gesamte 30 Minuten Datei mit +/-4 □ auf Spikes durchgesehen. Im zweiten Durchgang erfolgte die Kontrolle auf der Basis von Intervallen mit jeweils 30 Werten und einem Limit von +/-3.5 □. Datenreihen mit mehr als 1 % Spikes wurden vollständig mit Fehlwerten belegt (HØJSTRUP, 1993). Nach diesen Qualitätskontrollen wurde die neue geprüfte 30 Minuten Datei mit Kennzeichnung separat abgespeichert. Auf ihr basieren alle weiteren Berechnungen. Um eine Qualitätsgruppierung vorzunehmen wurde im Anschluss ein Stationaritätstest für alle Parameter durchgeführt (FOKEN UND WICHURA, 1996).

3.2 Flusskorrekturen

Mittels einer doppelten Koordinatenrotation wird das Koordinatensystem des CSAT3 in die Stromlinien hineingedreht (KAIMAL UND FINNIGAN, 1994). Anschließend erfolgt die Berechnung der Kovarianzen in folgender Form (FOKEN, 2003):

$$\overline{w'x'} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} [(w_k - \overline{w})(x_k - \overline{x})] \quad (1)$$

mit w als vertikale Windkomponente und x als Skalar. Auf dieser Beziehung basiert die Eddy-Kovarianz-Methode, welche als direktes Messverfahren ohne die Verwendung empirischer Koeffizienten bezeichnet wird (BUSINGER, 1986). Wesentliche Voraussetzungen sind stationäre Bedingungen, eine horizontale Homogenität der Unterlage und ein vollständig entwickeltes Turbulenzfeld (FOKEN, 2003). Im Folgenden sind noch einige Korrekturen notwendig. Die Umrechnung der Schalltemperatur in die tatsächliche Lufttemperatur bedarf der Schotanus-Korrektur (SCHOTANUS et al., 1983). Die Anpassung der spektralen Auflösung des Messsystems an das aktuell vorliegende Turbulenzspektrum wird mit einer Spektralkorrektur durchgeführt (MOORE, 1986). Eine Dichtekorrektur wird durchgeführt, um Dichtefluktuationen zu berücksichtigen (WEBB, 1982; WEBB et al., 1980). Zugrunde gelegt wird dabei eine Tagesaktuelle Bestandeshöhe aus Messungen und einer daraus resultierenden Interpolation.

4. Ergebnisse

Die Auswirkungen der im Vorfeld genannten statistischen Tests zur Eliminierung von Fehlwerten können prozentual wiedergegeben werden (Abb. 3). Dargestellt ist für den Monat Juni 2005, auf der Basis von jeweils 30 Minuten Intervallen der 20 Hz Rohdaten, der prozentuale Wert der Ausreißer in Relation zu einer Einheit von 36000 Werten für die vertikale Windgeschwindigkeit. Fehlwerte und Werte oberhalb von 0.3 % wurden schwarz dargestellt. Neben den Messausfällen zwischen DOY 166 und 168 sowie DOY 177 und 179 sind die Korrekturen am Tage größer als in der Nacht. Auf der Basis von geprüften und korrigierten 20 Hz Daten wurden 30 min Mittelwerte für den CO₂ Fluss berechnet (Abb. 4). Diesen sind basierend auf 10 min Mittelwerten der Rohdaten die unkorrigierten Werte gegenübergestellt. Ein Tagesgang ist zu erkennen. Die Abweichungen der beiden Flüsse sind in der ersten Monatshälfte groß, im Gegensatz zur zweiten Monatshälfte. Tendenziell geben sie einen ähnlichen Verlauf wieder.

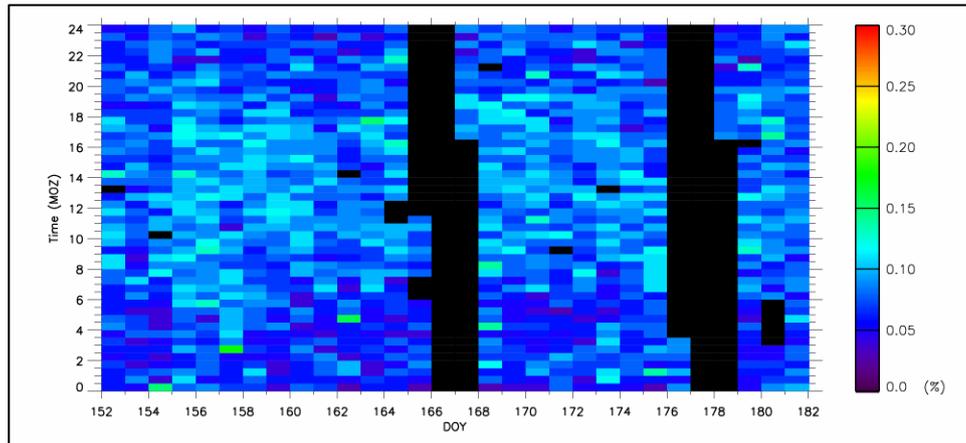


Abb. 3: Fehlwerte in (%) der vertikalen Windgeschwindigkeitskomponente nach Ausreißer-
tests für Juni 2005

Fig. 3: *Missing values in (%) of the vertical wind velocity component after outlier tests for
June 2005*

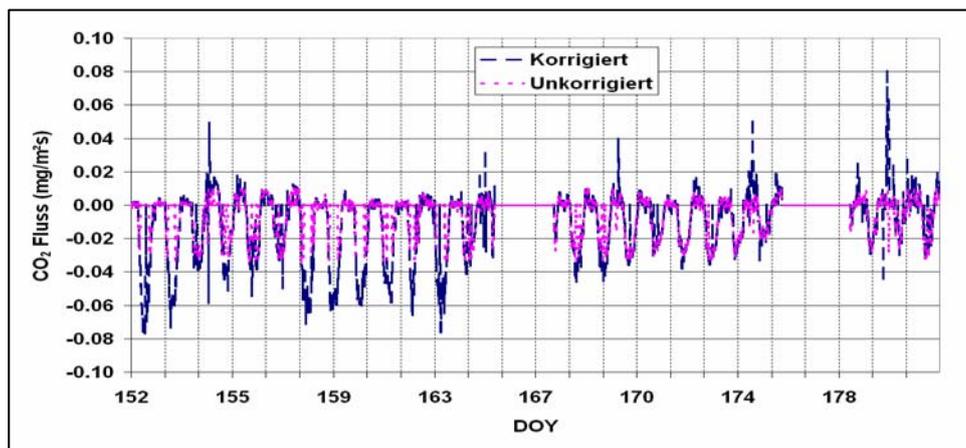


Abb. 4: CO₂-Fluss in (mg/m²s) kontrollierter und unkontrollierter Daten im Juni 2005

Fig. 4: *CO₂ flux in (mg/m²s) of controlled and not controlled data in June 2005*

5. Schlussfolgerungen

Es zeigt sich, dass eine Datenkontrolle unumgänglich ist. Der Tagesgang in den Ergebnissen der Ausreißertests für die vertikale Windgeschwindigkeitskomponente ist auf den Tagesgang derselbigen zurückzuführen. Bei der Kontrolle der Daten müssen diese kleinskaligen Periodizitäten berücksichtigt werden. In der Gegenüberstellung der CO₂-Flüsse sind in beiden Fällen die Phasen der Assimilation am Tage mit negativen Flüssen und die Phasen der Respiration in der Nacht mit positiven Flüssen zu erkennen. Unterschiede in der Amplitude sind zum einen durch die Korrekturen als auch durch die verschiedene zeitliche Auflösung der Datenbasis zu erklären. Es wird weiterhin angestrebt die korrigierten Flüsse abermals einer Qualitätsanalyse zu unterziehen.

Literatur

- BAYFORKLIM, Bayerischer Klimaforschungsverbund, 1999: Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen. Abschlußbericht des Bayerischen Klimaforschungsverbundes, Universität München.
- BUSINGER, J. A., 1986: Evaluation of the Accuracy with Which Dry Deposition Can Be Measured with Current Micrometeorological Techniques. - J. Appl. Meteorol. **25**, 1100-1124.
- CLIMATE RESEARCH BOARD, 1979: Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment. National Academy of Sciences, Washington, DC.
- DEGAETANO, A. T., 1997: A Quality-Control Routine for Hourly Wind Observations. - J. Atmosph. Oceanic Techn. **14**, 308-317.
- FOKEN, T., 2003: Angewandte Meteorologie. - Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- FOKEN, T.; WICHURA, B., 1996: Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. - Agric. Forest Meteorol. **78**, 83-105.
- GRUBBS, F. E., 1969: Procedures for detecting outlying observations in samples. - Technometrics 11, 1-21. Februar 1969.
- HARVARD UNIVERSITY PRESS, 2003: The Discovery of Global Warming.
- HØJSTRUP, J., 1993: A statistical data screening procedure. - Meas Sci. Techn. **4**, 153-157.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001: Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Publ. Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Nohuer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A.. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- KAIMAL, J. C.; FINNIGAN, J. J., 1994: Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement, 289 pp
- KRUPA, S. V.; KICKERT, R. N., 1993: The greenhouse effect: the impacts of carbon dioxide (CO₂), ultraviolet-B (UV-B) radiation and ozone (O₃) on vegetation. - Vegetatio **104/105**, 223-238.
- MOORE, C. J., 1986: Frequency response corrections for eddy correlation systems. - Boundary-Layer Meteorol. **37**, 17-35.
- PARRY ML [Ed.], 2000: Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe: The Europe ACACIA Project. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, UK.
- PETIT, J. R. ET AL., 1999: Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. - Nature **399**, 429-436.
- SACHS, L., 1997: Angewandte Statistik, 8. Auflage. - Springer Verlag Berlin/Heidelberg.
- SCHOTANUS, P.; NIEUWSTADT, F. T. M.; DE BRUIN, H. A. R., 1983: Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. - Boundary-Layer Meteorol. **26**, 81-93.
- VDI, 2000: Umweltmeteorologie, Meteorologische Messungen für Fragen der Luftreinhaltung – Wind. Beuth Verlag, Berlin, VDI 3786, Blatt 2, 33 pp.

WEBB, E. K., 1982: On the correction of flux measurements for effects of heat and water transfer. - *Boundary-Layer Meteorol.* **23**, 251-254.

WEBB, E. K., PEARMAN, G. I. & R. LEUNING, 1980: correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. - *Quart. J. R. Met. Soc.* **106**, 85-100.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Met. Markus Zygmuntowski, Meteorologisches Institut der Albert-Ludwigs-Universität, Werderring 10, D-79085 Freiburg, Geographische Fakultät der Louis-Pasteur-Universität, Rue de l'Argonne 3, F-67083 Strasbourg Cedex

Dr. Daniel Viville, CNRS-ULP (UMR 7517), Centre de Géochimie de la Surface, Ecole et Observatoire de Sciences de la Terre, Rue Blessig 1, F-67084 Strasbourg Cedex

Maître de conférences Dr. Georges Najjar, Geographische Fakultät der Louis-Pasteur-Universität, Rue de l'Argonne 3, F-67083 Strasbourg Cedex, LSiiT, (UMR 7005 CNRS/ULP), Pôle API, Bd Sébastien Brant, BP 10413, F-67412 Illkirch CEDEX

Prof. Dr. Lutz Jaeger, Meteorologisches Institut der Albert-Ludwigs-Universität, Werderring 10, D-79085 Freiburg

Maître de conférences Dr. Pierre Kastendeuch, CNRS-ULP (UMR 7517), Centre de Géochimie de la Surface, Ecole et Observatoire de Sciences de la Terre, Rue Blessig 1, F-67084 Strasbourg Cedex

Natürliche Variabilität des CO₂-Flusses in einem Maisbestand

Irene Lehner, Roland Vogt und Eberhard Parlow

Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung, Universität Basel, Basel.

Zusammenfassung

Von Juni 2004 bis Oktober 2006 wurde im Rahmen des INTERREG IIIA Projekt Nr. 3c.10 'Auswirkungen von Klimaänderungen auf Pflanzenbestände am Oberrhein' der CO₂-Fluss in einem Maisbestand mit der Eddy-Kovarianz-Methode bestimmt. Der Vergleich der drei Vegetationsperioden zeigt die natürliche, insbesondere durch die Witterung bedingte Variabilität auf. Dabei ist das Zusammenspiel von photosynthetisch aktiver Strahlung, Temperatur und Niederschlag von grosser Bedeutung für das Wachstum der Pflanzen und somit auch für die CO₂-Assimilationsleistung des Bestandes.

Natural variability of CO₂-flux in a maize crop

Abstract

In the framework of the INTERREG IIIA project Nr. 3c.10 'Impacts of climate change on vegetation in the Upper Rhine Valley' measurements were carried out in a maize canopy from June 2004 until October 2006. The CO₂ flux was determined by the eddy-covariance method. The comparison of the three vegetation periods shows the natural variability which is mainly given by the specific weather conditions. The interaction of photosynthetic active radiation, temperature and precipitation is of great importance for the growth of the plants and therefore also for the amount of CO₂ assimilation of the canopy.

1. Einleitung

Der neueste IPCC Report (2007) prognostiziert für die nächsten zwei Dekaden einen globalen Temperaturanstieg von 0.2 – 0.4 °C. Zusätzlich zur Erwärmung werden auch Änderungen anderer Klimatelemente wie beispielsweise des Niederschlags erwartet. Das Klima am Oberrhein ist bereits heute durch relativ hohe Temperaturen und geringe Niederschlagsmengen geprägt. Daher können hier quasi in-situ Messungen künftiger Klimabedingungen anderer Gebiete Europas durchgeführt werden. Das INTERREG IIIA Projekt Nr. 3c.10 'Auswirkungen von Klimaänderungen auf Pflanzenbestände am Oberrhein' untersuchte im Zeitraum 2004 bis 2006 das komplexe Wechselspiel von atmosphärischem Kohlenstoffangebot und Wasserversorgung im Hinblick auf eine witterungsgesteuerte Biomassenproduktion. Es wurden drei verschiedene Testpflanzen (Mais, Winterweizen und Kiefer) ausgewählt, die sich bezüglich Photosynthese, Wasserbedarf und Trockenheitsresistenz unterscheiden. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die Messungen im Mais.

2. Standort

Der Messstandort befand sich im südlichen Oberrheingraben, ca. 10 km nördlich von Basel (47°38'21''N, 7°35'58''E). Abbildung 1 zeigt ein Luftbild des Standortes mit seiner flachen, fast ausschliesslich landwirtschaftlich genutzten Umgebung. Der Messturm stand in einem Maisfeld (*zea mays* L.) von 320 m x 210 m und ein minimaler Fetch von 100 m war gewährleistet. Der Mais wurde jeweils Ende April mit ~9 Pflanzen pro Quadratmeter und einem mittleren Reihenabstand von 0.7 m gesät. Im Zeitraum Oktober – November wurden die Kolben geerntet und die restliche Pflanze wenige Wochen nach der Ernte untergepflügt. Bis zur neuen Aussaat lag das Feld jeweils brach.



Abb. 1: Luftaufnahme des Messstandortes (Photo: R. Vogt)

Fig. 1: Air photograph of the study site (Photo by R. Vogt)

3. Messanordnung

Abbildung 2 zeigt ein Schema des sechs Meter hohen Messmastes. Während der Feldbearbeitung im Frühjahr und im Herbst wurde der Mast abgebaut, um die Mastumgebung möglichst ungestört zu erhalten. Die Messungen begannen Ende Mai 2004 und dauerten bis Anfang Oktober 2006.

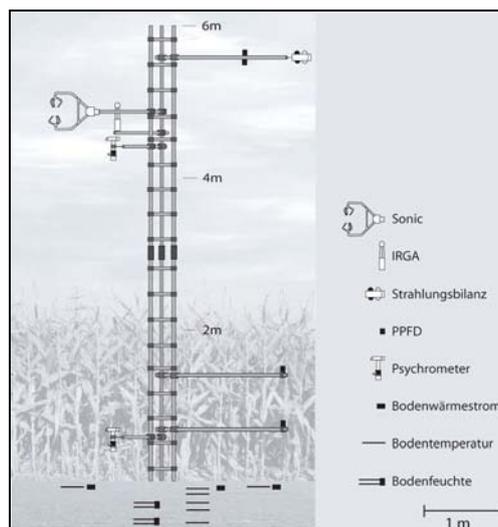


Abb. 2: Schematischer Aufbau des Hauptmessmastes

Fig. 2: Schematic view of the main tower

Zur Bestimmung der Flüsse von CO_2 , Wasserdampf, Wärme und Impuls wurden ein Ultraschallanemometer (CSAT3) sowie ein open-path $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ Infrarotgasanalysator (Li7500) eingesetzt, deren Rohdaten (20 Hz) erfasst wurden. Um einen möglichst optimalen Fetch zu gewährleisten, musste die Messhöhe mehrfach angepasst werden.

Alle Komponenten der Strahlungsbilanz wurden auf 6 m Höhe mit einem Strahlungsbilanzgeber (CNR1) erfasst. Die Photonenflussdichte im photosynthetisch relevanten Wellenlängenbereich von $0.4 - 0.7 \mu\text{m}$ (PPFD) wurde auf zwei Höhen im Bestand sowie die entsprechende Albedo auf 6 m Höhe gemessen (Li190SB). Die Bodenmessungen umfassten ein Temperaturprofil (-5, -10, -20, -30, -50 cm, CS107b), Feuchtemessungen (-10, -30 cm, CS616) sowie die Bestimmung des Bodenwärmestroms (3x -5 cm, Rimco HFP-CN3). Weitere Messungen umfassten Lufttemperatur und -feuchte (ventilierter Psychrometer) sowie den Niederschlag. Die langsamen Daten wurden als Minutenmittelwerte abgespeichert.

4. Methoden

Die statistischen Grössen (Mittelwerte, Standardabweichungen, Kovarianzen) wurden mit der Eddy-Kovarianz-Methode und einem Mittelungsintervall von 30 Minuten berechnet. Die durch das Ultraschallanemometer bedingte Strömungsdeformation wurde mit einer im Windkanal ermittelten Matrix korrigiert (VOGT, 1995; FEIGENWINTER, 2004). Danach wurde das Koordinatensystem unter Anwendung der planar fit Methode (WILCZAK *et al.*, 2001) in den mittleren Wind gedreht.

Bedingt durch Sensorseparation, Pfadlängenmittelung und Mittelungsintervall ergibt sich eine Dämpfung der kospektralen Dichte. Zur Korrektur wurden verschiedene Transferfunktionen angewendet (MOORE, 1986; KAIMAL *et al.*, 1989; MONCRIEFF *et al.* 1997). Die durch die Feuchte beeinflusste Ultraschallanemometer-Temperatur wurde nach SCHOTANUS *et al.* (1983) korrigiert. Die Dichtekorrektur nach WEBB *et al.* (1980) berücksichtigt die temperaturbedingte Dichteschwankung von skalaren Grössen wie CO₂ oder H₂O. Da die beiden letzteren Korrekturen voneinander abhängig sind, wurde der Fluss iterativ bestimmt.

Die Datenverfügbarkeit beträgt nach erfolgter Qualitätskontrolle rund 85 %. Der Grossteil der Datenausfälle ist auf den Mastabbau und nicht funktionierende Logger resp. Speicherkarten zurückzuführen. Eine Ausnahme stellt der open-path Infrarot-Gasanalysator dar. Insbesondere bedingt durch seine Sensitivität bezüglich Niederschlag auf den optischen Fenstern weist er nur 54.7 % Datenverfügbarkeit auf.

Für eine Bilanzierung des CO₂ müssen somit geeignete Methoden gefunden werden, diese Lückenwerte mit spezifischen Parametrisierungsansätzen zu modellieren. Bei vorhandener Vegetation wurde für die Tag-Werte ein Ansatz nach MICHAELIS und MENTEN (1913, in FALGE *et al.*, 2001) angewendet, worin der Net Ecosystem Exchange (*NEE*) im Wesentlichen eine Funktion der photosynthetisch aktiven Strahlungsflussdichte ist. Während der Brache sowie nachts findet keine Photosynthese statt und obgenannter Ansatz ist somit nicht brauchbar. Für die Tageswerte wurde die beste Parametrisierung mit einer linearen Funktion der Bodentemperatur gefunden. Zur Bestimmung der nächtlichen Respiration wurde eine exponentielle Funktion der Bodentemperatur nach VAN'T HOFF (1898, in LLOYD und TAYLOR, 1994) verwendet. Mit dieser Funktion wurden nicht nur Lücken gefüllt, sondern auch Werte ersetzt, welche unter schwach turbulenten Bedingungen gemessen wurden, da unter diesen die Flüsse mit der Eddy-Kovarianz-Methode unterschätzt werden (*u**-Korrektur, FALGE *et al.*, 2001). Längere, komplette Datenlücken wurden mit Hilfe eines neuronalen Netzwerkes (Neuralyst V1.4, Cheshire Engineering Corporation) auf Tagesbasis modelliert.

5. Meteorologische Rahmenbedingungen

Für die Interpretation der CO₂-Dynamik ist die Kenntnis der meteorologischen Rahmenbedingungen Voraussetzung. Die Hauptwindrichtungen waren von NNW, WSW und ESE. Abbildung 3 gibt einen Überblick über weitere wichtige meteorologische Grössen.

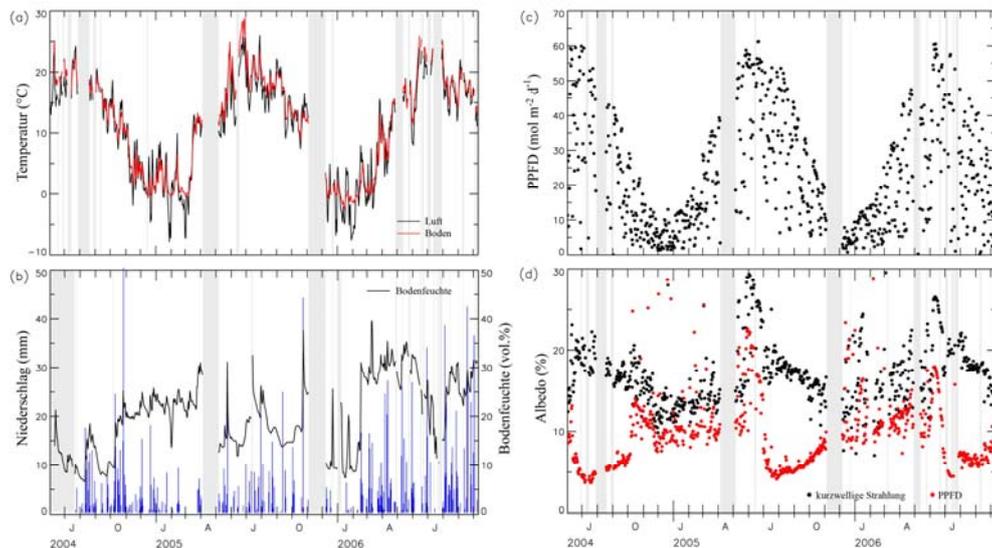


Abb. 3: Tagesmittel von: (a) Lufttemperatur und Bodentemperatur in 5 cm Tiefe, (b) volumetrische Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe und Tagessumme des Niederschlages, (c) PPFD und (d) mittlere Albedo der kurzwelligigen Strahlung und der PPFD. Zeiträume mit Schneebedeckung sind in Graphik (d) nicht enthalten. Graue Flächen stehen für Datenlücken

Fig. 3: Daily means of: (a) air temperature and soil temperature in a depth of 5 cm, (b) soil moisture in a depth of 10 cm and daily sum of precipitation, (c) PPFD, and (d) mean albedo of shortwave radiation and PPFD. Time periods with snow cover are not shown in graph (e). Grey areas stand for gaps

6. Resultate

Der Verlauf des *NEE* ist in Abbildung 4 dargestellt. Während der Nacht ist dieser Fluss ausschliesslich durch die Respiration gegeben (positive Werte), welche hauptsächlich von der Bodentemperatur abhängig ist.

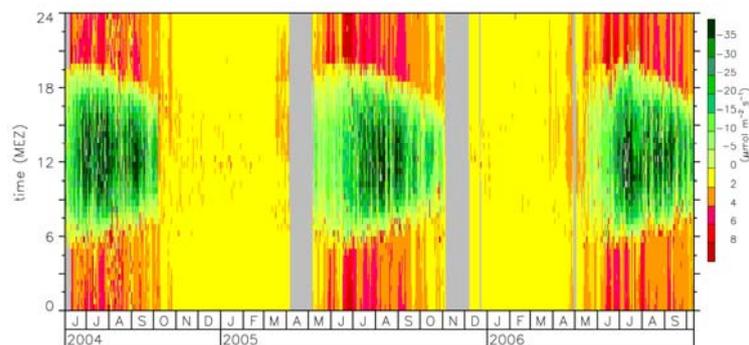


Abb. 4: *NEE* vom 01.06.2004 bis 10.10.2006. Graue Flächen stehen für Datenlücken

Fig. 4: *NEE* from 01.06.2004 until 10.10.2006. Grey areas stand for gaps

Der *NEE* während der Vegetationsperiode widerspiegelt das Pflanzenwachstum: der rasche Anstieg bis zu den Höchstwerten von ca. $-40 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ im Juli und die Abnahme mit zunehmender Reifung der Frucht. Das Wachstum der Pflanzen (Abb. 5a) ist stark von den Witterungsverhältnissen abhängig (vgl. Abb. 3). Insbesondere zu Beginn ist das „richtige“ Zusammenspiel von Temperatur und Niederschlag entscheidend. Während der Brache zeigt

sich die starke Temperaturabhängigkeit der Respiration. Eine weitere wichtige Steuergrösse ist die zur Verfügung stehende Strahlung. Als C4-Pflanze erreicht Mais jedoch keine Lichtsättigung (Abb. 5b). Es wurde keine Abhängigkeit von der Bodenfeuchte gefunden. Auch das Dampfdruckdefizit führt erst bei Werten >20 hPa und Temperaturen $>30^{\circ}\text{C}$ zu einer signifikanten Verringerung des NEE (nicht gezeigt). Alle Grössen weisen auch eine zeitlich Abhängigkeit und damit eine Modifizierung durch das Entwicklungsstadium der Pflanzen auf. Der Zusammenhang ist bedingt durch die sich verändernde Effizienz der CO_2 -Assimilation (Abb. 5c) sowie durch die Menge der vorhandenen photosynthetisch aktiven Biomasse.

Die unterschiedlichen Rahmenbedingungen während der Vegetationsperiode führen zu unterschiedlichen Tagessummen (Abb. 5d) und damit zu unterschiedlichen „Jahresbilanzen“ mit einer Variabilität von $\pm 10\%$. Im Zeitraum Juni bis Oktober wurden 2004 ~ 940 g C m^{-2} gebunden, 2005 waren es ~ 800 g C m^{-2} und 2006 ~ 850 g C m^{-2} . Für das Jahr 2004 ist zu beachten, dass bis zur Ernte Anfang Oktober ~ 990 g C m^{-2} gebunden wurden und bis Ende Monat bereits wieder ~ 50 g C m^{-2} respiriert wurden.

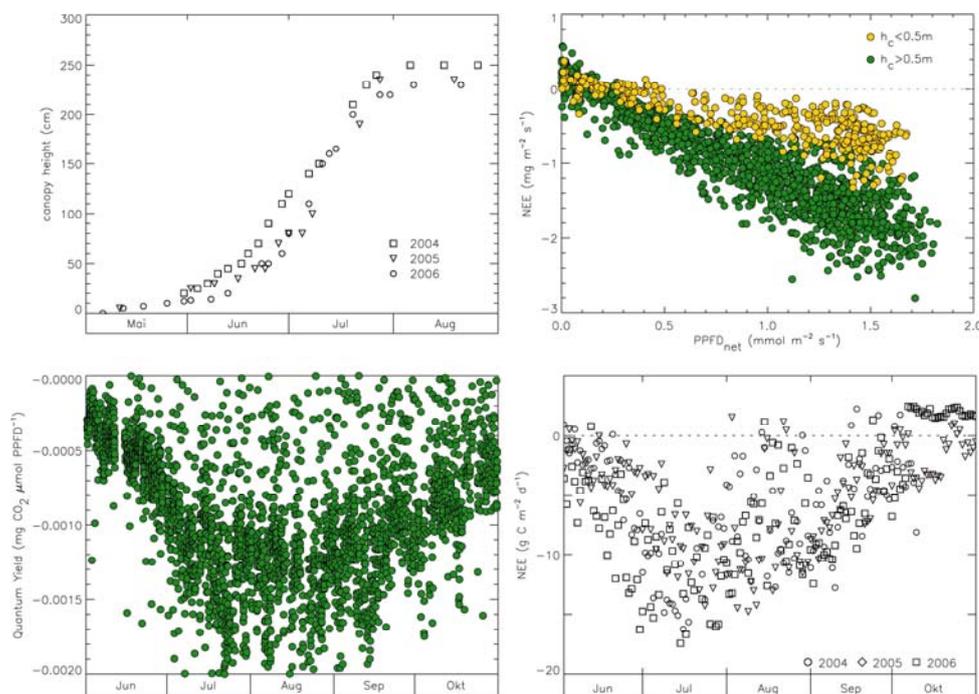


Abb. 5: (a) Vegetationshöhe der drei Jahre von Aussaat bis zum Erreichen der maximalen Höhe, (b) PPFD vs. NEE im Temperaturoptimum ($22\text{-}28^{\circ}\text{C}$) für die Nettophotosynthese, (c) Lichtnutzungseffizienz (quantum yield) während der Vegetationsperiode 2005, (d) Tagessummen des NEE der drei Vegetationsperioden

Fig. 5: (a) Canopy height for all three years from sowing until final canopy height is reached, (b) PPFD vs. NEE at optimum temperatures ($22\text{-}28^{\circ}\text{C}$) for net-photosynthesis, (c) quantum yield for vegetation period 2005, (d) daily sums of NEE for the three vegetation periods

7. Schlussfolgerungen

Mit der verwendeten Methodik wird direkt das Resultat aus Assimilation und Respiration, der NEE , bestimmt und weist somit ihre Stärken insbesondere während den Assimilationsperioden auf. Unter nächtlichen, oft nur schwach turbulenten Bedingungen zeigen sich jedoch Schwächen und die Respiration wird häufig unterschätzt. Diese ist jedoch für eine verbesserte Modellierung der C-Dynamik, sowohl für Datenlücken wie für die Hochskalierung der Mes-

sungen, notwendig. Hier ist eine Vertiefung des Prozessverständnisses, z.B. durch die Verwendung von anderen Methoden wie Kammermessungen oder der in-situ Isotopenanalyse, notwendig, um die regulierenden Mechanismen zu erfassen.

Die saisonale und interannuelle Variabilität des *NEE* kann dennoch zu einem grossen Teil mit den Steuergrössen der photosynthetisch aktiven Strahlung, der Temperatur und dem Entwicklungsstadium der Pflanzen erklärt werden. Die Variabilität macht auch deutlich, dass längerfristige, kontinuierliche (d.h. auch die Brache umfassende) Messungen notwendig sind.

Literaturverzeichnis

- FALGE E., D. BALDOCCI, R. OLSON, P. ANTHONI, M. AUBINET, C. BERNHOFER, G. BURBA, R. CEULEMANS, R. CLEMANT, H. DOLMAN, A. GRANIER, P. GROSS, T. GRÜNWARD, D. HOLLINGER, N.-O. JENSEN, G. KATUL, P. KERONEN, A. KOWALSKI, C. LAI, B.E. LAW, T. MEYERS, J. MONCRIEFF, E. MOORS, J.W. MUNGER, K. PILEGAARD, Ü. RANNIK, C. REBMANN, A. SUYKER, J. TENHUNEN, K. TU, S. VERMA, T. VESALA, K. WILSON, S. WOFSY, 2001: Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. – *Agric. For. Meteorol.* **107**, 43-69.
- FEIGENWINTER C., 2004: Matrix Calibration for Ultrasonic Campbell Sci. CSAT3 #118. – Technical report mcr lab, University of Basel.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The physical Science Basis.
- KAIMAL, J.C., S.F. CLIFFORD, R.J. LATAITIS, 1989: Effect of finite sampling on atmospheric spectra. – *Boundary-Layer Meteorol.* **47**, 337–347.
- LLOYD J., J.A. TAYLOR, 1994: On the temperature dependence of soil respiration. – *Funct. Ecol.* **8**, 315-323.
- MONCRIEFF J.B., J.M. MASSHEDER, H. DE BRUIN, J. ELBERS, T. FRIBORG, B. HEUSINKVELD, P. KABAT, S. SCOTT, H. SOEGAARD, A. VERHOEF, 1997: A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. – *J. Hydrol.* **188-189**, 589-611.
- MOORE C.J., 1986: Frequency response corrections for eddy correlation systems. – *Boundary-Layer Meteorol.* **37**, 17-35.
- SCHOTANUS P., F.T.M. NIEUWSTADT, H.A.R. DE BRUIN, 1983: Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. – *Boundary-Layer Meteorol.* **26**, 81-93.
- VOGT R., 1995: Theorie, Technik und Analyse der experimentellen Flussbestimmung am Beispiel des Hartheimer Kiefernwaldes – Ein Beitrag zu den Energiebilanzuntersuchungen im REKLIP. – Diss. Phil.-Nat.-Fak. Univ. Basel.
- WEBB E.K., G.I. PEARMAN, R. LEUNING, 1980: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. – *Quart. J. R. Met. Soc.* **106**, 85-100.
- WILCZAK, J. M., S.P. ONCLEY, S.A. STAGE, 2001: Sonic anemometer tilt correction algorithms. – *Boundary-Layer Meteorology* **99**, 127-150.

Anschrift der Autoren

Irene Lehner, Dr. Roland Vogt, Prof. Dr. Eberhard Parlow, Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung, Universität Basel, Klingelbergstrasse 27, CH-4057 Basel

Verifikation des Wasserhaushaltsmodells AMBAV mit Hilfe der TDR-Messtechnik

Klaus-Dieter Buchwald

Deutscher Wetterdienst, Abteilung Agrarmeteorologie, Niederlassung Weihenstephan

Zusammenfassung

Die Bodenfeuchte ist einer der wichtigsten Einflussfaktoren für die Pflanzenentwicklung. Zur Bestimmung des Bodenwassergehaltes existieren zahlreiche Messmethoden, andererseits lässt sich die Bodenfeuchte auch durch Wasserhaushaltsmodelle berechnen. Im Rahmen eines Projekts an der agrarmeteorologischen Niederlassung des DWD in Weihenstephan wird der Einsatz der TDR-Sonde mit der konventionellen Bohrstockmethode verglichen. Die Bodenfeuchtemessungen zeigen, dass die TDR-Methode nach Kalibrierung für den jeweiligen Standort die arbeits- und zeitaufwändige Bohrstockmessung ersetzen kann. Das Wasserhaushaltsmodell AMBAV wurde für einzelne Bodenschichten anhand der Bodenfeuchtemessungen von TDR und Bohrstock überprüft. Es konnte bei hohem Bestimmtheitsmaß insgesamt eine gute Übereinstimmung zwischen den Messungen und der Simulation gefunden werden. Allerdings wird auf dem untersuchten Standort bei hohen Bodenfeuchten der tatsächliche Wassergehalt vom Modell etwas unterschätzt, bei geringen Bodenfeuchten eher überschätzt.

Verification of water budget model AMBAV by means of TDR

Abstract

Soil moisture is one of the most important factors of plant development. There are a lot of methods for measuring soil water content, but it is also possible to calculate soil moisture by water budget models. As a project the application of Time Domain Reflectometry (TDR) is tested by conventional method of auger. By calibration it is possible to replace the time consuming method of auger measurements by TDR. The water budget model AMBAV was tested for different soil layers of 20 cm thickness by soil moisture measurements under grass. The comparison shows a highly correlated agreement between AMBAV calculations and measurements of TDR and auger. But under conditions of high soil moisture AMBAV underestimates real soil water content. Under dry conditions the results of AMBAV tend to an overestimation on this investigated site.

1. Einleitung

Der Wasserhaushalt landwirtschaftlicher Kulturen ist beim Deutschen Wetterdienst seit Jahrzehnten Gegenstand agrarmeteorologischer Forschung. Grundsätzlich lässt sich der Wasserhaushalt von Pflanzen auch ohne personal- und zeitaufwändige Messung der Bodenfeuchte anhand meteorologischer, bodenkundlicher und pflanzenbaulicher Eingangsdaten simulieren. Die Ergebnisse von Wasserhaushaltsmodellen müssen jedoch durch geeignete Messmethoden überprüft werden. Zur Messung des Bodenwassergehaltes existieren zahlreiche Verfahren, wie z. B. die zu den klassischen Methoden zählende Gravimetrie per Bohrstock, aber auch die nun schon seit mehr als zehn Jahren international bekannte Technik der "Time Domain Reflectometry" (TDR).

2. Zielsetzung

Im Rahmen eines Projektes wird an der Niederlassung Weihenstephan seit dem Herbst 2004 die TDR-Methode im Vergleich zur gravimetrischen Methode getestet. Ein wichtiges Ziel ist, ob die sehr zeit- und arbeitsaufwändige Bohrstockmessung durch das automatische TDR-Verfahren ersetzt werden kann. Die dazu benutzte TDR-Rohrsonde erlaubt vertikale Profil-

messungen des Bodenwassergehaltes mit sofortiger Anzeige der Ergebnisse in Volumen-Prozent. Im Herbst 2005 wurde das Messprogramm durch fest installierte TDR-Sonden ausgedehnt, die eine Online-Übertragung der Messdaten erlauben.

Ein weiteres Projektziel ist die Verifikation des in der agrarmeteorologischen Beratung des Deutschen Wetterdienstes benutzten Wasserhaushaltsmodells AMBAV. Dazu sollen zum einen möglichst viele Kulturen Berücksichtigung finden, zum anderen aber auch unterschiedliche Bodenarten in die Untersuchung einbezogen werden. Das Messprogramm für den Bodenwassergehalt wird daher nicht nur auf den schluffigen Böden des Versuchsfeldes der Niederlassung Weißenstephan, sondern auch auf leichteren Standorten in der Umgebung von Freising durchgeführt. Hierzu konnten geeignete Böden auf dem Versuchsgut der TU-München in Viehhausen und der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) in Pettenbrunn gefunden werden, so dass nun auf insgesamt acht Versuchspartzen Bodenfeuchtemessungen durchgeführt werden.

3. Material und Methoden

3.1 Messung des Bodenwassergehaltes

Zur Bestimmung des Bodenwassergehaltes existieren zahlreiche Messmethoden, wobei zwischen direkten und indirekten Verfahren unterschieden werden. Bei der direkten Methode wird das im Boden enthaltene Wasser ermittelt, während bei indirekten Verfahren der Wassergehalt über eine andere physikalische Größe bestimmt wird, die im Zusammenhang mit der Bodenfeuchte steht.

3.1.1. Gravimetrische Methode

Bei dieser direkten Messmethode werden per Bohrstock Bodenproben gezogen, schichtweise das sog. Feuchtgewicht ermittelt und nach Trocknung bei 105 °C das Trockengewicht bestimmt. Die Gewichts-differenz zwischen Feucht- und Trockengewicht liefert den Wassergehalt der Probe in Gewichtsprozent, nach Multiplikation mit der Dichte des Bodens (Lagerungsdichte, Trockenraumgewicht) wird auf den Wassergehalt in Volumenprozent geschlossen.

Diese direkte Messmethode eignet sich im allgemeinen nur für sporadische Messungen und nicht für eine fortlaufende Registrierung von Bodenwassergehalten mit hoher zeitlicher Auflösung. Die Methode liefert jedoch im allgemeinen genaue Werte und kann daher zur Eichung indirekter Messverfahren herangezogen werden.

3.1.2. TDR

Wasser zeichnet sich durch besondere dielektrische Eigenschaften aus. So liegt die Dielektrizitätszahl DK von Wasser bei etwa 80, während die mineralischen Bodenbestandteile eine DK von etwa 3 bis 7 aufweisen. Die DK einer Bodenprobe ist daher hauptsächlich durch ihren Wassergehalt festgelegt. Mit Hilfe der Time Domain Reflectometry (TDR) wird die wassergehaltsabhängige Laufzeit eines Impulses gemessen und über eine Kalibrierbeziehung aus der Signallaufzeit auf den Bodenwassergehalt geschlossen. Zwischen dem volumetrischen Wassergehalt des Bodens und der Dielektrizitätszahl stellten TOPP et al. (1980) eine empirische Eichfunktion auf, die auch dem hier verwendeten Sondentyp der Fa. IMKO zugrunde liegt (www.imko.de). Die Eichfunktion beruht jedoch auf Messungen in sandig-lehmigen Böden mit Lagerungsdichten von 1,2 bis 1,3 g/cm³, so dass auf anderen Standorten erhebliche systematische Abweichungen auftreten können (BOHL, 1996). Zur Verringerung des Messfehlers der TDR-Sonde sollte daher eine Eichung für den jeweiligen Standort vorgenommen werden.

3.2 Das Wasserhaushaltsmodell AMBAV

Das Programm AMBAV berechnet auf der Grundlage der Beziehung nach Penman-Monteith die potentielle und reale Evapotranspiration sowie die Bodenwassergehalte einzelner Bodenschichten unter 13 Kulturen. Das Programm benötigt die meteorologischen Daten Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Niederschlag, Globalstrahlung bzw. Sonnenscheindauer in stündlicher Auflösung. Die Berücksichtigung der Pflanzenentwicklung erfolgt für die jeweilige Kultur durch Eingabe von bis zu 5 phänologischen Phasen. Die Bodenparameter werden vom Programm für Standardböden gemäß der BODENKUNDLICHEN KARTIERANLEITUNG (2005) bereitgestellt. Bei Vorliegen der Kardinalwerte einzelner Bodenhorizonte können die Parameter aber auch schichtweise angepasst werden.

3.3 Datengewinnung

In der unmittelbaren Umgebung der Messstandorte für die Bodenfeuchte liefern Wetterstationen die von AMBAV benötigten Daten. Auf den Versuchsflächen wurden die pF-Kurven per Stechzylinder ermittelt, so dass schichtweise Angaben von Feldkapazität, Welkepunkt und Lagerungsdichte vorliegen.

Die zur Aufnahme der TDR-Rohrsonde notwendigen Kunststoff-Rohre (Tecanat) wurden als Dreifach-Wiederholung im Abstand von jeweils 1 Meter auf den Versuchsflächen installiert.

Die Messungen per TDR-Rohrsonde und Bohrstock erfolgten in der Regel auf allen Standorten 2x pro Woche im Zeitraum Aufgang bis zur Ernte der jeweiligen Kultur. Gras wurde auch in den Wintermonaten beprobt, nur bei gefrorenem Boden mussten die Bohrstockmessungen eingestellt werden. Die TDR-Messungen waren davon nicht betroffen.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Vergleich der Messmethoden Bohrstock und TDR

Die hier verwendete TDR-Rohrsonde erlaubt aufgrund der Sondenlänge vertikale Profilmessungen von 18 cm, so dass der Vergleich der Messmethoden jeweils für Schichtdicken von 20 cm der Bodenschichten 0-20, 10-30, 20-40, 30-50 und 40-60 cm durchgeführt wurde.

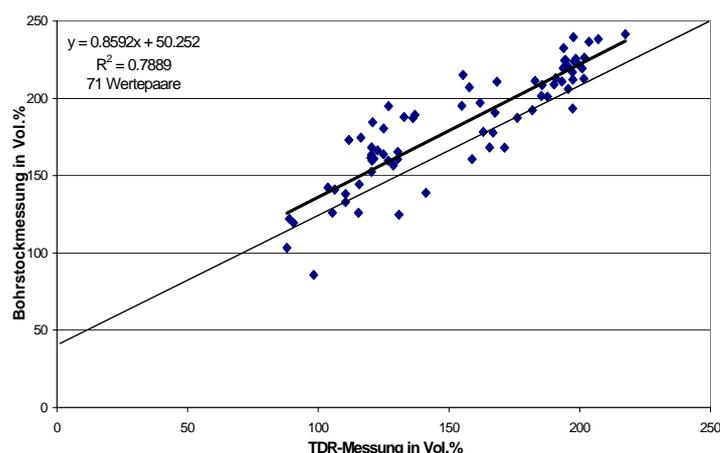


Abb. 1: Bodenwassergehalt unter Gras in der Schicht 0 bis 60 cm, Weihestephan-Dürnast 2006

Fig. 1: Soil moisture under gras, layer 0 - 60 cm, Weihestephan-Dürnast 2006

Auf den meisten Standorten konnten gute Korrelationen zwischen den Messmethoden festgestellt werden. So lag das Bestimmtheitsmaß R^2 in homogenen Böden häufig zwischen 0,7 und

0,9. Allerdings zeigten sich zwischen den Messergebnissen meist systematische Abweichungen mit geringeren Wassergehalten der TDR-Methode gegenüber der gravimetrischen, so dass über eine lineare Regression eine Anpassung der Eichfunktion (s. Kap. 3.1.2) der Rohrsonde für den jeweiligen Standort und Bodentiefe vorgenommen wurde (Abb. 1). Nachfolgend werden als Beispiel für die Untersuchungen die Ergebnisse für den Grasbestand am Standort Weihestephan-Dürnast vorgestellt.

4.2 Vergleich der Messungen mit dem Wasserhaushaltsmodell AMBAV

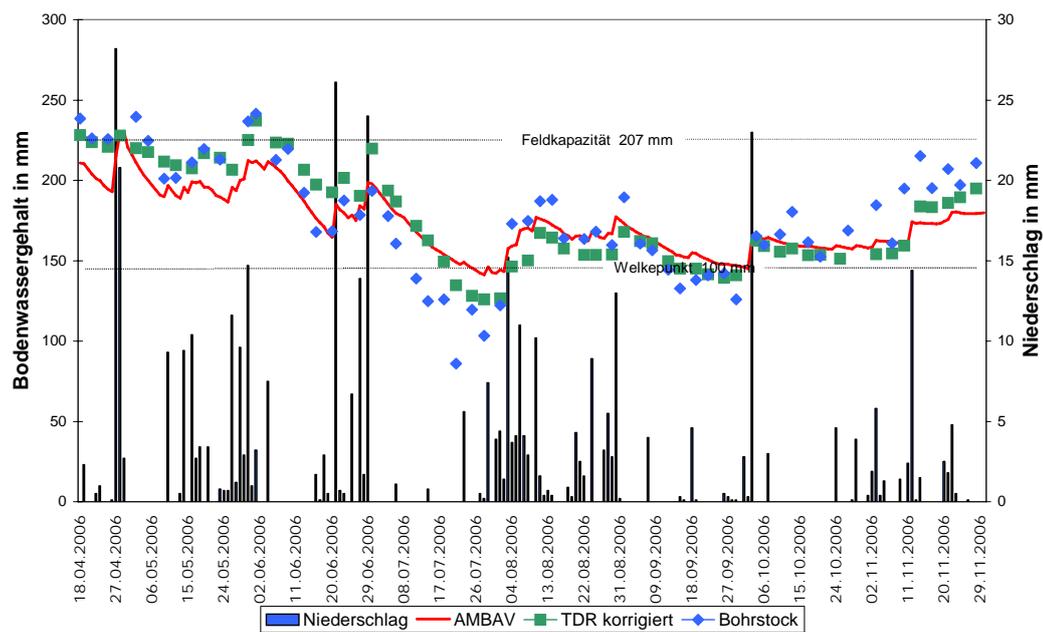


Abb. 2: Vergleich TDR-, Bohrstockmessungen und AMBAV, Schicht 0 bis 60 cm Gras, Dürnast 2006

Fig. 2: Soil moisture simulated by AMBAV and measured by TDR and auger, layer 0 - 60 cm, Dürnast 2006

Abbildung 2 zeigt den Verlauf des Bodenwassergehaltes unter Gras in der Schicht 0 bis 60 cm für den Zeitraum 18.04. bis 29.11.2006. Die Messungen belegen von April bis Anfang Juni hohe Wassergehalte von meist mehr als Feldkapazität. Erst im Laufe des extrem warmen und niederschlagsarmen Juli erfolgte eine rasche Austrocknung des Bodens. Der insgesamt sehr niederschlagsarme Herbst bewirkte, dass der Boden erst im November bis nahe Feldkapazität aufgefüllt wurde.

Der Vergleich zwischen den Messungen und den Berechnungen des Wasserhaushaltsmodells AMBAV belegt über den gesamten Verlauf eine relativ gute Übereinstimmung der Verfahren bei hohem Bestimmtheitsmaß (Abb. 3) von 0,91 bei TDR- und 0,79 bei Bohrstockmessungen. Allerdings wird der tatsächliche Wassergehalt bei hohen Bodenfeuchten vom Modell etwas unterschätzt, bei niedrigem Bodenwassergehalt eher überschätzt.

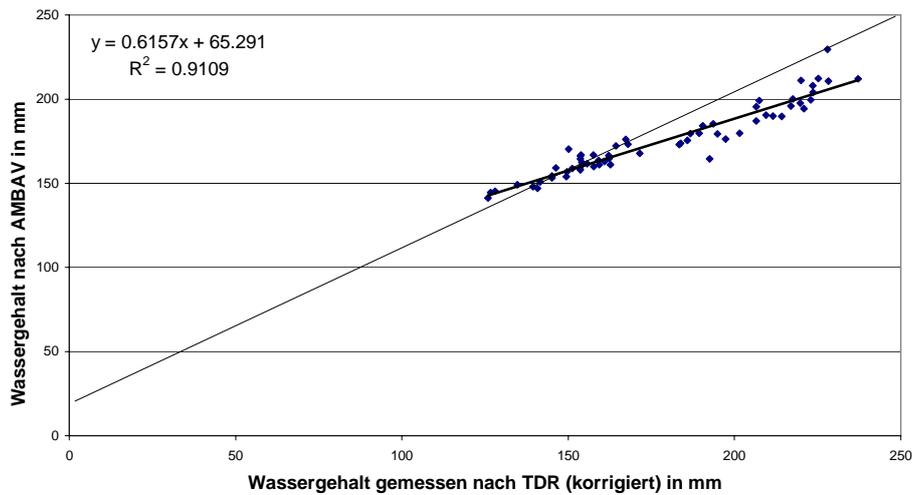


Abb. 3: Vergleich Berechnung AMBAV und Messung TDR, Gras 0 bis 60 cm, Dürnast 2006

Fig. 3: Comparison of soil moisture calculated by AMBAV and measured by TDR, Dürnast 2006

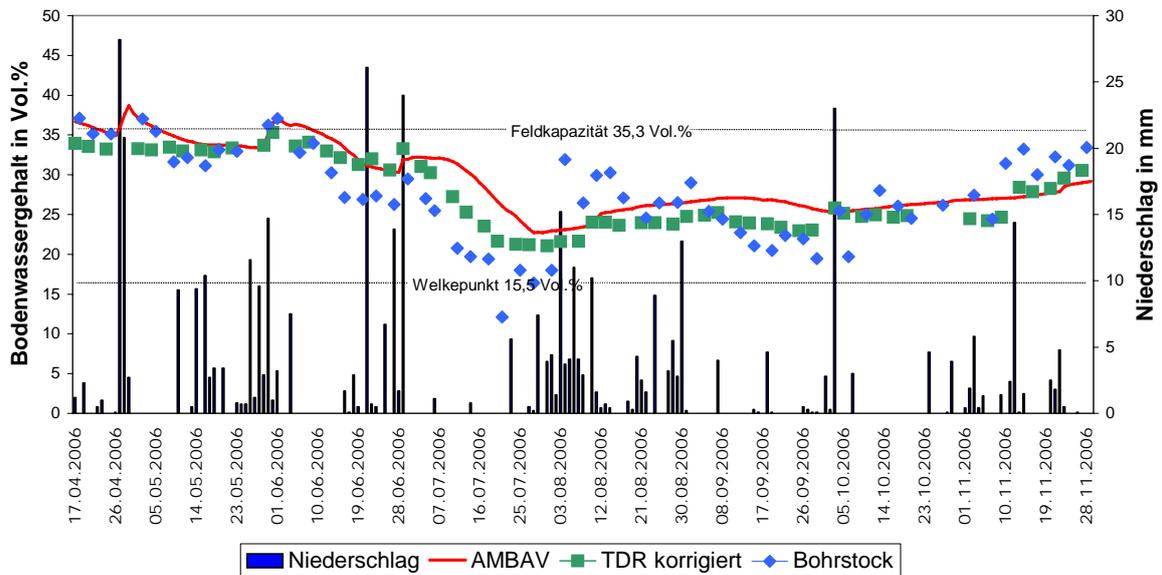


Abb. 4: Vergleich TDR- mit Bohrstockmessungen und AMBAV, Schicht 20 bis 40 cm Gras, Dürnast 2006

Fig. 4: Soil moisture simulated by AMBAV and measured by TDR and auger, layer 20 - 40 cm, Dürnast 2006

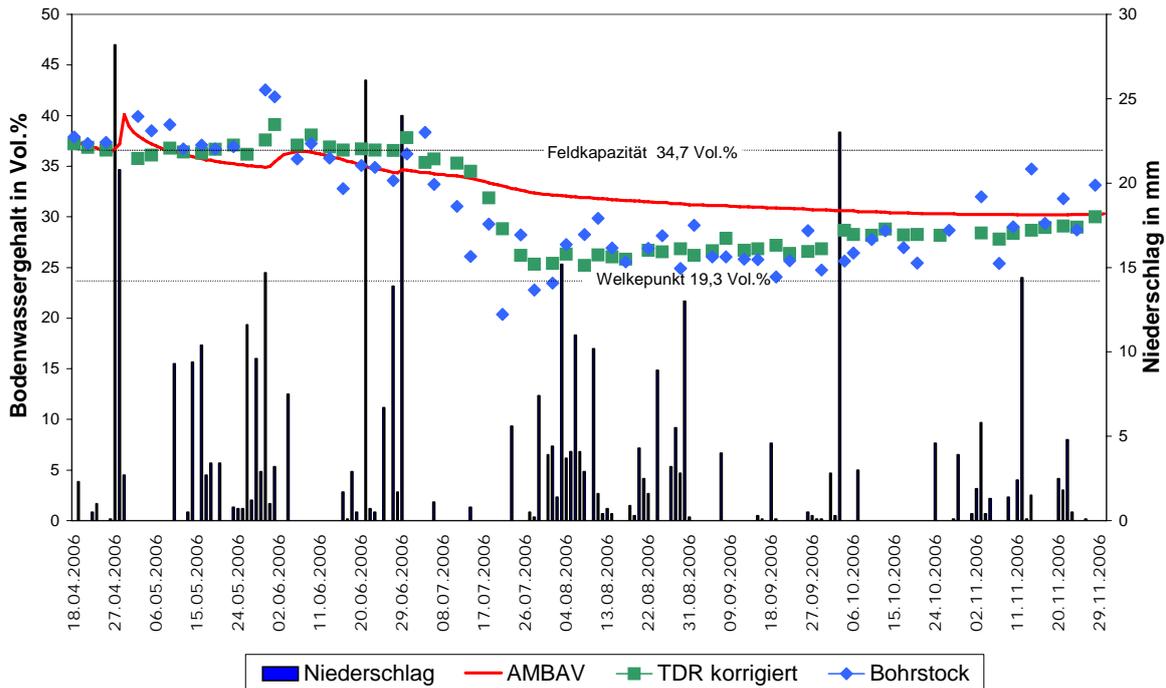


Abb. 5: Vergleich TDR-, Bohrstockmessungen und AMBAV, Schicht 40 bis 60 cm Gras, Dürnast 2006

Fig. 5: Soil moisture simulated by AMBAV and measured by TDR and auger, layer 40 - 60 cm, Dürnast 2006

Die Analyse der einzelnen Bodenschichten ergab, dass die Ursache der im Juli vom Modell zu hohen berechneten Bodenwassergehalten hauptsächlich in der Schicht 40 bis 60 cm zu suchen ist. So reagiert AMBAV im Juli in der Schicht 20 bis 40 cm (s. Abb. 4) zwar verzögert auf die extremen Temperatur- und Verdunstungsverhältnisse, insgesamt wird der Bodenfeuchteverlauf in dieser Schicht vom Modell gut erfasst. In der Bodenschicht 40 bis 60 cm wurden jedoch deutlich geringere Wassergehalte gemessen als vom Modell berechnet wird (s. Abb. 5). Vermutlich fand auch noch in diesen Bodenschichten durch Feinwurzeln und kapillaren Aufstieg ein gravierender Wasserentzug statt.

5. Schlussfolgerungen

Der große Vorteil der TDR-Methode im Vergleich zur gravimetrischen besteht in der Möglichkeit einer sehr schnellen und nicht destruktiven Messung. Die Ergebnisse liegen unmittelbar vor, die Messungen sind reproduzierbar, da immer am selben Standort gemessen wird, das Gelände wird nicht durch die zahlreichen Einstiche der Bohrstockmessungen perforiert. Die hier verwendete Sonde ist nach entsprechender Eichung gut geeignet vertikale Profilmessungen des Bodenwassergehaltes durchzuführen.

Die Überprüfung der Messmethoden im Hinblick auf eine Validierung des Wasserhaushaltsmodells AMBAV zeigte, dass aufgrund der geringeren Streuung der Messergebnisse die TDR-Methode für diese Aufgabe geeigneter ist als die gravimetrische Methode.

Der Vergleich zwischen den hier für einen Grasbestand vorgestellten Messungen und der Simulation des Bodenwassergehaltes belegt insgesamt eine relativ gute Übereinstimmung, wobei

das Wasserhaushaltsmodell auf diesem Standort bei hohen gemessenen Bodenwassergehalten eher zu geringe Werte berechnet und bei geringer Bodenfeuchte zu hohe Ergebnisse liefert.

Literaturverzeichnis:

BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG, 2005, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe u. d. Geologischen Landesämtern(Hrsg.)

BOHL, H., 1996: Eichung von TDR zur Wassergehaltsbestimmung in Böden auf Basis gemischt-dielektrischer Modelle. Diss. am Fachbereich Umwelt und Gesellschaft TU Berlin.

IMKO: Theorie der Material- und Bodenfeuchtemessung mit der TRIME-Methode. IMKO Micromodultechnik, Im Stöck 2, 76275 Ettlingen, www.imko.de.

LÖPMEIER, F.-J., 1983: Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung (AMBAV). - Beiträge zur Agrarmeteorologie 7/83.

TOPP G.C., J.J. DAVIS und A.P. ANNAN, 1980: Electromagnetic determination of soil water content measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Res. **16**, 579-582.

Anschrift des Autors

Klaus-Dieter Buchwald, Deutscher Wetterdienst Abteilung Agrarmeteorologie Außenstelle Weihenstephan, Alte Akademie 16, 85354 Freising

Agrarmeteorologische Aspekte beim Anbau von Energiemais

Franz Josef Löpmeier

Deutscher Wetterdienst, Agrarmeteorologische Forschung Braunschweig

Zusammenfassung

Die Diskussionen zum Thema Klimaänderungen und die daraus resultierende Gesetzgebung hat dazu geführt, dass die Landwirtschaft neben der Nahrungsmittelproduktion verstärkt auch Erzeuger von Energie aus nachwachsenden Rohstoffen wird. Wie aus der Abbildung 1 ersichtlich, stehen für diesen Produktionszweck unterschiedliche Pflanzen und Gewinnungsprozesse zur Verfügung. Mit der Förderung von Biogasanlagen wird dabei zunehmend Energiemais als Grundsubstrat für diese Anlage interessant und verstärkt angebaut. Obwohl die eigentlichen Energiemaissorten noch in der Züchtung sind, werden dabei Sorten mit üppigem Wuchs verstärkt angebaut. Auch ein sogenannter Zweifruchtanbau, bei dem zunächst Wintergetreide angebaut wird und dieser nach der Ernte schon im Mai durch Mais ersetzt wird, ist angedacht. Die im Zusammenhang mit dem Energiemaissanbau auftretenden agrarmeteorologisch bedingten Probleme sollen diskutiert werden.

Agrometeorological Aspects with the Cultivation of Energy Maize

Abstract

The discussion on climate change and the resulting legislation has lead to the fact that agriculture beside food production increasingly produces energy from renewable primary products. As is obvious from graph 1 different plants and generation processes are available for this purpose. With the promotion of biogas facilities energy maize is rising in interest and is increasingly grown as basic material for these systems. Although the proper energy maize cultivars are still in breeding, already now cultivars with ample growth are cultivated. Also, a so-called two-crop rotation is thought of, where winter cereals are sown first, harvested already in May and replaced by maize. The problems of agrometeorological relevance occurring with energy maize cultivation are discussed.

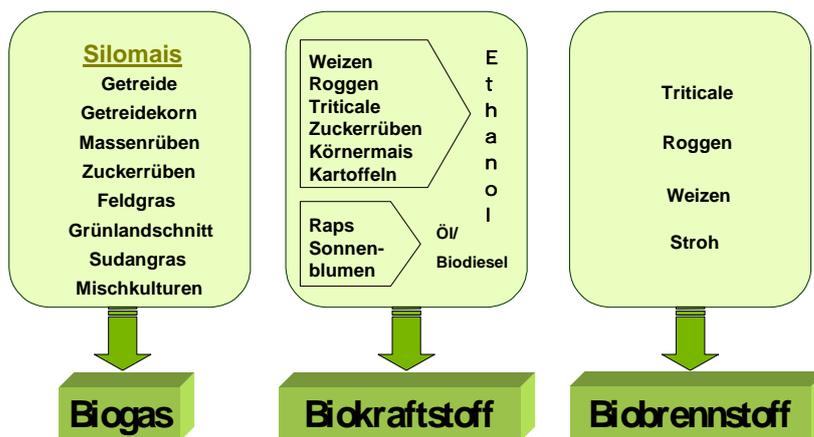


Abb. 1: Energiepflanzen aus landwirtschaftlicher Produktion

Fig. 1: *Energy plants from agricultural production*

Wasserhaushalt und Energiemais

Anhand der Abbildung 2 wird deutlich, dass höheres Wachstum und größere Blattflächenindizes bei den neuen Energiemaissorten zu erwarten sind. Trotz eines im Vergleich zu C3-Sorten geringeren Transpirationskoeffizienten ist von der C4-Pflanze ein deutlich höherer Wasserverbrauch während der Vegetationszeit zu erwarten. Angestrebt werden Erträge von ca. 30 t/ha Trockenmasse (TM) (z.Zt. maximal 25 t/ha). Bei einem Transpirationskoeffizienten von ca. 200 ltr/kg TM entspricht das einem Wasserverbrauch von 600 mm.



Abb. 2: Normaler Silagemais und zu erwartende üppige Energiemaissorten
Fig. 2: *Normal silage maize and expected ample growing energy maize cultivars*

Aus der Abbildung 3 wird deutlich, dass am Beispiel der Bedingungen in Magdeburg schon bei normalen Maissorten auf leichten Standorten das Wasser in ostdeutschen Bundesländern der begrenzende Faktor sein wird.

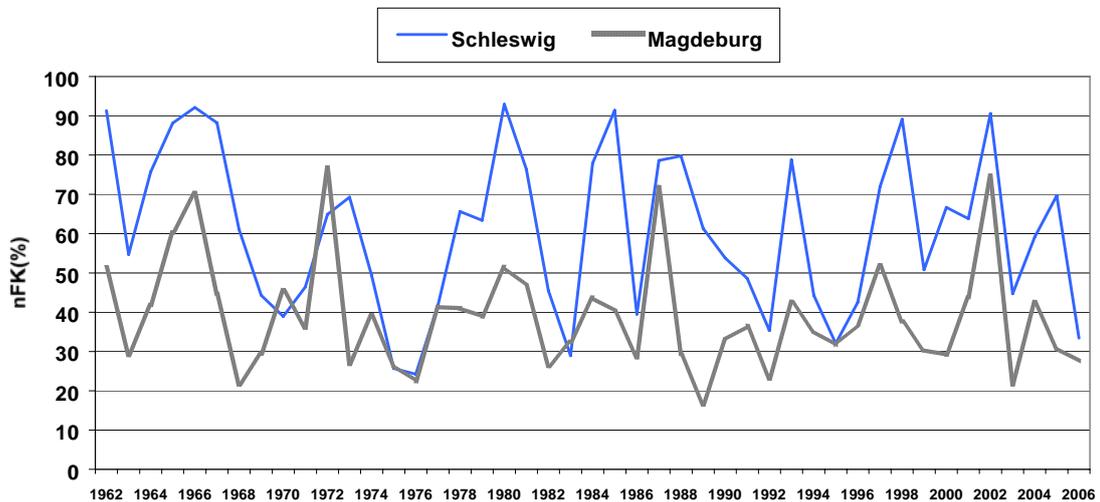


Abb 3: Bodenfeuchte (% nFK) Mais, 1962 - 2006, Mittelwert Juli - August, leichter Boden

Fig. 3: *Soil water content (% avail. water) for maize, 1962 - 2006, mean value July - August, light soil*

Die Abbildungen 4a und 4b weisen ebenfalls auf die begrenzten Wasserressourcen für Mais für 2 Standorte (Essen, Cottbus), insbesondere für den angedachten Zweifruktanbau hin. Obwohl hier Modellrechnungen mit dem Modell AMBAV (KERSEBAUM et al., 2005) von einem schweren Boden ausgegangen wird, sind die Anzahl der Fälle, wo schon im Juni - Juli von Bodenfeuchten $< 50\%$ ausgegangen werden muss, in Cottbus schon im Normalanbau nicht selten, im Zweifruktanbau besonders in den letzten Jahren die Regel.

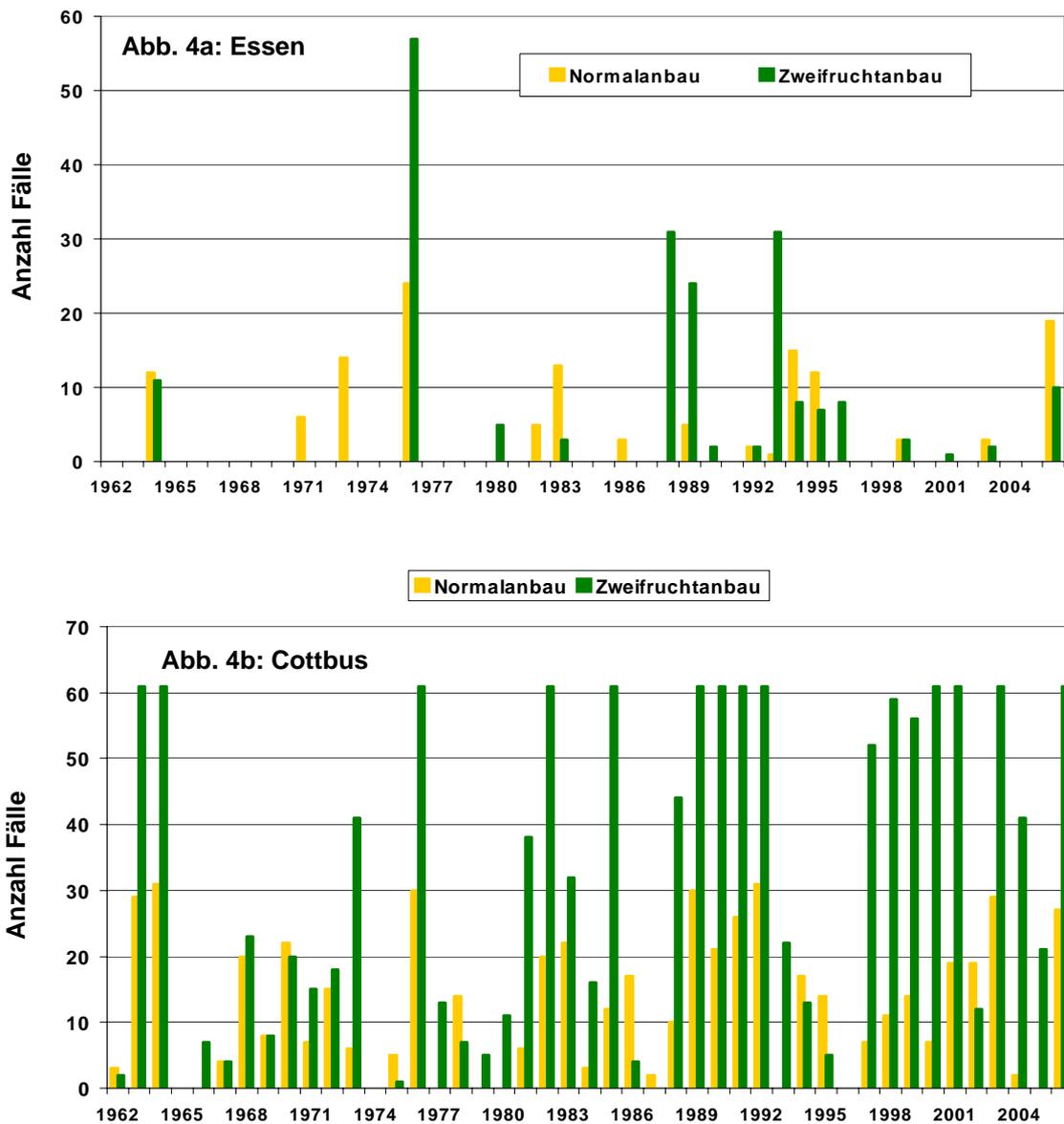


Abb. 4a und 4b: Gesamtanzahl der Fälle der Jahre 1962 - 2006, Juni - Juli, Bodenfeuchte $< 50\%$ nFK, Mais, schwerer Boden, Essen (4a) und Cottbus (4b)

Fig. 4a and 4b: Total number of cases for the years 1962 – 2006, June – July, with soil water content $< 50\%$ avail. water in maize, heavy soil, at Essen (4a) and Cottbus (4b)

In Einzeljahren können die Fälle mit Wasserstress im Normalanbau höher sein als im Zweifruktanbau. Dieses tritt immer dann auf, wenn die Böden im Mai durch Niederschläge gesät-

tigt waren und dann die höhere Verdunstung des in der Entwicklung schon weiter fortgeschrittenen Mais im Normalanbau zu geringeren Bodenfeuchten führt.

Den Modellrechnungen für den Zweifruktanbau lagen dabei folgende Annahmen zugrunde:

1. Frucht Winterroggen, Ernte Mitte Mai als Substrat für Biogasanlagen
2. Frucht Mais, Aufgang Juni
 - phänologische Entwicklung im Juli 2 Wochen später.

Die Tabelle 1 fasst die Situation der Bodenfeuchten für 5 Standorte im Monat Juni sowohl für den Normalanbau wie Zweifruktanbau zusammen.

Tab. 1: Mittelwert der Bodenfeuchte für den Zeitraum 1962 - 2006 im Monat Juni

Tab. 1: Mean values of soil water content for the period 1962 – 2006 in June

	Zweifruktanbau		Normalanbau	
	schwerer Boden	leichter Boden	schwerer Boden	leichter Boden
Schleswig	77.0	66.4	94.0	83.0
Braunschweig	63.1	57.3	89.2	80.2
Cottbus	53.2	51.3	83.6	75.7
Essen	79.8	69.7	98.3	86.2
Augsburg	82.3	74.7	99.7	87.5

Ähnliche Verhältnisse sind zu erwarten im Zwei- oder Mischfruchtanbau, wo neben Mais z.B. noch Sonnenblumen zusätzlich gedreht werden. Ein weiterer Aspekt beim Anbau von Mais als Energiepflanze ist die Entwicklung der Trockenmasse. Eine optimale Nutzung der Pflanzen ist nur gegeben, wenn auch 30 % Trockenmasse erreicht werden. Unter 28 % ist die Nutzung ausgeschlossen. Die Abbildungen 5a und b stellen die erreichten Trockenmassen für die Standorte Schleswig und Cottbus dar.

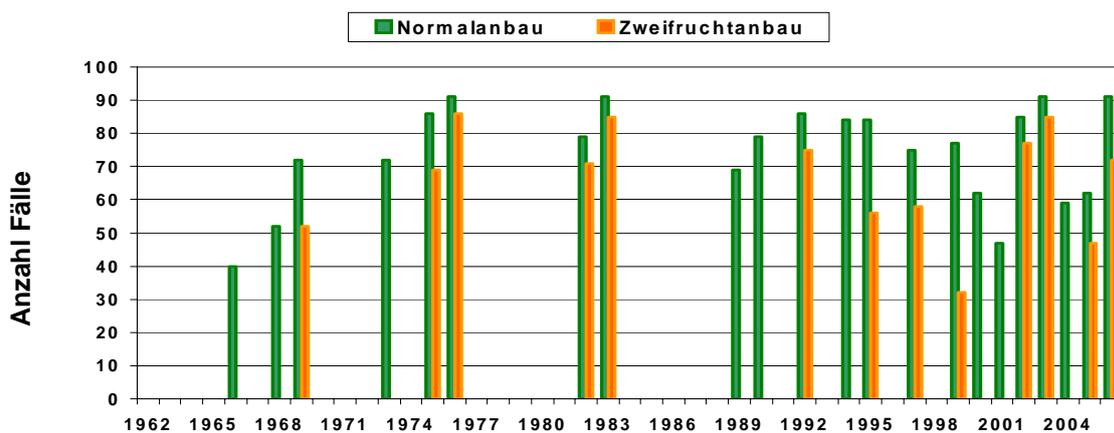


Abb. 5a: Gesamtanzahl der Fälle der Jahre 1962 - 2006, September bis November, Trockenmasse > 30 %, Mais frühe Sorte, leichter Boden, Schleswig

Fig. 5a: Total number of cases for the years 1962 – 2006, September to November, dry matter content > 30 % in maize, early cultivar, light soil, at Schleswig

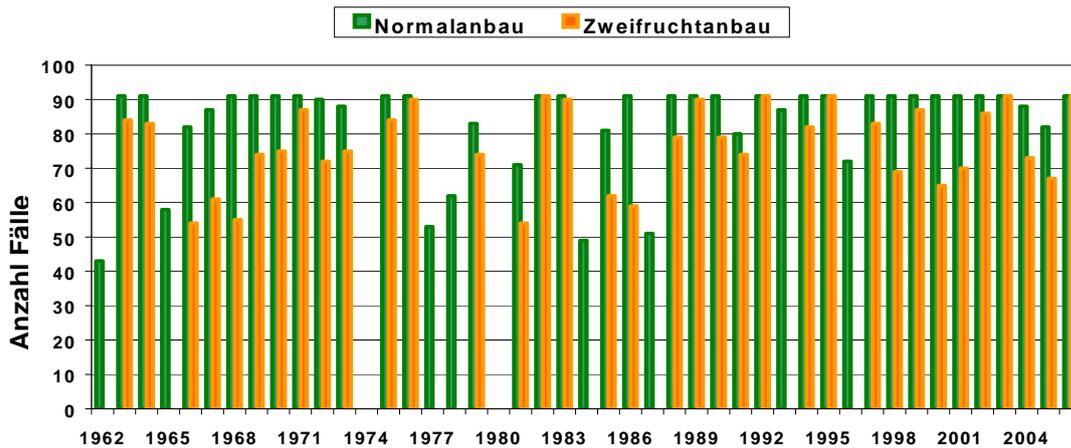


Abb. 5b: Gesamtanzahl der Fälle der Jahre 1962 - 2006, September bis November, Trockenmasse > 30 %, Mais späte Sorte, leichter Boden, Cottbus

Fig. 5b: Total number of cases for the years 1962 – 2006, September to November, dry matter content > 30 % in maize, late cultivar, light soil, at Cottbus

Während in Cottbus nahezu in allen Jahren sowohl im Zweifruktanbau als auch Normalanbau diese Bedingungen erreicht wurden, wird für Schleswig anhand der fehlenden Säulen in vielen Jahren deutlich, dass überwiegend die Voraussetzungen nicht gegeben sind. Ein weiterer Aspekt ist die Frostgefahr. Frühfröste < -2 °C vor Erreichen der optimalen Trockenmasse stellen eine weitere Einschränkung des Maisanbaus dar. Aus der Abbildung 6 wird deutlich, dass auch hier regional Unterschiede zu beachten sind. So ist z.B. im Raum Cottbus schon Anfang Oktober mit pflanzenschädigenden Frösten zu rechnen und ca. in jedem zweiten Jahr von Frösten im Oktober auszugehen.

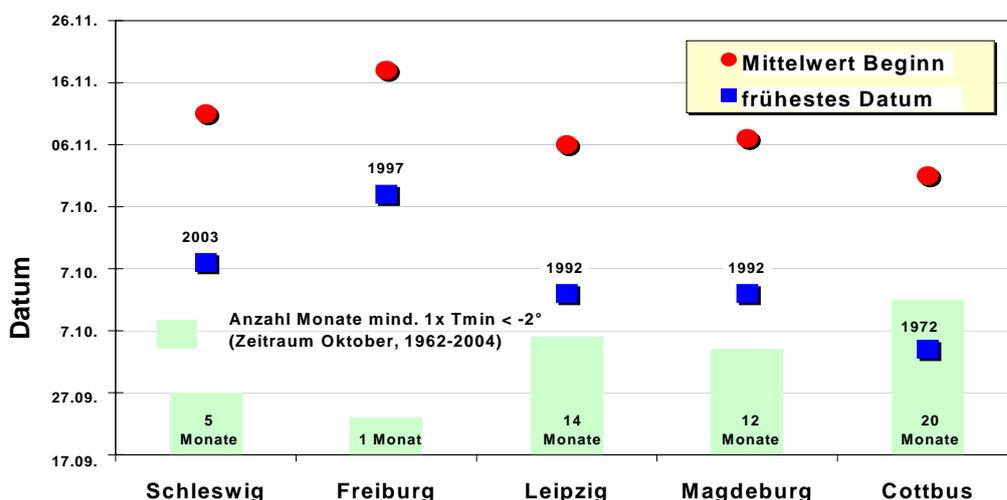


Abb. 6: Mittelwerte und frühestes Datum mit Frost sowie die Häufigkeit mit Temperaturen < -2 °C im Oktober im Zeitraum 1962 - 2004

Fig. 6: Mean and earliest date of frost and total frequency of temperatures < -2 °C in October for 1962 - 2004

Schlussfolgerungen

Der zukünftige wirtschaftliche Anbau von Energiemais wird auch unabhängig von Klimaänderungen durch verschiedene agrarmeteorologische Einflussfaktoren bestimmt. Im Mittelpunkt steht das Bodenwasser, das in vielen Regionen, insbesondere in den ostdeutschen Bundesländern, aber auch in Regionen mit leichten Böden, zum begrenzenden Faktor wird. Ein Zweifruktanbau kann in diesen Gebieten ausgeschlossen werden. Dort, wo hinreichend Wasser zur Verfügung steht, wird die Entwicklung zu hinreichender Trockenmasse ein Problem.

Literaturverzeichnis

KERSEBAUM, K.C., H. FRIESLAND AND F.-J. LÖPMEIER, 2005: Comparison of three irrigation models under German conditions. In: G. Maracchi et al. (ed.): Irrigation and pest and disease models: evaluation in different environments and web-based applications. COST 718 Report, European Commission, 16-25.

Anschrift des Autors

Franz Josef Löpmeier, Deutscher Wetterdienst, Agrarmeteorologische Forschung Braunschweig, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

Untersuchungen zur Spritzwasserdynamik

Anja Schaldach⁽¹⁾ und Klaus-Peter Wittich⁽²⁾

⁽¹⁾Forschungsanstalt Geisenheim, ⁽²⁾Deutscher Wetterdienst

Zusammenfassung

In einem vom Landwirtschaftsministerium geförderten Vorhaben wurde der Frage nachgegangen, welche vertikale Reichweite Spritzwasser aufweisen kann und welche Niederschlagsart hierfür als Verursacher in Frage kommt. Hierzu wurden Freilandexperimente auf einer brachen Bodenfläche und über Gras durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass die größten Vertikalbewegungen bei Gewitterniederschlägen auftreten, gefolgt von Schauer- und Landregenereignissen. Spritzwassertropfen wurden bis in eine Höhe von 110 cm sowohl über brachem Boden als auch über Gras nachgewiesen. Spritzwasser über Gras erreichte diese Höhe allerdings wesentlich seltener. Zur Absicherung dieser Experimente erfolgten unter kontrollierten Laborbedingungen Einzeltropfenversuche. Sie bestätigten die im Freiland beobachteten Transporthöhen und zeigten zudem, dass auf einer Sandfläche aufschlagende große Niederschlagstropfen von ca. 5 mm Durchmesser größenordnungsmäßig 200 Spritzwassertropfen erzeugen können.

Splash experiments

Abstract

The goal of this study is to examine to what extent splash droplets can move vertically and which type of rain is responsible for extreme splash events. Experiments have been conducted in the open over bare soil and grass. It was found that, over bare soil, thunderstorms are able to produce splash heights of 110 cm, followed by showers and widespread rain, which, on the average, both produce lower splash maxima. Splash droplets over grass did reach this height only in very rare cases. Experiments with single drops in the laboratory show a similar splash-concentration pattern as in the open. In addition, it was found that a raindrop of 5 mm in diameter can produce approximately 200 splash droplets over bare soil.

1 Einleitung

Spritzwasser spielt in der Meteorologie eine recht unbedeutende Rolle im Unterschied zur Phytopathologie. Diese erkennt im Spritzwasser ein wichtiges Transportmedium, mit dem Sporen vom Bestandsboden in die Blätter gelangen, wo sie Epidemien einleiten können. Untersuchungen der Spritzwasserdynamik sind allerdings äußerst rar, was u.a. daran liegt, dass Spritzwasser sich einer standardinstrumentellen Nachweismethodik entzieht. Aus diesem Grund wird häufig auf eine traditionelle Farbtracer-Technik ausgewichen. Mit ihr konnte HILL (1994) an einer auf dem Boden stehenden "Splashwand" vertikale Spritzwasser-Transporthöhen von 40 - 50 cm nachweisen, die von „normalem“ Niederschlag induziert wurden. WALKLATE et al. (1989) führten Laboruntersuchungen mit Einzeltropfen von 2.3 - 4.7 mm Durchmesser durch und ermittelten über unterschiedlichen Oberflächen (Kunststoff, Blätter, Stroh, Wasserfilm) maximale Spritzwassertransporte bis 60 cm Höhe. MACDONALD und McCARTNEY (1988) ließen künstlich erzeugte Wassertropfen von 4 mm Durchmesser auf Bohnenblätter fallen und erzielten 70 cm hohes Spritzwasser.

Die nachfolgend beschriebenen Versuche zur Spritzwasserdynamik wurden in einem vom Landwirtschaftsministerium geförderten Vorhaben durchgeführt. Ziel war, die maximale ver-

tikale Reichweite von Spritzwassertropfen zu ermitteln und zu klären, welche Niederschlagsart extrem spritzwasserbildend ist.

2 Messmethodik

2.1 Freiland

2.1.1 Spitzwasserrate

Um die Spritzwasserrate abzuschätzen, wurde an zwei ca. 10 m auseinanderliegenden Messpunkten der Niederschlag elektronisch mithilfe von Ombrometern erfasst. Ein Ombrometer war standardgemäß in 1 m Höhe über einer Grasfläche installiert, das andere dagegen in einem Schacht von 1 m Tiefe, wobei die Auffangfläche auf ebenerdigem Niveau lag. Der Schacht war mit einem Gitterrost versehen, das – einschließlich der unmittelbar anschließenden Grasumgebung – mit einer quadratischen Aluminiumplatte abgedeckt wurde. Sie wies in der Mitte eine kreisförmige Aussparung von der Größe der Auffangfläche des Niederschlagsmessers auf; die Seitenlänge der Platte betrug 1.1 m.

2.1.2 Spritzwasserhöhe

Für den Nachweis vertikaler Spritzwassertransporte wurden – in Anlehnung an Shaw (1991) – vom DWD (AMF) Braunschweig sog. Splashmeter angefertigt. Hierbei handelte es sich um senkrecht auf dem Boden stehende, mit weißem Löschpapier belegte Kunststoffzylinder von 4.5 cm Durchmesser und 110 cm Höhe. Vor Niederschlagsbeginn wurde die Bodenumgebung kreisförmig um den Zylinderfuß mit Farbpulver (Vitasyn, Eosin) bedeckt. Dort aufschlagende Niederschlagstropfen nahmen die Färbung auf und hinterließen auf der Splashmeteroberfläche Farbmarkierungen.

Nach dem Niederschlagsereignis wurde die maximale Spritzwasserhöhe abgelesen sowie die Anzahl der Spritzwasserspuren in einem festem 5cm-Vertikalraster ermittelt, und zwar ausgehend von der höchsten Spur abwärts bis zu demjenigen 5cm-Höhenabschnitt, in welchem mindestens 20 Spritzwassertropfen nachweisbar waren. Den Spritzwasserereignissen wurden anschließend zeitgleich erfasste ww-Niederschlagsklassen zugeordnet. Insgesamt wurden 133 Versuche über Brache und Grasfläche durchgeführt.

2.2 Labor

Um sicherzugehen, dass die im Freiland festgestellte Höhenverteilung der Spritzwasserkonzentration sich durch unabhängige Messungen reproduzieren lässt und um auszuschließen, dass größere Transporthöhen als 110 cm (= instrumentell bedingte Nachweisobergrenze) möglich sind, wurden Labormessungen durchgeführt. Die Versuchsanordnung bestand aus einem Tropfengenerator zur mechanischen Erzeugung großdimensionierter Tropfen, einer horizontalen Aufschlagfläche aus gefärbtem Sand bzw. aus einem Wasserfilm und einem zylindrischen Spritzwasserrezeptor (Löschpapierwand).

Der Tropfengenerator befand sich in einer Höhe von 9.3 m über der Aufschlagfläche, um den aus der Ruheposition fallenden ‚Mutter‘tropfen eine ausreichende Beschleunigungsstrecke zur Verfügung zu stellen, damit sie annähernd ihre Endgeschwindigkeit erreichten. Die mit unterschiedlichen Rohrquerschnitten (sog. ‚kleiner Tropfer‘ und ‚großer Tropfer‘) erzeugten Tropfen wiesen einen Durchmesser von 4.9 mm und 6.7 mm auf (mittlerer Median aller Versuche). Während ihrer Fallbewegung zerbrachen allerdings einige der Muttertropfen aufgrund nicht zu vermeidender hydrodynamischer Instabilitäten.

Am Endpunkt der Fallstrecke trafen die Muttertropfen auf eine Schale (Durchmesser: 12 cm), die trockenes oder von einem 1 mm hohen Wasserfilm bedecktes Sandsubstrat enthielt, das

mit dem Pulverfarbstoff Vitasyn eingefärbt war. Dort zerteilten sich die Muttertropfen in ‚Tochter‘tropfen, die sich anschließend aufwärts bewegten und auf der Innenseite einer mit Löschpapier belegten Zylinderwand Farbmarkierungen hinterließen. Der Radius der Zylinderwand und damit ihr Abstand zur Aufschlagfläche ließ sich zwischen 7 und 120 cm in sieben Weiten variieren. Bis einschließlich des 70cm-Radius betrug die Höhe des Spritzwasserrezeptors 177 cm, bei den größeren Radien dagegen betrug sie 118 cm.

Insgesamt fanden 28 Einzelversuche statt, die aus einer Kombination von zwei unterschiedlichen Tropfergrößen, zwei unterschiedlichen Aufschlagflächen und sieben verschiedenen Zylinderradien resultierten. Ein Einzelversuch umfasste 100 erzeugte Muttertropfen. Nach Beendigung der Messreihe wurde die Aufschlagfläche neu präpariert und das Löschpapier des Rezeptors erneuert.

3 Ergebnisse

3.1 Freilandmessungen

In Feldversuchen konnte gezeigt werden, dass der ebenerdige Niederschlagsmesser grob das 1.4-fache der Regenmenge des Standardmessgerätes enthielt. Damit liegt die Spritzwasserrate etwa bei 40 % der Rate des Freilandniederschlags (Abb. 1).

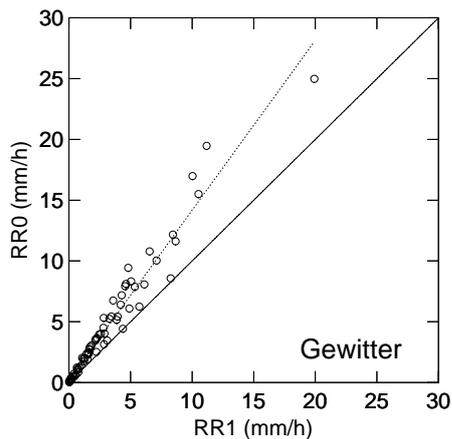


Abb. 1: Niederschlagsintensität von Gewittern, ebenerdig über einer Aluminiumfläche ($RR0$) und in 1 m Höhe über Gras ($RR1$) gemessen; $RR0 = RR1 + \text{Spritzwasserrate}$

Fig. 1: Thunderstorm-rain intensity measured at ground level over an aluminium plate ($RR0$) and at 1 m above grass ($RR1$); $RR0 = RR1 + \text{splash rate}$

Splashmetermessungen ergaben, dass die Zahl der Spritzwassertropfen mit wachsendem Abstand vom Boden nahezu exponentiell abnimmt und dass die größte Spritzwasserkonzentration von Gewitterniederschlägen, gefolgt von Schauern und Landregenereignissen, hervorgerufen wird (Abb. 2). Der größte Spritzwasserscheitel lag über Brache bei 110 cm (Einzelereignis, hervorgerufen durch Gewitterniederschlag). Da diese Höhe der experimentell möglichen oberen Nachweisgrenze entsprach, können höhere Spritzwassertransporte grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden, zumal Spritzwasser oberhalb eines Meters in drei Versuchsjahren in 43 von 133 Fällen auftrat (allerdings mit nicht mehr als einer Farbspur).

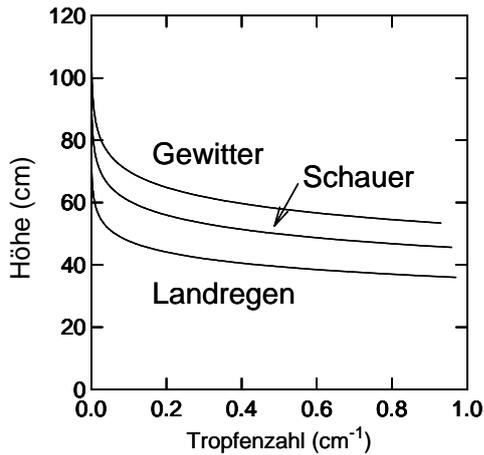


Abb. 2: Tropfenzahl pro Höhenintervall (in cm^{-1}) am oberen Rand der Spritzwasserwolke für die drei Niederschlagsarten Gewitter, Schauer und Landregen

Fig. 2: Drop number per height increment (in cm^{-1}) at the upper boundary of the splash cloud produced by thunderstorm, shower and widespread rain

Über Gras zeigten sich im Mittel geringere Spritzwasserhöhen als über brachem Boden. Eine sich auf die Tropfenkonzentration von 0.2 cm^{-1} beziehende und für Gewitterniederschläge gültige Auswertung ergab $h_{\text{Gras}} = 26.75 + 0.25 \cdot h_{\text{Boden}}$ (Spritzwasserhöhe h in cm).

3.2 Labormessungen

Die höchste Spritzwasserhöhe, induziert vom 6.7mm-Muttertropfen auf der Sandfläche, betrug 104 cm. Generell trat Spritzwasser oberhalb von 50 cm Höhe nur in sehr geringer Konzentration auf. Damit bestätigen die Labormessungen die Freilandversuche.

Abb. 3 stellt die Gesamtzahl aller auf einer Rezeptorwand markierten Spritzwassertropfen als Funktion ihrer Horizontalentfernung von der Spritzwasserquelle dar. Der Vergleich der verschiedenen Versuchsvarianten zeigt, dass größere Muttertropfen erwartungsgemäß mehr Spritzwassertropfen produzieren als kleinere. Darüber hinaus entstehen auf der Wasserfilmfläche deutlich mehr Spritzwassertropfen als auf der Sandfläche, da zusätzliche Flüssigkeit für die Spritzwasserbildung vorhanden ist. Allerdings nimmt in der Variante ‚Wasserfilm‘ die Zahl der registrierten Tropfen mit wachsender Entfernung rascher ab als in der Sandvariante. Approximiert man die Horizontalverteilung der Tropfenzahl durch eine Exponentialfunktion und setzt die Horizontalentfernung von der Spritzwasserquelle gleich Null, so kann man die Anzahl der über der Spritzwasserquelle auftretenden Spritzwassertropfen abschätzen. Pro Muttertropfen ergeben sich für die Variante ‚Sand/kleiner Tropfer‘ 181, für die Variante ‚Wasserfilm/großer Tropfer‘ 2235 Spritzwassertropfen.

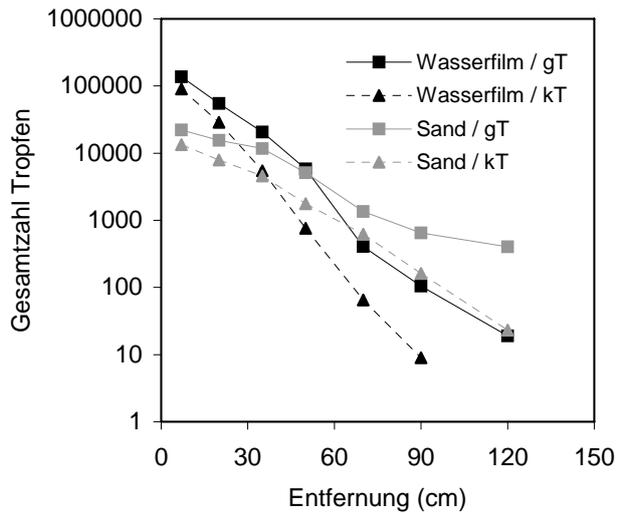


Abb. 3: Anzahl der vertikal aufsummierten Spritzwassertropfen in verschiedenen Entfernungen von der Spritzwasserquelle (gT = großer Tropfer, kT = kleiner Tropfer); Anzahl der Muttertropfen: 100

Fig. 3: Total number of splash droplets at different distances from the splash source (gT: large dropper, kT: small dropper); number of mother drops: 100

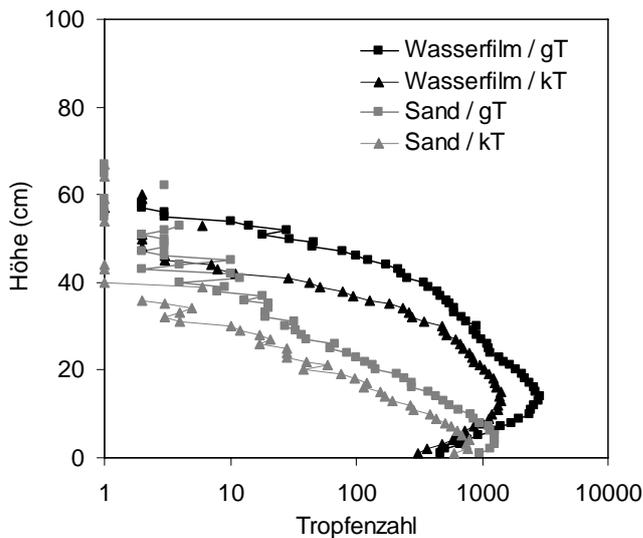


Abb. 4: Vertikalprofil der Spritzwassertropfen (Entfernung zur Spritzwasserquelle: 20 cm; gT = großer Tropfer, kT = kleiner Tropfer); Anzahl der Muttertropfen: 100

Fig. 4: Height profile of the total number of splash droplets (distance to the splash source: 20 cm; gT = large dropper, kT = small dropper); number of mother drops: 100

Betrachtet man die in 20 cm Entfernung zur Spritzwasserquelle aufgenommene Vertikalverteilung der Spritzwassermarken über der Sandoberfläche (Abb. 4), so zeigt sich oberhalb eines in 5-10 cm Höhe liegenden Profilmaximums die erwartete exponentielle Abnahme der Tropfenzahl. Dies bestätigt die gewonnenen Ergebnisse aus den Freilandversuchen. Über dem Wasserfilm dagegen weicht die Profilstruktur deutlich von einer exponentiellen Vertikalver-

teilung ab. Dort ist das Konzentrationsmaximum in einer Höhe von etwa 15 cm zu finden. Anschließend nimmt die Tropfenanzahl langsam, oberhalb von 40 cm rasch ab. Bis in etwa 50 cm Höhe (großer Muttertropfen) sind Spritzwassertropfen über einem Wasserfilm zahlreicher als über einer Sandfläche. Für beide Oberflächen gilt, dass große Muttertropfen nicht nur mehr, sondern auch höher reichende Spritzwassertropfen bilden als kleine.

4 Schlussfolgerungen

Die Freiland- und Laborversuche zeigten erwartungsgemäß, dass der Durchmesser natürlicher oder künstlicher Regentropfen für die Spritzwassererzeugung von erheblicher Bedeutung ist. Große (energiereiche) Muttertropfen, die man vorrangig in Gewitterniederschlägen und Schauern findet, führen zu größeren Spritzwasserhöhen als kleine Tropfen (Landregenereignisse). Darüber hinaus hängt die Spritzwasserbildung von der Elastizität der Trefferfläche ab. Elastische Aufschlagflächen (Gras) führen zu geringeren Spritzwasserhöhen als unelastische (bracher Boden). Darüber hinaus konnten über einem Wasserfilm zahlreichere Spritzwassertropfen beobachtet werden als über einer relativ trockenen Sandfläche.

Literatur

- HILL, G., 1994: Prognose der Primärinfektion: Vierzig Jahre und kein bißchen weiter ? - Das Deutsche Weinmagazin **14**, 20 - 23.
- MACDONALD, O.C., McCARTNEY, H.A., 1988: A photographic technique for investigating the splashing of water drops on leaves. - Ann. Appl. Biol. **113**, 627-638.
- SHAW, M.W., 1991: Variation in the height to which tracer is moved by splash during natural summer rain in the UK. - Agric. For. Meteorol. **55**, 1-14.
- WALKLATE, P.J., McCARTNEY, H.A., FITT, B.D.L., 1989: Vertical dispersal of plant pathogens by splashing. Part II: experimental study of the relationship between raindrop size and the maximum splash height. - Plant Pathology **38**, 64-70.

Anschrift der Autoren

Dipl. Geoökol. Anja Schaldach, Carlsdorfer Str. 13, 34128 Kassel

Dr. Klaus-Peter Wittich, Deutscher Wetterdienst, Agrarmeteorologische Forschung, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

Modifikationen eines eindimensionalen SVAT-Modells für die Verwendung im Rahmen der agrarmeteorologischen Beratung für den Weinbau

Harald Braden¹ und Cathleen Frühauf²

¹Deutscher Wetterdienst, Agrarmeteorologische Forschung Braunschweig

²Deutscher Wetterdienst, Agrarmeteorologische Außenstelle Geisenheim

Zusammenfassung

Für die agrarmeteorologische Beratung im Weinbau ist die Modellierung des Bestandsklimas von Rebbeständen erforderlich. Weil dabei ein robustes und relativ leicht handhabbares Modell eingesetzt werden muss, kommen zwei- oder dreidimensionale Modelle nicht in Frage. Daher wurde das eindimensionale Modell AMBETI (Braden, 1995) modifiziert, um den Unterschieden zwischen einem geschlossenen Bestand und der Reihenstruktur von Weinbeständen Rechnung zu tragen.

Die Modifikationen betreffen vor allem die Ausbreitung kurz- und langwelliger Strahlung, die aerodynamischen Transporte und die Niederschlagsinterzeption. Die empirischen Modifikationen wurden mit Messwerten der Lufttemperaturen und -feuchten aus der Laubwand sowie der Bodentemperaturen und Bodenwassergehalte kalibriert und validiert, die in den Jahren 2005 und 2006 in einer Weinbergslage in Geisenheim durchgeführt wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die bestandsklimatischen Größen in hinreichender Genauigkeit modelliert werden. Das modifizierte eindimensionale Modell wird deshalb im Rahmen der Beratung des Deutschen Wetterdienstes (DWD) eingesetzt.

Modifications of a one-dimensional SVAT-model for the use in agrometeorological advisory for vineyards

Abstract

Modelling of canopy climate is recommended for agrometeorological advisory. Because the well established one-dimensional model AMBETI/BEKLIMA is not suitable for the row-structure of vineyards it is modified for this purpose. The modifications mainly concern to the propagation of short- and long-wave radiation, the aerodynamic transports and the interception of precipitation. The empirical modifications were calibrated and validated with canopy air temperature and humidity as well as soil temperatures measured in a vineyard at Geisenheim during the years 2005 and 2006.

The results show, that these microclimatic quantities are well simulated by the modified model, which therefore is used for agricultural advisory of vineyards by the German Weather Service (DWD).

1 Einleitung

Der Falsche Mehltau der Weinrebe (Rebenperonospora) zählt zu den wirtschaftlich bedeutendsten Pflanzenkrankheiten im europäischen Weinbau. Ein wichtiges Hilfsmittel zur nachhaltigen Eindämmung der Schaderregerpopulation ist der Einsatz von Prognosemodellen. Diese ermöglichen über die Einschätzung des aktuell bestehenden witterungsbedingten Krankheitsrisikos eine bessere Terminierung der Spritzungen. Zur Modellierung der Rebenperonospora ist die genaue Kenntnis der meteorologischen Bedingungen innerhalb eines Weinberges notwendig. Ziel der Arbeiten ist die Modellierung des Bestandsklimas innerhalb von Weinbeständen für die Prognose der Rebenperonospora sowie anderer Schaderreger.

In zahlreichen Arbeiten wird die Strahlungsinterzeption von Pflanzenbeständen mit Reihenstruktur beschrieben. So gibt bereits GOUDRIAAN (1977) entsprechende geometrische Beziehungen an, die in späteren Arbeiten wieder aufgegriffen werden (GIJZEN and GOUDRIAAN, 1989; GANIS, 1997; FRIDAY and FOWNES, 2001; OYARZUN et al., 2007).

Größere Probleme bereitet hingegen offenbar die angemessene Modellierung der aerodynamischen Transporte in Reihenkulturen (RIOU et al., 1987; MAO and KURATA, 1997). Ein Verdunstungsmodell für einen Rebbestand, das auf der Grundlage der Penman-Verdunstung mit einer einfachen Reduktion zur aktuellen Verdunstung in Abhängigkeit vom Bodenwasserspeicher arbeitet, beschreiben TRAMBOUZE and VOLTZ (2001).

Das hier benutzte Modell erlaubt darüber hinaus die Berechnung des Bestandsklimas sowie der Bodentemperaturen und -wassergehalte.

2 Material und Methoden

Die Modellrechnungen wurden mit dem Modell AMBETI/BEKLIMA für die Weinbergslage „Mäuerchen“ durchgeführt, einem mit ca. 6° nach Süden exponierten und in Nord-Süd Richtung gezeilten Hang in der Gemarkung Geisenheim. Das Modell erfordert die Größen Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, langwellige Gegenstrahlung, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheinanteil und Niederschlag als meteorologische Randbedingungen, die in mindestens stündlicher Auflösung vorliegen müssen. Diese Randbedingungen wurden an der ca. 200 m entfernten automatischen Station Geisenheim des Deutschen Wetterdienstes als Stundenwerte gemessen.

Die Messungen

Die Messgeräte waren ventilierte Psychrometer in 2 m Höhe, ein Pyranometer (CM11, Fa. Kipp&Zonen), ein Schalenkreuzanemometer (Fa. Thies), eine Niederschlagswaage (PLUVIO, Fa. Ott) und ein Sonnenscheinindikator (SONI e3, Fa. Siggelkow). Die langwellige Gegenstrahlung wurde mit einem Pyrgeometer (CG4, Fa. Kipp&Zonen) gemessen.

Auf diesem Hang wurden auch die Messungen zur Kalibrierung und Validierung des Modells durchgeführt. Hierzu dienten vor allem

- Bodentemperaturen, die mit Pt 100-Thermometern in 5 und 10 cm Tiefe in der Mitte der von Bewuchs frei gehaltenen Rebasse gemessen wurden,
- Bodenfeuchten, die einmal wöchentlich mit dreifacher Wiederholung gravimetrisch im Oberboden der Rebasse gemessen wurden,
- Lufttemperaturen und -feuchten, die in den Laubwänden mit Mini-Psychrometern gemessen wurden, sowie
- Blattbenetzungen, die in den Laubwänden in den selben Höhen wie die Temperaturmessungen mit Drahtharfen an einzelnen Blättern bestimmt wurden.

Die Mini-Psychrometer waren in mehreren Höhen sowohl auf der West- als auch auf der Ostseite der Rebzeile eingesetzt. Dabei hatte sich gezeigt, dass sich diese Messwerte nur unwesentlich voneinander unterscheiden.

Das Ausgangs-Modell

Das Modell AMBETI/BEKLIMA ist ein eindimensionales Modell des Energie- und Wasserhaushalts von Pflanzenbeständen und Boden (BRADEN, 1995). Es beruht auf einer weitgehend

physikalisch-mathematischen Modellierung der Energiehaushalte und Transportprozesse. Modelliert werden unter anderem die Streuung und Interzeption von sichtbarer, nah-infraroter und langwelliger Strahlung an Pflanzenteilen und Bodenoberfläche, die Interzeption von Niederschlag sowie die Interzeptionsverdunstung. Die isolierende Wirkung einer Schneedecke wird berücksichtigt und ihr Abschmelzen berechnet, ebenso wie die Gefrier- und Schmelzvorgänge in den Bodenschichten. Die Wasseraufnahme durch die Pflanzenwurzeln aus den Bodenschichten wird im Einklang mit der aktuellen Transpiration berechnet, wobei aufgrund des sich jeweils einstellenden Pflanzen-Wasserpotentials eine Begrenzung durch Wasserstress auftreten kann.

Das Modell berücksichtigt eine Bestandsschicht und 13 Bodenschichten, von denen die oberste nur 5 mm stark ist und die unterste bis in eine Tiefe von 12 m reicht. Dadurch können einerseits Temperaturen und Wassergehalte der Bodenschichten in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung berechnet werden und andererseits kann eine zeitlich konstante untere Randbedingung benutzt werden. Die Bestandsstruktur wird durch Bestandshöhe, Blattflächenindex, Blatthaltung und Stängeldichte beschrieben, wobei eine gleichförmige Verteilung der Pflanzenteile angenommen wird. Von diesem Ausgangsmodell können daher für Bestände mit Reihenstrukturen keine brauchbaren Ergebnisse erwartet werden.

Modifikationen des Modells

Um mit dem eindimensionalen Modell brauchbare Bestandsklimagrößen auch für Reihenbestände des Weins berechnen zu können, wurden nach theoretischen Überlegungen in einer Modellvariante einige zum Teil aufwändige Modelländerungen vorgenommen, die infolge der weitgehend physikalisch-mathematischen Modellierung von AMBETI/BEKLIMA in gezielter Weise möglich waren.

- Es wurde eine spezielle Modell-Version entwickelt, bei der die aerodynamischen Transporte vom Boden direkt in die Atmosphäre erfolgen und nicht durch die Bewuchsschicht. (siehe BRADEN, 1995, S. 38)
- Bei der Berechnung des Austauschs kurzwelliger Strahlung und ihrer Interzeption durch Pflanzen und Bodenoberfläche wird der direkte Strahlungseinfall auf den Boden unter anderem durch die Einführung des Bodenbedeckungsanteils berücksichtigt. Für Validierungszwecke wurde dabei auch der Einfall direkter Strahlung auf die Rebasse in Abhängigkeit von der Bestandsgeometrie und dem Sonnenstand berechnet.
- Auch beim Austausch langwelliger Strahlung wird die veränderte Bestandsgeometrie berücksichtigt.
- Bei der Berechnung der Niederschlagsinterzeption wird die Reihenstruktur dadurch berücksichtigt, dass ein Teil des Niederschlags direkt auf die Bodenoberfläche gelangt.
- Bulk-Stomatawiderstand, morphologische und phänologische Parameter wurden angepasst

Diese Modellvariante („BEKLI_Wein“) wurde mit Messwerten der Außenstelle Geisenheim aus dem Jahr 2005 kalibriert und mit Werten aus dem Jahr 2006 validiert. Wegen der weitgehend deterministischen Modellierung ist die Kalibrierung nur wenig wirksam und vom jeweiligen Jahr kaum abhängig.

3 Ergebnisse

Das Modell BEKLI_Wein berechnet neben den Zustandsgrößen Temperaturen, Wassergehal-

te, Wasserpotentiale auch eine Vielzahl von Flüssen (Wärme, Wasser, Wasser-dampf). Für Kalibrierungen und Validierungen eignen sich wegen der einfacheren und zuverlässigeren messtechnischen Bestimmbarkeit

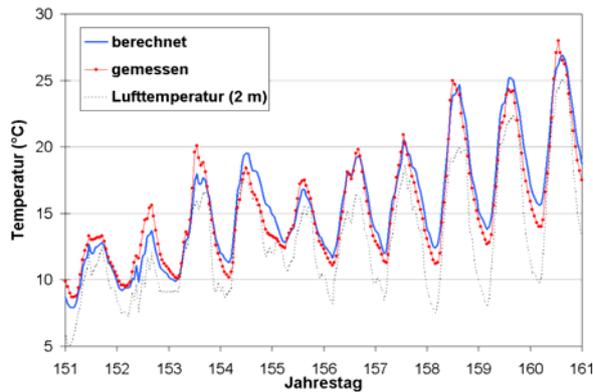


Abb. 1: Berechnete und gemessene Bodentemperaturen in 5 cm Tiefe und 2m-Lufttemperatur (31. Mai bis 9. Juni 2006)

Fig. 1: Measured and simulated soil temperatures at a depth of 5 cm and air temperature at 2m (31 may to 9 June)

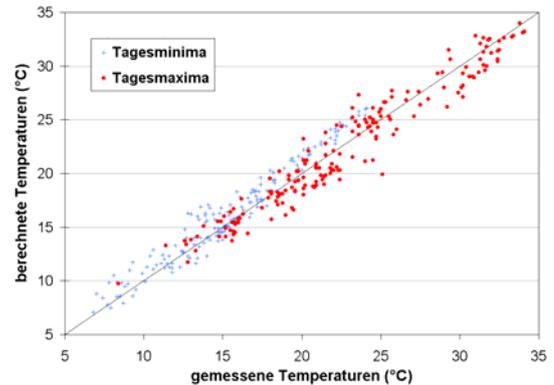


Abb. 2: Vergleich der berechneten und gemessenen Tagesmaxima und -minima der 5cm-Bodentemperaturen

Fig. 2: Simulated versus measured daily maximum and minimum values of 5cm soil temperatures

besonders die Zustandsgrößen und wurden hier ausschließlich benutzt, vor allem Lufttemperaturen und Erdbodentemperaturen. Eine gute Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen 5 und 10 cm Bodentemperaturen in der Mitte der Rebzeile ist ein Zeichen für die richtige Modellierung der Energiebilanz der Bodenoberfläche sowie der Wärme- und Wasserhaushalte im Oberboden. Insbesondere die Vergleiche der Bodentemperaturen für das Jahr 2005 dienten daher der Kalibrierung bei der Durchführung der Modelländerungen. Für das Jahr 2006 ergibt sich eine fast ebenso gute Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Bodentemperaturen wie für 2005. Ein Beispiel für eine 10-tägige Periode zeigen die in Abb. 1 dargestellten Bodentemperatur-verläufe. Eine Übersicht über die Tagesmaxima und -minima der 5 cm Bodentemperaturen gibt Abb. 2 für den Zeitraum 100. bis 280. Tag (10. April bis 7. Oktober).

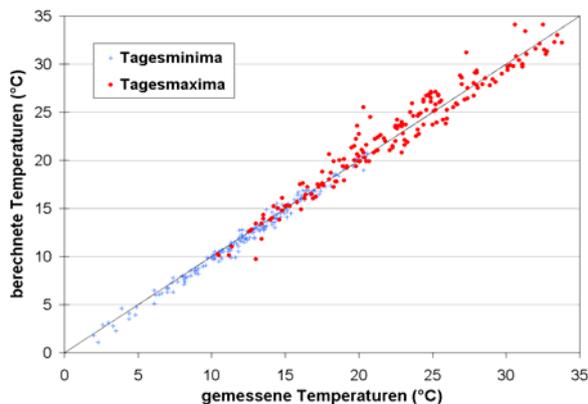


Abb. 3: Vergleich der berechneten und gemessenen Tagesmaxima und -minima der Lufttemperaturen in der Laubwand

Fig. 3: Simulated versus measured daily maximum and minimum values of air temperatures near the leaves

Die Übereinstimmung der modellierten mit den gemessenen Größen ist im allgemeinen gut, trotzdem gibt es auch mehrere Abweichungen von 3-4 K und am 231.Tag sogar bis 5.2 K, nachdem am Vortag 22 mm Niederschlag gefallen waren. Als Ursachen für diese Abweichungen kommen neben Modellfehlern auch fehlerhafte meteorologische Modellrandbedingungen in Frage sowie Störungen der Messungen, z.B. durch Bodenbearbeitung oder Bodenerosion in Folge von Starkniederschlägen. Auch die modellmäßige Aufteilung der Bodenniederschläge auf Infiltration und

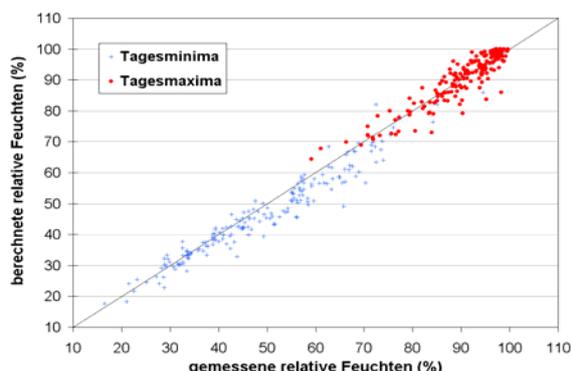


Abb. 4: Vergleich der berechneten und gemessenen Tagesmaxima und -minima der relativen Luftfeuchten in der Laubwand

Fig. 4: Simulated versus measured daily maximum and minimum values of relative air humidity near the leaves

berechneten und gemessenen Tagesmaxima und -minima der Bestandslufttemperaturen. Auch für diese Größen belegen die statistischen Kennzahlen in Tab. 1 eine gute Modellqualität.

Tab. 1: Statistische Daten zur Modellvalidierung (100. bis 280. Tag, bzw. 133. bis 263. Tag 2006) (WILLMOTT, et al., 1985)

Tab. 1: Model statistics for the year 2006 (doy 100 to 280, resp. 133 to 263)

	TBo_5	TBo_10	TBe	min(rFBe)	max(rFBe)	Sollwert
Anzahl	4343	4343	3143	97	97	
Mean Abs. Err.	1.283	1.142	1.285	2.927	2.260	0
(Residual) Bias	0.557	0.654	-0.010	-1.930	-0.398	0
Root Mean Square Deviation	1.632	1.441	1.665	3.822	3.162	0
Index of Agreement	0.977	0.977	0.979	0.979	0.958	1
Coeff. of Efficiency	0.905	0.905	0.919	0.925	0.822	1
Coeff. of Determination	0.930	0.865	1.029	1.235	0.836	1
Pearson Goodness R ²	0.922	0.934	0.920	0.951	0.854	1
lineare Regression y=a+bx:						
A	0.766	1.114	0.517	-2.587	14.258	0
B	0.931	0.907	0.973	1.097	0.846	1
r ²	0.922	0.934	0.920	0.951	0.854	1

Oberflächenabfluss führte offenbar mehrfach zu deutlichen Abweichungen der Bodentemperaturen. Die statistischen Kennzahlen nach Willmott, et al. (1985) zur Validierung der 4343 Stundenwerte (siehe Tab. 1) beweisen trotzdem eine insgesamt gute Qualität der Modellierung der Bodentemperaturen in 5 und 10 cm Tiefe.

Durch eine gute Übereinstimmung der für die Laubwände berechneten mit den dort gemessenen Größen lässt sich eine gute Modellierung des Energiehaushalts der Pflanzen belegen. Erst vom 133. Tag an war eine deutliche Bestandsentwicklung zu verzeichnen. Für den Zeitraum vom 133. bis zum 263. Tag (13. Mai bis 20. September 2006) gibt Abb. 3 einen Überblick über die

Die Feuchte-Messwerte waren teilweise nicht zur Validierung geeignet, weil einige Psychro-

meter offensichtlich häufiger trocken gefallen waren. Abb. 4 stellt Messwerte der Bestandsfeuchten den zugehörigen Modellergebnissen gegenüber. Auch hier treten wieder einige deutliche Abweichungen auf, für die zum Teil auch Messfehler die Ursache sein dürften. Die Qualität der Modellierung der Bestandsfeuchte ist insgesamt befriedigend (Tab. 1).

Die fünf eingesetzten Blattbenetzungssensoren erwiesen sich im einzelnen als wenig zuverlässig. Beim Vergleich mit der Mehrheit der einzelnen Sensoren zeigte sich jedoch eine gute Übereinstimmung der modellierten und gemessenen Benetzungsdauern, wie die kumulative Darstellung (Abb. 5) erkennen lässt.

4 Schlussfolgerungen

Die Modelländerungen an dem eindimensionalen Modell dienten dem Zweck, auch für Weinbestände mit ihrer Reihenstruktur bestandsklimatische Größen zu berechnen. Dabei wurden Messwerte aus dem Jahr 2005 benutzt um die Modelländerungen zu kalibrieren. Die zur Validierung benutzten Ergebnisse für das Jahr 2006 zeigen eine überwiegend gute Übereinstimmung der modellierten mit den berechneten Werten. Für die verbleibenden Abweichungen gibt es eine Reihe möglicher Erklärungen. Auf Seiten des Modells kommen insbesondere unvermeidliche Unzulänglichkeiten bei der Modellierung der Bodenhydraulik und der aerodynamischen Transporte sowie bei der Parametrisierung der thermischen und optischen Eigenschaften der Bodenoberfläche und der Bestandsentwicklung in Frage. In einigen Fällen werden auch Abweichungen durch Fehler der Messwerte, sowohl der meteorologischen Modellrandbedingungen, als auch der Validierungsgrößen, verursacht worden sein. Es ist nicht damit zu rechnen, dass eine wesentlich bessere Übereinstimmung durch Verwendung eines mehrdimensionalen Modells erreicht werden kann.

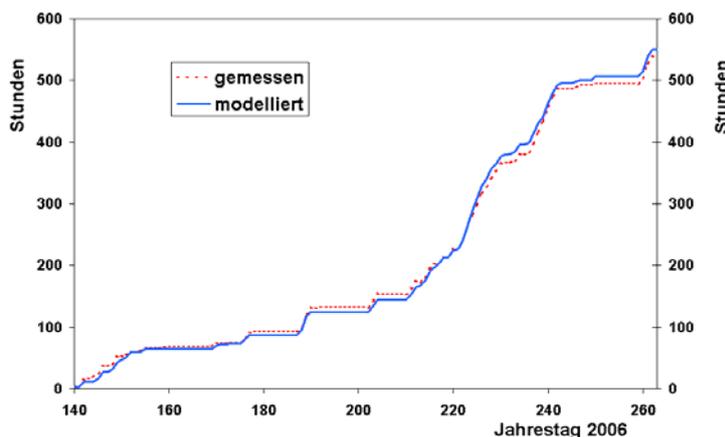


Abb. 5: Kumulative Darstellung der modellierten und gemessenen Blattbenetzung

Fig. 5: Cumulative modelled and measured leaf wetness

Literatur

BRADEN, H., 1995: The model AMBETI. - A detailed description of a soil-plant-atmosphere model. - Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. **195**, Offenbach am Main, 117 p..

- FRIDAY, J.B., AND J.H. FOWNES, 2001: A simulation model for hedgerow light interception and growth. - *Agric. For. Meteorol.* **108**, 29-43.
- GANIS, A., 1997: Radiation transfer estimate in a row canopy: a simple procedure. - *Agric. For. Meteorol.* **88**, 67-76.
- GIJZEN, H. AND J. GOUDRIAAN, 1989: A flexible and explanatory model of light distribution and photosynthesis in row crops. - *Agric. For. Meteorol.* **48**, 1-20.
- GOUDRIAAN, J., 1977: *Crop micrometeorology: A simulation study*, Pudoc, Wageningen, 249 p.
- MAO, G., AND K. KURATA, 1997: Wind tunnel experiment on turbulent diffusion suppression by row covers. - *Agric. For. Meteorol.* **86**, 283-290.
- OYARZUN, R.A., C.O. STÖCKLE AND M.D. WHITING, 2007: A simple approach to modeling radiation interception by fruit-tree orchards. - *Agric. For. Meteorol.* **142**, 12-24.
- RIOU, C., P. PIERI AND C. VALANCOGNE, 1987; Variation de la vitesse du vent a l'interieur et au-dessus d'une vigne. - *Agric. For. Meteorol.* **39**, 143-154.
- TRAMBOUZE, W. AND M. VOLTZ, 2001: Measurement and modelling of the transpiration of a Mediterranean vineyard. - *Agric. For. Meteorol.* **107**, 153-166.
- WILLMOTT, C.J., S.G. ACKLESON, R.E. DAVIS, J.J. FEDDEMA, K.M. KLINK, D.R. LEGATES, J.O'DONNELL, C.M. ROWE, 1985: Statistics for the evaluation and comparison of models. - *J. Geophys. Res.* **90**, Nr. C5, 8995-9005.

Anschrift der Autoren

Dr. Harald Braden, Deutscher Wetterdienst, Agrarmeteorologische Forschung Braunschweig, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

Dr. Cathleen Frühauf, Deutscher Wetterdienst, Agrarmeteorologische Außenstelle Geisenheim, Kreuzweg 25, 65366 Geisenheim

Das Weinanbaugebiet Luxemburg – Klassifizierung der Weinbergslagen

Cathleen Frühauf¹, Dieter Hoppmann¹, Uwe Sievers², Peter-Hinrich Voss² und
Heidrun Jagoutz¹

Deutscher Wetterdienst, ¹Agrarmeteorologie, ²Klima- und Umweltberatung

Zusammenfassung

Unter den Produktionsverhältnissen an der Nordgrenze des Weinbaus fällt dem Klima eine wichtige Bedeutung bei der Qualitätsbildung zu. Vorgestellt wird die Lagenklassifizierung der Weinbergflächen in Luxemburg. Ausgangspunkt für die Begutachtung waren zum einen langjährige Klima- und phänologische Daten und zum anderen topographische und orographische Grunddaten. Das Gebiet wurde in einem Raster mit einem Gitterpunktabstand von 20 x 20 m untersucht. Mit der Erstellung der geländeklimatischen Karten für die Weinbaugebiete in Luxemburg wird exemplarisch gezeigt, dass es möglich ist, Weinbaustandorte im Hinblick auf die Güte geographisch zu differenzieren.

The wine growing area of Luxemburg – Classification of vineyard sites

Abstract

Climate plays a major role in the quality formation of wines along the northern boundary of viticulture. This study presents the site classification of the wine-growing areas in Luxembourg. The assessment of the wine-growing areas starts out from long-term climate and phenological data on the one hand and basic topographic and orographic data on the other. The grid used has a mesh width of 20 x 20 m. The compilation of topoclimatic maps for the wine-growing areas of Luxembourg shows exemplarily that it is possible to differentiate vineyard sites geographically with regard to quality.

1 Einleitung

Weinbau wird in Luxemburg und Deutschland auf klimatisch begünstigten Standorten durchgeführt. Die Jahrgangs- und Standortunterschiede sind ein beredtes Beispiel für den Einfluss des Klimas auf die Qualität des Lesegutes.

Eine differenzierte Analyse des Rebstandortes führt zu einer Optimierung der Bewirtschaftung. So bietet eine Standortkartierung dem Winzer Entscheidungshilfen für die Auswahl von Rebsorten und Unterlagen und eine qualitative Bewertung der Rebstandorte ist möglich.

Vorgestellt wird die Lagenklassifizierung des Weinanbaugebietes Luxemburg. Ausgangspunkt für die Begutachtung der Weinbergflächen waren zum einen langjährige Klima- und phänologische Daten (1970-1999) und zum anderen topographische und orographische Grunddaten. Das Gebiet wurde in einem Raster mit einem Gitterpunktabstand von 20 x 20 m untersucht.

2 Material und Methoden

Kartengrundlagen

Die topographischen und orographischen Grunddaten stellte die Katasterverwaltung von Luxemburg zur Verfügung. Das Untersuchungsgebiet wurde in 6 verschiedene Teilgebiete ent-

lang der Mosel unterteilt und umfasst insgesamt 444.800 Gitterpunkten (17.792 ha), wovon 38.750 in Rebflächen (1.550 ha) liegen.

Modelle

Mit dem Windmodell MUKLIMO_3 (SIEVERS, 1990, 1995) werden die Strömungsverhältnisse in inhomogenem Gelände simuliert. Für die vorliegende Untersuchung wird es als reines Windfeldmodell bei neutraler atmosphärischer Schichtung betrieben. An sonnigen, strahlungsreichen Tagen bildet sich bei geringen Windgeschwindigkeiten ein spezielles Bestandsklima heraus. Die Temperatur innerhalb des Rebbestandes liegt dann über den Temperaturen im Freiland. In den kühlen nördlichen Weinbauklimaten führt dies zu günstigeren Bedingungen bei der Qualitätsbildung der Trauben.

Mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 (SIEVERS, 2005) werden Kaltluftflüsse und Kaltluftansammlungen in orographisch gegliedertem Gelände berechnet. Als Ergebnis erhält man die flächenhafte Verteilung der Kaltlufthöhe und ihre mittlere Fließgeschwindigkeit zu beliebigen Simulationspunkten, z.B. nach einer, zwei, vier oder acht Stunden. Für die Untersuchung wurde ein Simulationszeitraum von acht Stunden gewählt. Dies entspricht der mittleren Andauer einer klaren Sommernacht. Während einer windstillen und trockenen Hochdruckwetterlage kann sich besonders viel Kaltluft bilden.

Die Ergebnisse der Geländeklimamodelle wurden mit den Daten aus einem temporären Messnetz validiert, das in der Zeit von April bis Oktober 2001 in einem Teilgebiet an 35 Messpunkten installiert war. Die Validierung des für den Rheingau entwickelten Temperaturmodells zeigt, dass es die geländeklimatischen Unterschiede im Teilgebiet in korrekter Weise beschreibt. Eine Übertragung der Modelle auf das Weinanbaugebiet in Luxemburg war somit möglich.

Das Rheingauer Mostgewichtmodell wurde für die Rebsorte Riesling entwickelt. Grundlage hierzu waren Standortuntersuchungen auf insgesamt 123 Testparzellen aus dem Zeitraum 1960 – 1984. Der Einfluss des Klimas auf das Wachstum und die Reife der Beere wechselt in den einzelnen Entwicklungsstadien der Rebe. Die Berechnung der Standortvariablen ist deshalb den phänologischen Entwicklungsstadien zugeordnet. Die berechneten potenziellen Mostgewichte basieren auf der Einteilung der Vegetationszeit in 3 Entwicklungsabschnitte: Vom Austrieb bis zur Vollblüte, von der Vollblüte bis zum Reifebeginn und vom Reifebeginn bis zur Lese. Die Reifezeit endet mit Beginn der Hauptlese. Bei längerer Ausreife und selektierender Lese können auch höhere Mostgewichte erzielt werden.

Aus den Höhendaten wurden Hangneigung und Hangrichtung berechnet, die wiederum als Eingangsgrößen für die weiteren Modelle verwendet werden. Alle Daten und Ergebnisse liegen in einem räumlichen Raster von 20 m x 20 m vor.

Da sich die geländeklimatischen Unterschiede in relativ ähnlicher Weise unterscheiden wie im Rheingau, kann daraus geschlossen werden, dass sich Unterschiede in der Traubenqualität ebenfalls in ähnlicher Weise ausprägen. Deshalb wurde das Rheingauer Modell zur Berechnung des potenziellen Mostgewichte für die Rebsorte Riesling auf das Untersuchungsgebiet Luxemburg übertragen.

3 Ergebnisse

Da das Untersuchungsgebiet sehr groß ist, sollen hier exemplarisch die Ergebnisse für die Umgebung des Ortes Machtum vorgestellt werden. In diesem Bereich treten die verschiedensten Hangrichtungen auf, die zu sehr unterschiedlichen geländeklimatischen Bedingungen führen.

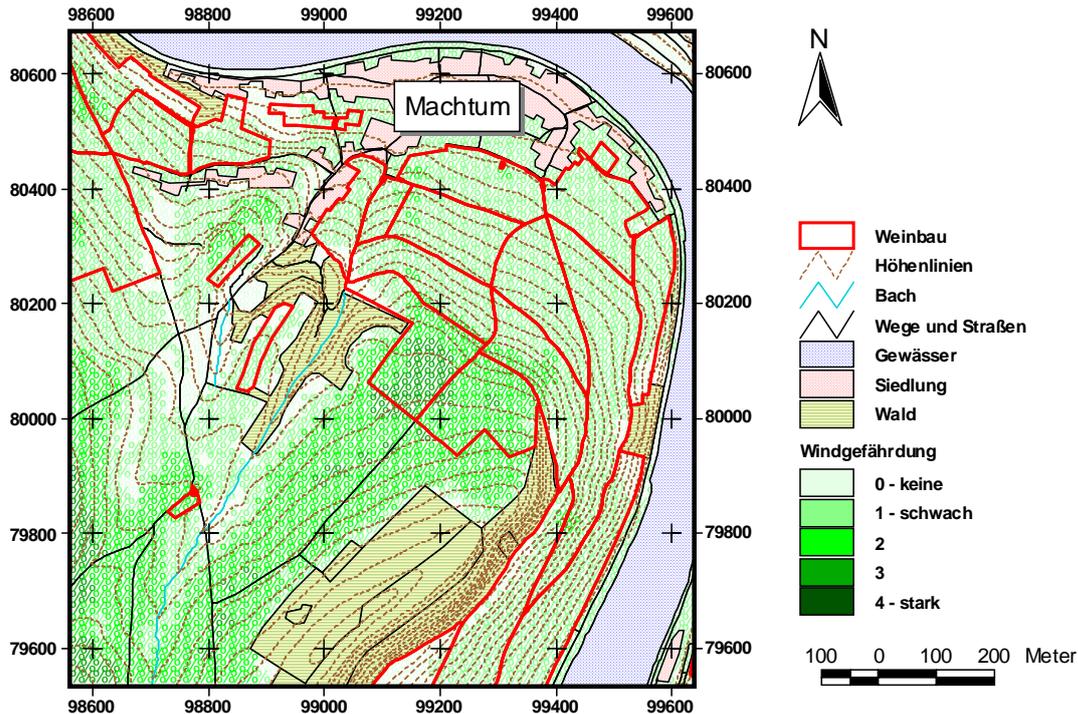


Abb. 1: Die berechnete Windgefährdung in 5 Gefährdungsstufen

Fig. 1: Calculated risk of wind in 5 risk classes

Die mit dem Windmodell MUKLIMO_3 berechneten Windgeschwindigkeiten in der Vegetationsperiode wurden in fünf Windgefährdungsstufen umgewandelt (siehe Abb.1). Für den größten Teil der rot markierten Rebflächen liegt nur eine schwache Windgefährdung vor. Für höher gelegene Rebflächen, die sich auf der Kuppe befinden und damit besonders windoffen sind, nimmt die Windgefährdung deutlich zu.

Abb. 2 zeigt die in Kaltluftgefährdungsstufen umgewandelten Ergebnisse des Kaltluftabflussmodells KLAM_21. Im betrachteten Ausschnitt treten nur die Gefährdungsstufen 4 bis 7 auf.

Die Kaltluft wird auf den Höhen gebildet und fließt dann in das Moseltal ab. Hindernisse stauen die Kaltluft, was deutlich in der Umgebung von Machtum zu erkennen ist.

Der Energiegewinn durch die Sonnenstrahlung ist ein entscheidender Faktor für die Güte einer Weinbergsfläche. Eine höhere Hangneigung wirkt sich positiv auf den Strahlungsgewinn für Hangrichtungen im Bereich zwischen Südwest und Südost aus. Bei West-Süd-West und Ost-Süd-Ost orientierten Hängen ist kaum noch eine Änderung im Strahlungsgewinn mit höheren Hangneigungen zu verzeichnen. Liegen die Hangneigungen zwischen West bis Nord bzw. Nord bis Ost sind höhere Hangneigungen ungünstig, denn die auftreffende Strahlung geht deutlich zurück. Gut ist dies in Abb. 3 für die Rebflächen oberhalb von Machtum zu erkennen. Der Hang ist im oberen Teil deutlich steiler als im unteren. Klimatisch begünstigt sind die nach Süd-Ost orientierten Hänge an der Mosel.

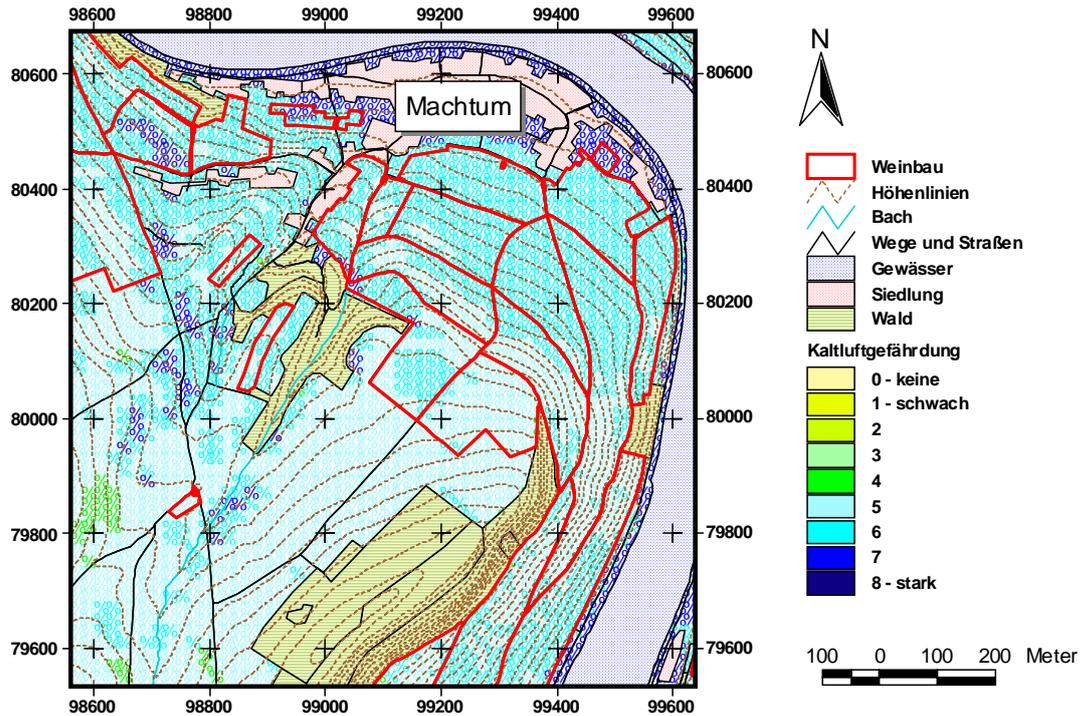


Abb. 2: Die berechnete Kaltluftgefährdung in 9 Gefährdungsstufen

Fig. 2: Calculated risk of cold air in 9 risk classes

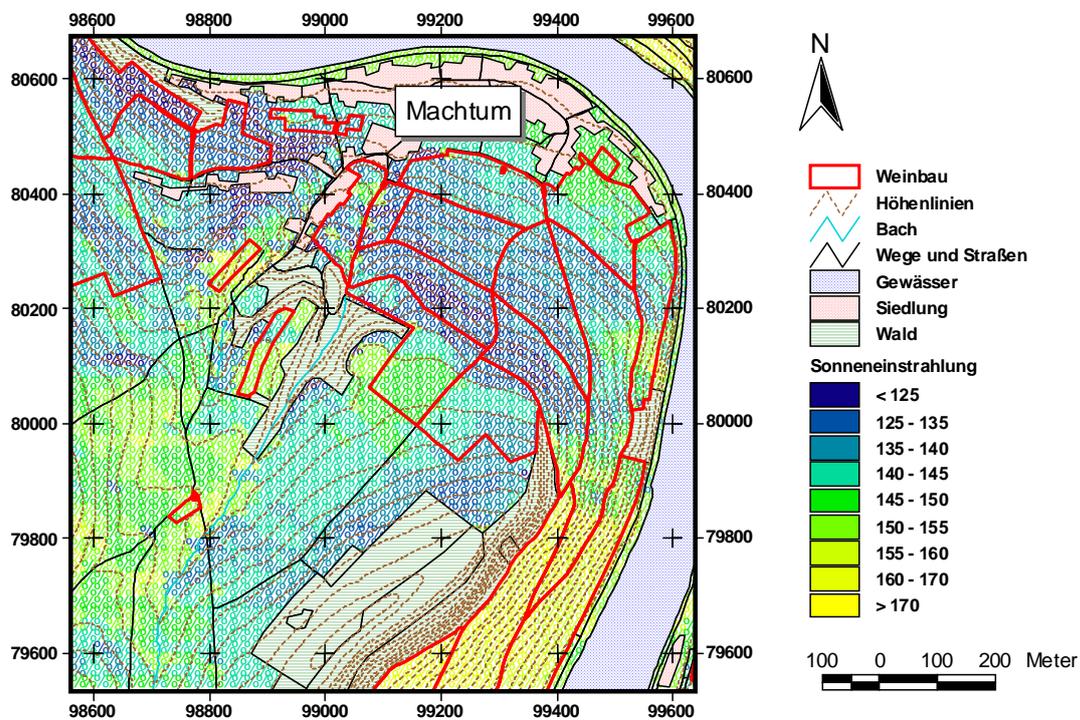


Abb. 3: Die Summe der direkten Sonneneinstrahlung [kJ/cm²] von April bis Oktober

Fig. 3: Sum of direct sun radiation [kJ/cm²] from April till October

An windschwachen Strahlungstagen kann sich in Rebbeständen ein spezielles Bestandsklima ausbilden. Die Temperatur im Inneren der Rebanlage liegt dann über der Temperatur in der

Umgebung. Besondere Bedeutung gewinnt dies in der Reifezeit. Die Einlagerung von Zucker in den Beeren hängt stark von der Temperatur ab. Je höher die Temperatur ist, desto mehr steigt der Zuckergehalt (Mostgewicht) in den Beeren an. Abb. 4 zeigt für das betrachtete Gebiet die zu erwartenden Unterschiede in der sich tagsüber ausbildenden Temperatur.

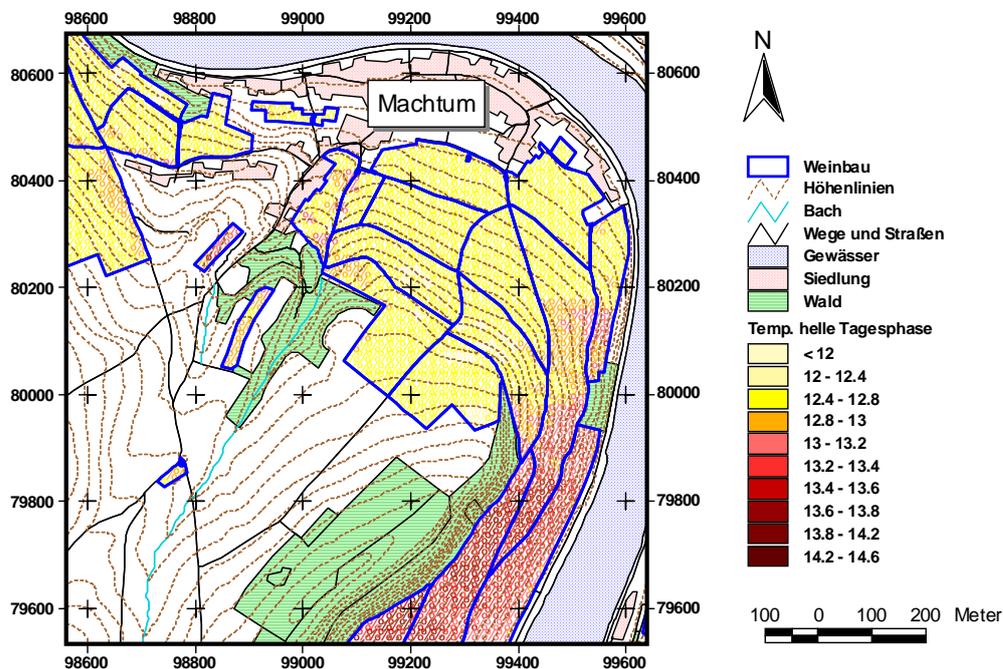


Abb. 4: Die Temperatur [°C] der hellen Tagesphase in der Reifezeit

Fig. 4: Daytime temperature [°C] in the ripening period

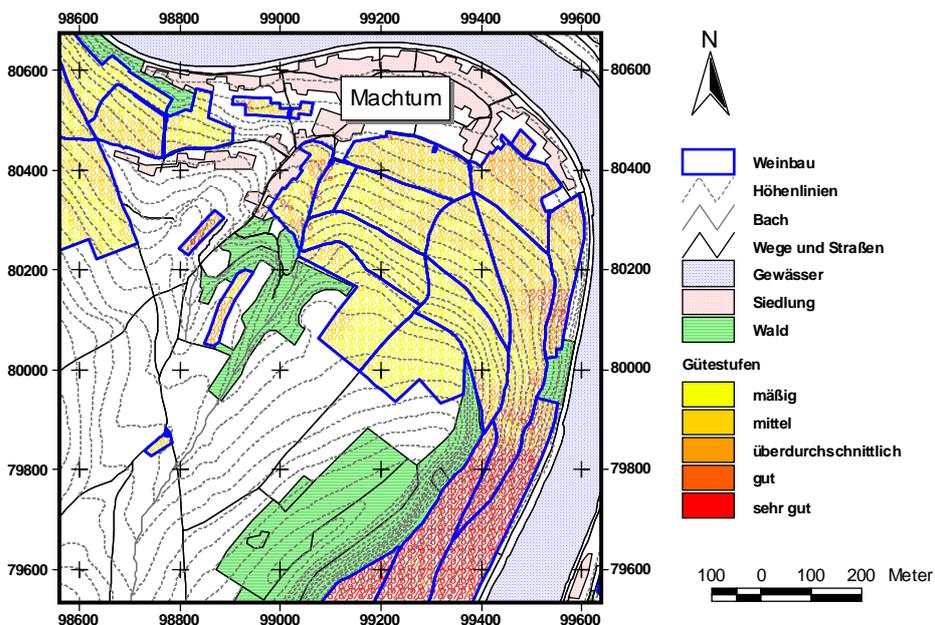


Abb. 5: Die Güte der Weinbergsflächen in 5 Klassen

Fig. 5: Vineyard quality in 5 classes

Mit dem Rheingauer Mostgewichtsmodell wurde für jedes Rasterelement das potenzielle Mostgewicht für die Rebsorte Riesling berechnet. In den Untersuchungen im Rheingau

schwankten die Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Mostgewichten in einem Wertebereich von $\pm 5^\circ$ Oechsle. Das berechnete Mostgewicht wird somit um $+ 5^\circ$ Oechsle erhöht, um das sogenannte potenzielle Mostgewicht für einen Einzelstandort zu erhalten. Dieser Zuschlag beinhaltet eine optimale Kulturführung.

Für jeden Gitterpunkt im Untersuchungsgebiet, der mit Reben bestockt ist, erhält man somit ein potenzielles Mostgewicht für die Rebsorte Riesling. Da die Rebsorte Riesling in Luxemburg kaum vertreten ist, werden die berechneten potenziellen Mostgewichte in fünf Gütestufen unterteilt (siehe Abb. 5). Verwendet wurden Schwellenwerte (20%, 40%, 60%, 80%), die sich aus der kumulierten prozentualen Häufigkeit aller Mostgewichte für das gesamte Untersuchungsgebiet ergeben. Aus diesen Schwellenwerte lassen sich die Grenzwerte für die Mostgewichte in den Klassen ermitteln.

Die erstellten Gütekarten dienen als Hilfsmittel für die Beratung der Winzer. So sind die Flächen mit den Klassifizierung „gut“ bis „sehr gut“ die klimatisch besonders begünstigten Lagen. Hier können wärmeliebendere Rebsorten angebaut werden. Für den Anbau frühreifender Sorten eignen sich die mit „mäßig“ bzw. „mittel“ ausgewiesenen Flächen.

4 Schlussfolgerungen

Mit der Erstellung der geländeklimatischen Karten für die Weinanbaugebiete in Luxemburg wird exemplarisch gezeigt, dass es möglich ist, Weinbaustandorte im Hinblick auf die Güte geographisch zu differenzieren. Es ist allerdings unstrittig, dass es neben den Standortbedingungen noch zahlreiche andere qualitätsbestimmende Faktoren gibt. Die sogenannte „Qualität im Glas“ mit den verschiedenen Inhaltsstoffen und Aromakomponenten wird nicht nur durch die Bedingungen von Klima und Boden geprägt, sondern ist das Resultat aus Standort, Kulturführung und Kellertechnik.

Die verwendeten geländeklimatischen Variablen schwanken von Jahr zu Jahr sehr stark. Die Ergebnisse der Gütekarte können daher nicht auf ein Einzeljahr übertragen werden, sondern stellen einen klimatologischen Mittelwert für den 30-jährigen Zeitraum von 1970 - 1999 dar.

Literaturverzeichnis

- SIEVERS, U., 1990: Dreidimensionale Simulationen in Stadtgebieten. In: Umweltmeteorologie, Sitzung des Hauptausschusses II am 7. und 8. Juni 1990 in Lahnstein. Schriftenreihe Band 15, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN. Düsseldorf.
- SIEVERS, U., 1995: Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen. - Meteorol. Zeitschrift N.F., 3-15.
- SIEVERS, U., 2005: Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21 – Theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells. - Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 227, Offenbach am Main, 101 p.

Anschrift der Autorin

Dr. Cathleen Frühauf, Dr. Dieter Hoppmann, Dr. Heidrun Jagoutz, Deutscher Wetterdienst, Abteilung Agrarmeteorologie, Außenstelle Geisenheim, Kreuzweg 25, D-65366 Geisenheim
Dr. Uwe Sievers, Peter-Hinrich Voss, Klima- und Umweltberatung, Deutscher Wetterdienst

Zur Geschichte der Phänologie in der Schweiz

Claudio Defila

MeteoSchweiz

Zusammenfassung

Bereits im Spätmittelalter wurden von Einzelpersonen phänologische Beobachtungen durchgeführt. In der Schweiz sind die berühmtesten phänologischen Datensätze von Johann Jakob Sprüngli (1717-1803). Später gab es immer wieder in einigen Regionen phänologische Netze, die von verschiedensten Institutionen gegründet wurden. Auch heute gibt es noch verschiedene phänologische Beobachtungsnetze in der Schweiz. Das offizielle Netz der Schweiz wurde 1951 von der MeteoSchweiz gegründet und ist bis heute in Betrieb. In den letzten Jahrzehnten, als erkannt wurde, dass die Phänologie ein guter Indikator für die Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Biosphäre ist, entstanden verschiedene internationale phänologische Projekte, und es wurden viele wissenschaftliche Arbeiten publiziert. Um den weiteren Einfluss des Klimawandels auf die Vegetation zu verfolgen, müssen weltweit die phänologischen Netze erhalten bleiben.

The history of phenological observations in Switzerland

Abstract

At the end of the Middle Age, some individuals were already recording phenological observations in Europe. In Switzerland, the most renowned data set was realized by Johann Jakob Sprüngli (1717-1803). Later, several observations networks, in different regions of the country, were initiated by various institutions. Nowadays, there are still several networks of phenological observations active in Switzerland. The national one was put together in 1951 by MeteoSwiss and is still in operation after more than 55 years. In the last decades, phenology has been recognised as a reliable indicator of the impact of global warming on the biosphere, and therefore several international projects were realized, and many scientific contributions published. In order to continue to monitor the influence of climate change on vegetation, it is necessary to maintain (and expand) phenological networks all over the world.

1. Die ersten phänologischen Beobachtungen in der Schweiz

Die ersten phänologischen Beobachtungen hatten unbewusst die Jäger und Sammler durchgeführt, mussten sie doch wissen, wann die Beeren reif sind oder wo und wann das Wild ihren Einstand hat. Auch die späteren Ackerbauern benötigten phänologisches Wissen, da sie die richtigen Saat- oder Erntetermine kennen mussten. Bereits aus dem Mittelalter sind fragmentarische Beobachtungen von landwirtschaftlichen phänologischen Phasen (Getreideernte oder Weinlese) und von Extremereignissen wie zum Beispiel die Kirschenblüte im Spätwinter oder Frühsommer überliefert. Aus dem 15. bis 17. Jahrhundert sind phänologische Beobachtungen von Einzelpersonen bekannt. Dies gilt auch für das 18. und 19. Jahrhundert. In dieser Periode sind die Aufzeichnungen von Johann Jakob Sprüngli (1717-1803) aus dem Kanton Bern besonders zu erwähnen. Insgesamt hat er Daten von über 4000 pflanzen- und tierphänologischen Beobachtungen gesammelt. Er hat rund 100 Pflanzenphänophasen, 9 Fruchtbäume, 37 landwirtschaftliche Aktivitäten und 37 Tierphänophasen beobachtet. Zusätzlich hat er auch Temperatur-, Niederschlags- und Luftdruckmessungen durchgeführt. Schon im 19. Jahrhundert gab es ein europäisches Netz mit Beteiligung der Schweiz.

Das erste schweizerische phänologische Beobachtungsnetz wurde von der Oekonomischen Gesellschaft Bern um 1759 gegründet. In den Jahrbüchern der Schweizerischen Meteorologi-

schen Gesellschaft findet man von 1864 bis ca. 1875 phänologische Daten. Der Bernische Forstdienst errichtete ein Waldphänonetz, deren Daten zwischen von 1869 – 1882 vorhanden sind und ausgewertet wurden (VASSELLA, 1997). Die älteste in der Schweiz bekannte phänologische Zeitreihe stammt aus Genf. Seit 1808 wird in der Stadt Genf der Blattausbruch der Rosskastanie beobachtet und notiert. Dieses Ereignis bedeutet für Genf der Frühlingsbeginn. Als im Oktober 2006 diese Rosskastanie stellenweise nochmals blühte und ihre Blätter entfaltete, wusste man nicht so recht, ob dies bereits der Frühlingsbeginn 2007 ist. In Liestal wird seit 1894 die Blüte der Kirschen beobachtet. Beide phänologischen Zeitreihen zeigen einen deutlichen Trend zu immer früheren Eintrittsterminen. Somit hat die Schweiz auch sehr lange phänologische Zeitreihen, wenn sie auch nicht soweit zurückreichen wie die Zeitreihe der Blüte in Japan.

2. Das phänologische Beobachtungsnetz der MeteoSchweiz

1951 gründete der damalige Leiter der Agrarmeteorologie der Meteorologischen Zentralanstalt (MZA), Bernard Primault, das erste offizielle phänologische Beobachtungsnetz in der Schweiz, das nach einigen Anpassungen noch heute in Betrieb ist. Mit den phänologischen Daten wollte man der Landwirtschaft möglichst viele Informationen über die Vegetationsentwicklung zur Verfügung stellen. Von anfänglich etwa 70 phänologischen Beobachtungsstationen ist das Netz heute auf rund 160 Stationen angewachsen, die alle Regionen der Schweiz abdecken und von 200 m/M bis 1800 m/M reichen.

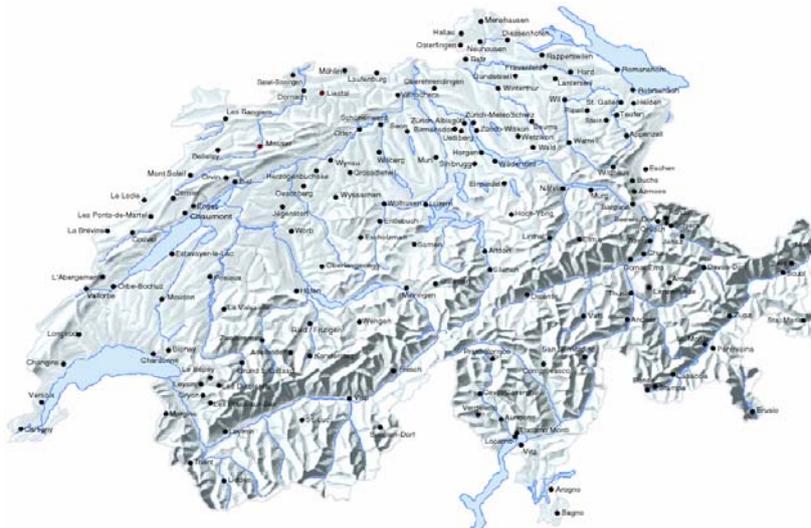


Abb. 1: Das phänologische Beobachtungsnetz der Schweiz (MeteoSchweiz)

Fig. 1: Phenological Network of Switzerland (MeteoSwiss)

Von den 1951gegründeten Beobachtungsstationen sind heute noch 17 in Betrieb, die lückenlos Daten lieferten. Das Beobachtungsprogramm von 1951 umfasste 9 Kräuter, 15 Bäume/Sträucher, 12 Kulturpflanzen und drei Zugvögel sowie der erste Reif im Herbst. Bereits 1953 wurde das Beobachtungsformular neu gestaltet. Die Namen der Pflanzen wurden im selben Formular in drei Sprachen (französisch, deutsch und italienisch) angegeben. 1996 wurde das phänologische Beobachtungsprogramm überarbeitet. Aufgrund von ausführlichen Auswertungen (DEFILA, 1991) wurden einige Pflanzen und Phänophasen nicht mehr ins Programm aufgenommen, da die Qualität der Daten ungenügend war. Da die Landwirtschaft an den Daten der Kulturpflanzen nicht interessiert war, und die Vogelwarte Sempach genügend

Daten über Vogelzüge besass, wurde beschlossen, die Anzahl Kulturpflanzen stark zu reduzieren und die Vogelphänologie ganz wegzulassen. Bis 1986 waren alle Daten nur auf Papier vorhanden, und so mussten alle Daten elektronisch zurückerfasst werden. Mitte der Neunzigerjahre erlebte die Phänologie weltweit „dank“ der Klimaerwärmung einen starken Aufschwung. In verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten konnte nachgewiesen werden, dass infolge der allgemeinen Erwärmung die phänologischen Eintrittstermine (vor allem im Frühling) einen Trend zu früheren Terminen aufweisen. Somit lag nun der Fokus beim neuen Beobachtungsprogramm bei der Beibehaltung von möglichst vielen gut beobachtbaren Phänophasen und langen Beobachtungsreihen. Für die Auswertung von langen phänologischen Zeitreihen eignen sich die Kulturpflanzen schlecht, da in der Pflanzenzüchtung, Anbaumethode, Düngung, Schädlingsbekämpfung etc. in der Landwirtschaft sich in den letzten Jahrzehnten sehr viel verändert hat. So enthält das aktualisierte Programm 26 Pflanzenarten und 69 Phänophasen. Es handelt sich dabei um 14 wild wachsende Bäume/Sträucher, 8 Kräuter und 4 Kulturpflanzen. Die Beobachtungsblätter werden dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz einmal pro Jahr nach Ende der Vegetationsperiode zugesandt, und die Daten werden danach elektronisch erfasst. Nun möchte die Bevölkerung oder die Presse auch während der Vegetationsperiode über den Stand der Vegetationsentwicklung orientiert sein. Insbesondere interessieren besonders frühe oder späte Jahre. Deshalb wurde 1986 ein Sofortmeldenetz und –programm eingeführt. Aus den 160 Beobachtungsstationen wurden 40 ausgewählt, die über möglichst lange Beobachtungsreihen verfügen und die verschiedenen Regionen und Höhenlagen abdecken. Es wurden 17 Phänophasen, die sich über die ganze Vegetationsperiode (von der Blüte der Hasel bis zur Blattverfärbung der Buche) erstrecken, ausgewählt und deren Eintrittstermine werden sofort der MeteoSchweiz gemeldet. Mit einer speziellen Statistik werden die Daten pro Phänophase und Station in fünf Klassen von sehr früh, früh, normal, spät bis sehr spät eingeteilt. Aufgrund dieser Auswertungen werden während der Vegetationszeit wöchentlich phänologische Bulletins erstellt und via Internet verbreitet

Wie der Name bereits sagt, sind phänologische Beobachtungen keine Messungen sondern Beobachtungen und somit in einem gewissen Grad subjektiv. Damit die phänologischen Daten der verschiedenen Stationen vergleichbar sind, müssen sie aufgrund derselben Kriterien erhoben werden, das bedeutet, dass die Beobachterinnen und Beobachter eine Anleitung brauchen. 1957 hatte Bernard Primault die erste Anleitung geschrieben. Sie wurde illustriert mit sehr guten Zeichnungen von S. Schwirzer. Er nannte dieses Buch „Phänologischer Atlas“ (PRIMAULT, 1971). Nach der Änderung des Beobachtungsprogramms 1996 wurde eine neue Anleitung dringend notwendig. In einer kleinen Arbeitsgruppe, zusammen mit dem Geographischen Institut der Universität Bern, wurde diese Anleitung erarbeitet. Bald wurde allen klar, dass nicht nur eine Anleitung für BeobachterInnen entstehen soll sondern ein Werk, das dem Leserkreis die Phänologie bekannt und näher bringen soll. So entstand das zweisprachige (deutsch, französisch) Buch mit dem Titel „Pflanzen im Wandel der Jahreszeiten- Anleitung für phänologische Beobachtungen“ (BRUEGGER und VASSELLA, 2003). Das Buch ist zweisprachig (deutsch, französisch). Nach einer Einführung in die Phänologie folgen ausführliche Beobachtungsrichtlinien sowie ein Kapitel über Forschung und Anwendungen der Phänologie. Von den BeobachterInnen wird diese neue Anleitung sehr geschätzt.

Neben diesem gesamtschweizerischen phänologischen Netz gibt es auch Spezialnetze sowie regionale Netze wie zum Beispiel Beobachtungen von Phänologischen Stadien an Kulturpflanzen, die für Frostwarnungen und Schädlingsbekämpfungsmassnahmen dienen. 1970 wurde das Berner Phänologienetz des Geographischen Institutes der Universität Bern gegründet. Dazu kommen Beobachtungen der Vogelzüge der Vogelwarte Sempach oder Pollenmessungen der MeteoSchweiz und noch viele Einzelbeobachtungen von interessierten NaturbeobachterInnen. Auch ein Internationale Phänologischer Garten (IPG) ist bei der For-

schungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) in Birmensdorf angesiedelt. Seit 1994 werden im Schweizerischen Nationalpark im Engadin einige phänologische Beobachtungen durchgeführt. Das Beobachtungsprogramm konzentriert sich vor allem auf alpine Pflanzen. Die Idee dieser Beobachtungen besteht darin, dass in einer alpinen Gegend, die vom Menschen kaum beeinflusst wird, auch eine phänologische Datensammlung entsteht. Nach etwa 20 Beobachtungsjahren kann dann dieser Datensatz wissenschaftlich ausgewertet werden.

2004 wurde der Phänologie-Kreis Schweiz gegründet, wo alle an der Phänologie interessierten Personen zweimal pro Jahr einen phänologischen Rundbrief erhalten und zwei Veranstaltungen pro Jahr durchgeführt werden.

3. Wissenschaftliche Ergebnisse

Die ersten Auswertungen und Publikationen der phänologischen Daten der MeteoSchweiz stammen vom Gründer des Netzes (PRIMAULT, 1971). Nachdem die phänologischen Daten elektronisch zur Verfügung standen, wurden regelmässig phänologische Berichte publiziert. Wie in vielen anderen Ländern könnte auch in der Schweiz, vor allem bei den phänologischen Frühlingsphasen, ein Trend zu immer früheren phänologischen Eintrittsterminen festgestellt werden (DEFILA und CLOT, 2001).

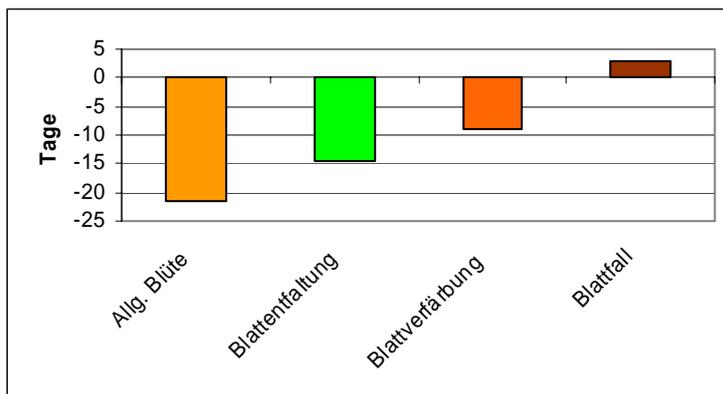


Abb. 2: Trends verschiedener Phänophasen in der Schweiz (1951-2000) (aus DEFILA, 2004)

Fig. 2: Trends of the different phenophases in Switzerland (1951-2000) (from DEFILA, 2004)

Für ein Gebirgsland wie die Schweiz ist auch die alpine Phänologie von grosser Bedeutung. So wurden die unterschiedlichen Trends in den Alpen und im Tiefland untersucht (Defila u. Clot, 2005).

Aber auch international war die Schweiz an verschiedenen Projekten beteiligt, z.B. bei der COST 725-Aktion (Establishing a European Phenological Data Platform for Climatological Applications). Die ersten Ergebnisse der COST725-Aktion (MENZEL et al., 2006) sind für die Schweiz besonders wichtig, da bei diesen Auswertungen ersichtlich wurde, dass die phänologischen Trends in der Schweiz ähnlich sind wie diejenigen der Nachbarländer. Dies gibt auch gewisse Rückschlüsse betreffend der Datenqualität. Die Datenqualitätskontrolle spielt bei dieser europäischen Datenbank eine wichtige Rolle. Zurzeit wird in der Schweiz ein Plausibilitätstest geprüft, der Limiten pro Phänophasen für fünf Höhenstufen berücksichtigt.

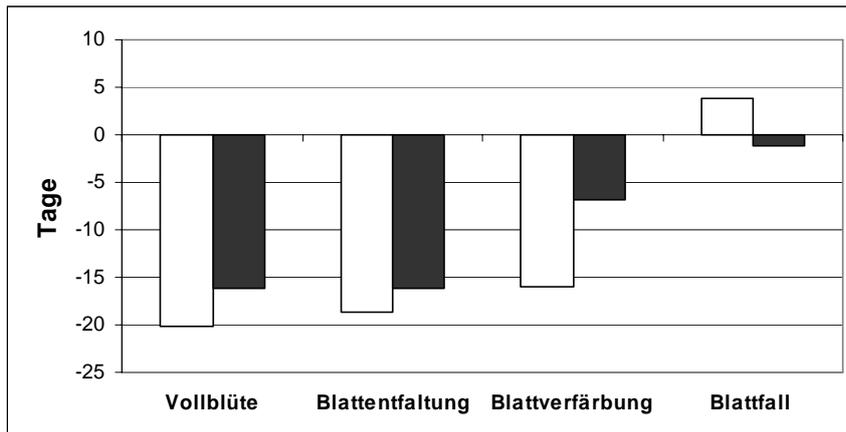


Abb. 3: Trends der verschiedenen Phänophasen im Tiefland (weisse Säulen) und in den Alpen (schwarze Säulen), 1951-2002 (aus DEFILA und CLOT, 2005)

Fig. 3: Trends of the different phenophases in the lowland (white bars) and in the alpine region (black bars), 1951-2002 (from DEFILA und CLOT, 2005)

Auch am GLOBE-Phänologie Programm beteiligt sich die Schweiz. Mit diesem Programm sollen die Lehrpersonen aufgefordert werden, mit ihren SchülerInnen weltweit phänologische Beobachtungen durchzuführen. Durch die Eingabe der Daten erhalten sie direkt Auswertungen in Form von Karten oder Diagrammen. Eine gute Möglichkeit den Jugendlichen das genaue Beobachten in der Natur näher zu bringen.

Für die Zukunft sehen wir Probleme bei der Rekrutierung von geeigneten BeobachterInnen. Phänologische Aufnahmen mittels Fotografien oder Satellitenbilder (STUDER et al., 2007) könnten eine gute Ergänzung zu den traditionellen Beobachtungen sein.

4. Schlussfolgerungen

Die Phänologie hat in der Schweiz eine lange Tradition. So spielen Einzelbeobachtungen und Netzbeobachtungen in der Vergangenheit und in der Gegenwart eine wichtige Rolle. Solche phänologischen Daten sind von grossem Wert. Sie zeigen den zeitlichen Rahmen der jährlichen Vegetationsentwicklung in historischen Zeiten sowie in der Gegenwart. Die phänologischen Daten sind ein guter Indikator für Einflüsse von Umweltveränderungen (z.B. Klimaerwärmung) auf die Vegetation. Da nicht bekannt ist, wie die Pflanzenentwicklung auf eine zukünftige Erwärmung reagiert, müssen die phänologischen Beobachtungsnetze unbedingt weltweit erhalten bleiben.

Literaturverzeichnis

- BRUEGGER, R., A. VASSELLA, 2003: Pflanzen im Wandel der Jahreszeiten – Anleitung für phänologische Beobachtungen. – GEOGRAPHICA BERNENSIA, 287 S.
- DEFILA, C., 1991: Pflanzenphänologie der Schweiz. - Veröff. der Schweiz. Meteorologischen Anstalt, Nr. 50, 235 S.
- DEFILA, C., B. CLOT, 2001: Phytophenological trends in Switzerland. – Int. J. Biometeorol. 45, 203-207
- DEFILA, C., 2004: Regionale Trends bei pflanzenphänologischen Zeitreihen in der Schweiz. - Meteorologen-Tagung DACH 2004, Karlsruhe. Langfassung der Beiträge auf CD, 6 S.

- DEFILA, C., B. CLOT, 2005: Phytophenological Trends in the Swiss Alps, 1951-2002. - Meteorol. Z. **14**, 191-196
- MENZEL et al., 2006: European phenological response to climate change matches the warming pattern. - Global Change Biology **12**, 1-8
- PRIMAULT, B., 1971: Phänologischer Atlas. - 3. Auflage, Zürich 1971, 76 S.
- PRIMAULT, B., 1971: Comparaison des méthodes climatiques et phénologiques pour la détermination des vocations culturales d'un lieu donné. - Verhandlungen der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft **15**, 134-135
- STUDER et al., 2007: A comparative study of satellite and ground-based phenology. - Int J Biometeorol, in press.
- VASSELLA, A., 1997: Phänologische Beobachtungen des Bernischen Forstdienstes von 1869 bis 1882: Witterungseinflüsse und Vergleich mit heutigen Beobachtungen. Phänologie von Waldbäumen. - Umwelt-Materialien **73**, BUWAL, 9-75

Anschrift des Autors

Dr. Claudio Defila, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Krähbühlstrasse 58, CH-8044 Zürich

Trends phänologischer Phasen von Obstgehölzen unter Berücksichtigung sortenspezifischer Aspekte

Yvonne Henniges und Frank-M. Chmielewski

Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Pflanzenbauwissenschaften, Lehrgebiet Agrarmeteorologie

Zusammenfassung

Der beobachtete Anstieg der Lufttemperatur in den vergangenen ca. 30 Jahren hat zu eindeutigen Reaktionen in der Entwicklung von Obstgehölzen geführt. In der Obstanbauregion Niederelbe liegt das größte zusammenhängende Anbauggebiet Mitteleuropas und das nördlichste der Welt, das Alte Land. Bestimmend ist der Anbau von Äpfeln (89 %) und Kirschen (5 %). Der regionale Anstieg der Lufttemperatur beträgt hier in den letzten 30 Jahren 1,7 K (Station Esteburg). Die stärksten Veränderungen ergeben sich in den Monaten Januar, Februar, April und August. Als Folge dieses beobachteten Temperaturanstiegs haben sich die Entwicklungsstadien der Knospen und der Zeitraum der Blüte signifikant verfrüht. Für den Apfel betragen die Verfrühungen der Knospenentwicklung bis 20 Tage. Der Zeitraum der Blüte setzt in den letzten 30 Jahren ebenfalls 19 Tage früher ein.

Trends of phenological phases in consideration of cultivar aspects

Abstract

The observed increase in air temperature in the last 30 years led to distinct reactions in the development of fruit trees. Within the fruit growing area "Niederelbe" is located the largest connected fruit growing area in mid-Europe and the most northern in the world, "Altes Land". The cultivation of apple (89 %) and sweet cherries (5 %) is dominating. The regional increase in air temperature in the last 30 years is 1.7 °C (station Esteburg). The strongest changes occur in January, February, April and August. As a result of increasing temperatures the developmental stages of flower buds and the flowering period is significantly advanced. For apple the advancement of the bud development is up to 20 days and the beginning of flowering in the last 30 years is also advanced by 19 days.

1. Einleitung

Das nördlichste Obstanbauggebiet Deutschlands ist das Obstanbauggebiet Niederelbe. Es hat eine Gesamtoberfläche von ca. 10.500 ha, davon sind 9.872 ha Baumobstfläche (Stand 2004). Der Boden ist hauptsächlich Urstromtal der Elbe, alluviales Schwemmland und hat eine hohe potentielle Ertragsfähigkeit. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 8,6 °C, während der Vegetationsperiode von April bis Oktober 13,0 °C mit Jahresniederschlägen von 740 mm (460 mm in der Vegetationsperiode) und 1.500 Sonnenscheinstunden. Das „Alte Land“ ist das Kerngebiet der Niederelbe und ist wie folgt begrenzt: im Norden durch die Elbe, im Süden durch den Geestrand, im Westen durch den Fluss Schwinge und die Stadt Stade, im Osten durch die Stadt Hamburg. Auch im übrigen südlichen und nördlichen Niederelbegebiet und auf der Geest gibt es Obstanbau, jedoch nicht so zusammenhängend wie im „Alten Land“, wo der Obstbau praktisch die einzige Landwirtschaftsform darstellt. Das „Alte Land“ ist das größte zusammenhängende Obstanbauggebiet Mitteleuropas und das nördlichste der Welt und zum Teil geschichtlich und klimatisch bedingt das Epizentrum des norddeutschen Apfelbaus.

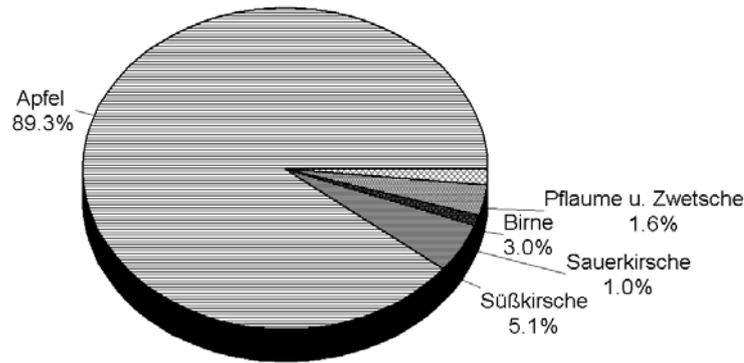


Abb. 1: Verteilung der Baumobstflächen im Obstanbaugebiet Niederelbe, 2004

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Klimawandel und Obstbau in Deutschland“ (KliO, BMBF 01LS05024), wurden Untersuchungen für das Gebiet des Alten Landes vorgenommen. Nachfolgend sollen die ersten Ergebnisse zu den Auswirkungen rezenter Temperaturänderungen auf die Entwicklung der Obstblüte in dieser Region präsentiert werden.

2. Daten und Methodik

Für die Untersuchungen zu den Veränderungen in der Pflanzenentwicklung im Alten Land wurden von der Obstbauversuchsanstalt der Landwirtschaftskammer Niedersachsen in Jork Daten zur der Entwicklung von Obstgehölzen (Apfel, Birne, Süßkirsche, Zwetsche) zur Verfügung gestellt. Neben den Blühterminen der einzelnen Obstarten, sind vereinzelt auch Daten zur Entwicklung der Blühknospen und zur Fruchtreife vorhanden. Die frühesten Beobachtungen liegen seit 1968 vor. Die phänologischen Daten wurden über viele Jahre von einer Person erhoben und stammen von den Versuchsflächen des OVB.

Begleitend zu den obstbaulichen Versuchen werden seit 1968 Klimadaten erhoben, die von der, in unmittelbarer Nähe zum Versuch gelegenen, Station Moorende-Esteburg (geogr. Länge: 9°41' E, geogr. Breite: 53°32' N) stammen. Hierdurch war es möglich, die Zusammenhänge zwischen Veränderungen in der Pflanzenentwicklung und im Eintreten phänologischer Phasen detailliert zu studieren.

Einzelne Ausfälle in den phänologischen Beobachtungen wurden mit Hilfe von Phasen anderer Sorten ergänzt, so dass für die Mehrzahl der Untersuchungen phänologische Daten im Zeitraum von 1976-2005 zur Verfügung standen.

3. Ergebnisse

3.1 Klimatische Verhältnisse im „Alten Land“

Die Jahresmitteltemperatur (1976-2005) an der Station Esteburg beträgt, bei einer mittleren Niederschlagshöhe von 745 mm (1991-2005), 9.1 °C. Das Jahresmittel der Lufttemperatur hat sich in den letzten 30 Jahren um 1,7 °C erhöht, wobei sich die stärksten Veränderungen im Januar und Februar sowie im April und August vollzogen haben (Tab. 1).

Tab. 1 Monats- und Jahresmittel der Lufttemperatur an der Station Esteburg, 1976-2005, x: Mittelwert, s: Standardabweichungen, T: 30-jähriger Trend, Signifikanz: *** $P < 0.01$, ** $P < 0.05$, * $P < 0.10$

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Jahr
x	1.2	1.6	4.5	8.2	13.0	15.6	17.6	17.3	13.5	9.3	5.0	2.1	9.1
s	2.9	2.7	1.8	1.4	1.4	1.3	1.8	1.6	1.3	1.5	1.4	2.3	0.8
T	2.8	3.1	1.2	3.0	1.4	0.9	2.2	3.2	2.1	0.2	-0.3	0.0	1.7
P		*		***			*	**	*				***

3.2 Veränderungen in der Pflanzenentwicklung

Der rezente Anstieg der Lufttemperatur widerspiegelt sich deutlich in der Entwicklung der Obstgehölze im Alten Land, wobei sich der Blühbeginn um wenigstens zwei Wochen verfrüht hat, im Extremfall sogar bis zu drei Wochen. Beim Apfel ergibt sich im Mittel über alle beobachteten Sorten eine Verfrüfung des Blühbeginns von -18.9 Tagen, bei der Birne von -18.2 Tagen, bei der Süßkirschen von -17.1 Tagen sowie bei der Zwetsche von -20.1 Tagen (Abb. 2). Ähnlich starke Veränderungen dieser Phänophase lassen sich auch für andere Regionen in Deutschland nachweisen, wie beispielsweise in Rheinland-Pfalz (HENNIGES et al. 2005).

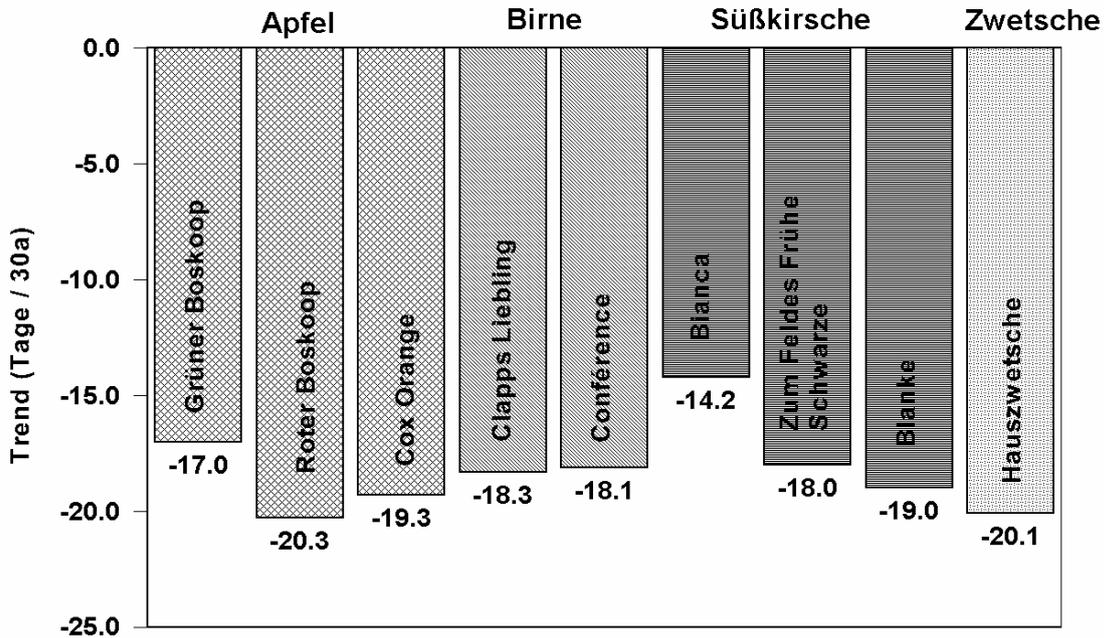


Abb. 2: Trends im Blühbeginn (BBCH 60) ausgewählter Obstarten und -sorten im Alten Land, 1976-2005

Diese markanten Verfrühungen im Beginn der Blüte sind bereits in der Entwicklung der Knospe erkennbar. Als Beispiel sei hier die mittlere Entwicklung der Apfelblüte dargestellt (Abb. 3). Bereits die sehr frühen Knospenstadien, wie „Grüne Spitzen“ (BBCH 53) und das „Mausohrstadium“ (BBCH 54) zeigen deutlichen Entwicklungsverfrühungen von bis zu -19.4 Tagen. In dieser Zeit nimmt die Frostresistenz der Knospe von -7.0 °C (BBCH 53) auf -0.5 °C (BBCH 60) stark ab.

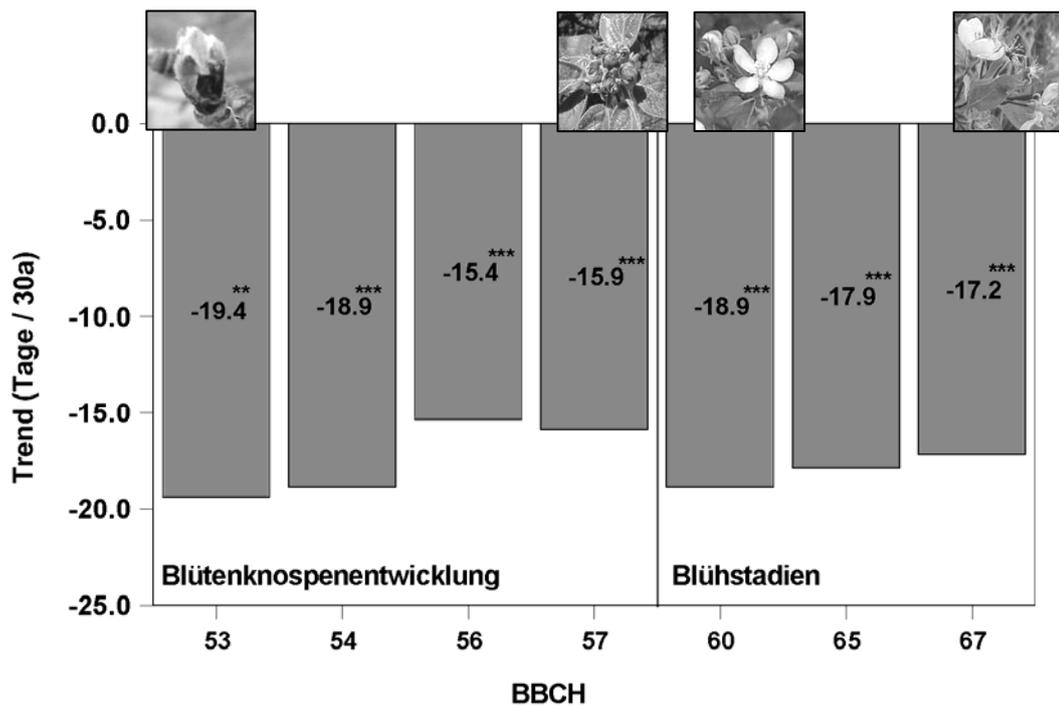


Abb. 3: Trends unterschiedlicher Phänophasen für den Apfel (Mittel aus den 3 Sorten Roter Boskoop, Grüner Boskoop, Cox Orange) im Alten Land, 1976-2005

Überraschend ist die Tatsache, dass die beobachteten Verfrühungen im Blühbeginn des Apfels größtenteils sortenunabhängig sind. Der mittlere Beginn der Apfelblüte variiert zwischen dem 29. April (Roter Boskoop) und 3. Mai (Elstar, Jonagold, Cox Orange).

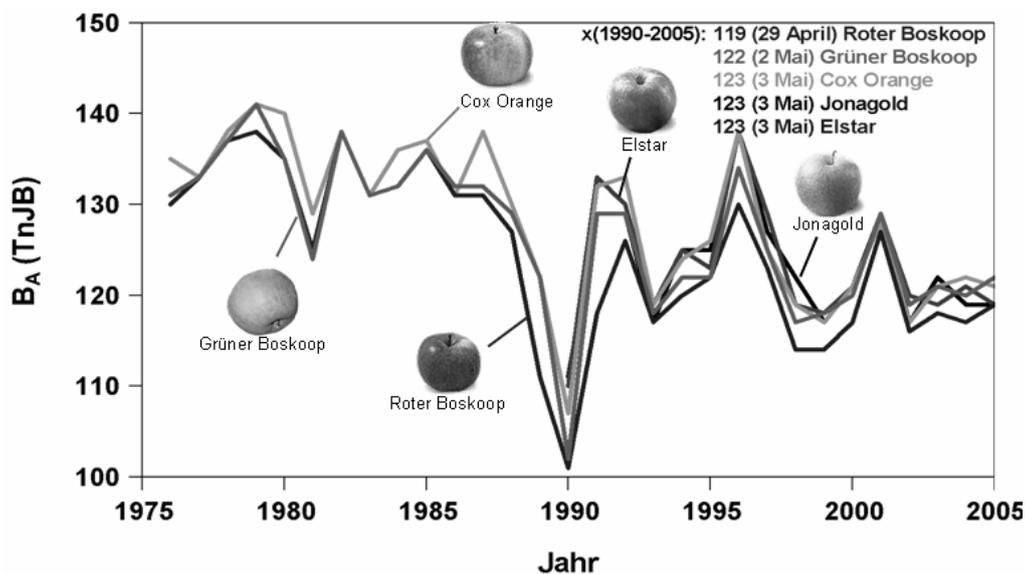


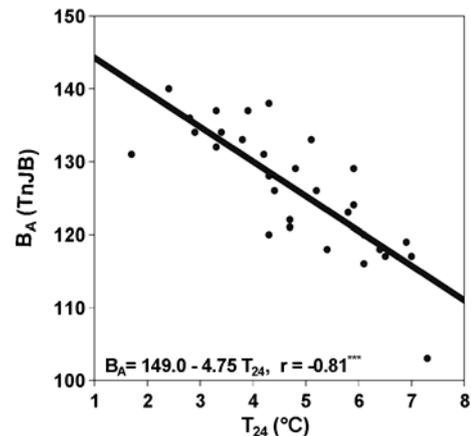
Abb. 4: Beginn der Apfelblüte (B_A) für verschiedene Sorten (Altes Land), 1976-2005, TnJB: Tage nach Jahresbeginn

Für die fünf untersuchten Apfelsorten (Roter Boskoop, Grüner Boskoop, Cox Orange, Elstar und Jonagold) ergeben sich im Mittel sehr ähnliche Trends. Die extrem warmen Monate Februar und März 1990 haben bei allen Sorten zu einer deutlichen Verfrühung des Blühbeginns geführt. Im Gegensatz hierzu hatten die kalten Winter 1978/79 und 1995/96, verbunden mit den unterdurchschnittlichen Temperaturen im März, eine signifikante Verspätung dieses Termins zur Folge.

3.3 Zusammenhang zwischen Temperatur und Pflanzenentwicklung

Die bisher gezeigten Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass die markanten Veränderungen in der Entwicklung der Obstgehölze im Zusammenhang mit dem beobachteten Temperaturanstieg stehen. Wie vorangehende Studien bereits gezeigt hatten (CHMIELEWSKI und RÖTZER 2001) ist ebenfalls für den Blühbeginn des Apfels der Temperaturverlauf zwischen Februar und April entscheidend. Der Korrelationskoeffizient zwischen beiden Größen ist mit $r = -0.81$ signifikant ($P < 0.01$). Eine Änderung der mittleren Februar-April Temperatur von 1 K hat im Alten Land eine Verfrühung des Blühbeginns von 5 Tagen zur Folge. Dieser Wert entspricht genau dem für den Blühbeginn des Apfels in Deutschland gefundenen Wert (CHMIELEWSKI et al. 2004).

Abb. 5: Zusammenhang zwischen der mittleren Lufttemperatur von Februar bis März (T_{24}) und dem Blühbeginn des Apfels (B_A) im Alten Land (Mittel der Sorten Roter Boskoop, Grüner Boskoop, Cox Orange), 1976-2005, T_{nJB} : Tage nach Jahresbeginn



Schlussfolgerungen

Die Studie hat gezeigt, dass alle untersuchten Obstarten im Alten Land in ähnlicher Weise auf den beobachteten Anstieg der Lufttemperatur mit einem früheren Blühbeginn reagiert haben. Hierbei ist der Temperaturverlauf in den vorangehenden drei Monaten (Februar-April) von außerordentlicher Bedeutung, wobei beispielsweise eine Temperaturerhöhung von 1 K eine Verfrühung in der Apfelblüte von 5 Tagen nach sich zieht. Die Unterschiede in der Blühverfrühung zwischen den einzelnen Obstsorten waren überraschend gering.

Literaturverzeichnis

- 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(1-2), 69-78.
- CHMIELEWSKI, F.-M., RÖTZER, T., 2001: Response of tree phenology to climate change across Europe. - *Agricultural and Forest Meteorology* 108, 101-112.
- HENNIGES, Y., DANZEISEN, H., ZIMMERMANN, R.-D., 2005: Regionale Klimatrends mit Hilfe der phänologischen Uhr, dargestellt am Beispiel Rheinland-Pfalz. - *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 17 (1), 28-34.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Yvonne Henniges, PD Dr. Frank-M. Chmielewski, Humboldt-Universität zu Berlin
Institut für Pflanzenbauwissenschaften, Lehrgebiet Agrarmeteorologie, Albrecht-Thaer-Weg
5, 14195 Berlin

Phänologische Modelle als Grundlage zur Abschätzung des Klimaimpakts

Frank-M. Chmielewski und Yvonne Henniges

Humboldt-Universität zu Berlin

Institut für Pflanzenbauwissenschaften, Lehrgebiet Agrarmeteorologie

Zusammenfassung

Auswirkungen rezenter Temperaturänderungen auf die Pflanzenentwicklung (Phänologie) sind vielfach belegt und anschaulich dargestellt. Die in diesem Jahrhundert zu erwartenden Klimaänderungen werden die bisher beobachteten Veränderungen der klimatologischen Größen um ein vielfaches übertreffen. Dies gilt vor allem für den Parameter Lufttemperatur. Für Deutschland ist bis zum Ende dieses Jahrhunderts ein mittlerer Anstieg der Lufttemperatur um +3.6 K möglich (REMO 2091-2100, Szenario A2). Regional und saisonal sind weitaus größere Veränderungen zu erwarten. Diese Zunahme der bodennahen Lufttemperatur wird eine weitere Verschiebung der phänologischen Phasen nach sich ziehen, mit möglichen Konsequenzen für die Frosthärte der Gehölze, die Häufigkeit von Spätfrostschäden oder die Andauer phänologischer Entwicklungsabschnitte. Prozessbasierte (mechanistische) Phänomodelle sind ein praktikables Werkzeug, mögliche Veränderungen in der pflanzlichen Entwicklung abzuschätzen. Für Fragen zu den Auswirkungen künftiger Klimaänderungen auf die Vegetationsentwicklung sind „chilling/forcing“ Modelle den reinen Wärmesummenmodellen vorzuziehen, da sich ein wesentlicher Anteil des erwarteten Temperaturanstiegs im Winter vollziehen wird.

Phenological models as basis to estimate the climate impact

Abstract

There are many graphic examples for the impact of recent temperature change on plant development (phenology). The expected climate change in this century will distinctly exceed the observed changes in the last century. This is mainly true for the air temperature. In Germany a rise of mean annual air temperature by +3.6 °C is possible in the end of this century (REMO 2091-2100, Scenario A2). Regionally and seasonally even higher changes are expected. The further increase of air temperature will continue the shift of phenological events, with possible consequences for the frost hardness of trees, the frequency of late frost damages and the duration of phenological stages. Mechanistic phenological models are suitable tools to estimate possible changes in plant development. In order to calculate the impact of future climate change on the plant development chilling/forcing models have to be used instead of simple thermal time models, since a strong increase of air temperature is expected in winter time.

1. Einleitung

Phänologische Modelle sind notwendige Hilfsmittel, um mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Vegetationsentwicklung abschätzen zu können. Darüber hinaus erlaubt die Implementierung dynamischer Vegetationszeiten in Bodenwasserhaushaltsmodellen eine verbesserte Berechnung des Wasserhaushalts von Forstbeständen, da hierdurch Rückkopplungen zwischen der Pflanzenentwicklung und dem Wasserbedarf berücksichtigt werden können (SCHABER und BADECK 2003, RÖTZER et al. 2004). In der vorliegenden Studie werden beispielhaft phänologische Modelle für die Blattentfaltung der Stieleiche und Rotbuche in Sachsen vorgestellt. Hierbei wurden sehr unterschiedliche Modellierungsansätze verwendet.

2. Daten und Methodik

2.1 Daten

Grundlage für die Entwicklung der phänologischen Modelle waren phänologische Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes in Sachsen. In Abhängigkeit von der jeweiligen Baumart und der betrachteten phänologischen Phase standen unterschiedlich viele Beobachtungsstationen zu Verfügung. Für die meisten Gehölze waren kontinuierliche Beobachtungsdaten für den Zeitraum von 1961 bis 2005 verfügbar. Darüber hinaus wurden zur Berechnung der phänologischen Modelle tägliche Werte der Lufttemperatur (Mittel, Min, Max) für die gesamte Landesfläche des Freistaates Sachsen in einem Raster von 500m x 500m für die Periode von 1961-2005 verwendet, die von der Firma UDATA bereitgestellt wurden.

2.2 Methodik

Phänologische Modelle sind wichtige Hilfsmittel, die es ermöglichen die Entwicklung von Pflanzen zu beschreiben. Obwohl die Pflanzenentwicklung ein sehr komplexer Prozess ist, der von vielfältigen Umweltfaktoren abhängt (Einstrahlung, Luft- und Erdbodentemperatur, Verfügbarkeit von Wasser, Bodenart, Nährstoffversorgung, etc.) wird in den mittleren und höheren Breiten die Pflanzenentwicklung maßgeblich durch die Lufttemperatur gesteuert.

In den gemäßigten Breiten, die durch eine winterliche Vegetationsruhe und durch aktives Pflanzenwachstum im Sommerhalbjahr gekennzeichnet sind, ist die Überwindung des winterlichen Ruhezustandes der Gehölze (Dormanz) in den Modellen zu berücksichtigen. In der Zeit der Dormanz findet kein aktives Wachstum statt. Diese Ruhephase dient der Überlebenssicherung der Pflanze im Spätherbst und Winter. Eingeleitet wird sie durch sinkende Tagestemperaturen und abnehmende Tageslänge. Die Dormanz laubabwerfender Gehölze wird erst durch die Erfüllung eines Kältebedürfnisses aufgehoben, d.h. die Pflanze muss über einen bestimmten Zeitraum, der von Pflanzenart zu Pflanzenart verschieden ist, tieferen Temperaturen (*chilling temperatures*) ausgesetzt sein, bevor die Knospen austreiben können.

Diesen Zustand erreichen die Bäume unter heutigen klimatischen Bedingungen meist schon gegen Ende des Jahres oder zu Beginn des Folgejahres. Erst jetzt können für das Wachstum der Gehölze förderliche Temperaturen die Entwicklung der Knospen forcieren, so dass nach dem Erreichen einer bestimmten effektiven Temperatursumme die Knospen im Frühjahr aufbrechen, die Blätter sich entfalten bzw. die Bäume und Sträucher zu blühen beginnen.

Ein Hauptproblem in den phänologischen Modellen ist die Tatsache, dass das Ende der Dormanz nicht beobachtet werden kann. Somit bleibt dieser Zeitpunkt nach wie vor ein viel diskutiertes Problem. Eine Alternative bieten in diesem Fall die so genannten "Thermal-Time" Modelle die auf den Ansatz von REAUMUR (1735) zurück gehen. In diesen Modellen wird der Dormanz insofern keinerlei Rechnung getragen, als davon ausgegangen wird, dass die Pflanze die Winterruhe mit Jahresbeginn überwunden hat. Von nun an können positive Tagesmitteltemperaturen wirksam werden. Die in diesen Modellen optimierten Parameter sind die bis zum Erreichen der Phänophase notwendige Wärmesumme (F^*), ausgedrückt als „growing degree days“ oder „forcing units“ und die Basistemperatur (T_{Bf}), ab der die Entwicklung einsetzt. Der Starttag t_1 für die Berechnung der Temperatursumme kann vorgegeben werden (z.B. $t_1=1$: 1. Januar) oder ebenfalls im Modell optimiert werden.

Bei diesem einfachen Temperatursummenmodell wird die „forcing rate“ (R_f) solange aufsummiert, bis die Summe $S_f(t)$ (*state of forcing*) größer oder gleich dem vorgegebenen kritischen Wert F^* ist (gesamtes Wärmebedürfnis bis zum Phaseneintritt, Gleichung 1). F^* ist ge-

nauso wie die Basistemperatur T_{BF} ein Modellparameter, der für jedes betrachtete Gebiet und jede Baumart so bestimmt wird, dass der RMSE zwischen modellierten und beobachteten Phänodaten minimal wird.

$$S_f(t) = \sum_{i=t_1}^t R_f(T_i), \text{ wobei } S_f(t_2) := F^* \quad (1)$$

Zur Berechnung der „forcing“ Raten existieren vielfältige Ansätze, die in zwei Gruppen eingeteilt werden können. Zum einen kann die „forcing rate“ $R_f(T_i)$ als „growing-degree-day“ angegeben werden (Gleichung 2).

$$\begin{aligned} R_f(T_i) &= 0, & \text{wenn } T_i \leq T_{BF} \\ R_f(T_i) &= T_i - T_{BF}, & \text{wenn } T_i > T_{BF} \end{aligned} \quad (2)$$

Zum anderen können so genannte „forcing units“ berechnet werden, die auf unterschiedlichen Ansätzen basieren. Als Beispiel sei hier die logistische Funktion von Sarvas (1974) angegeben (Gleichung 3).

$$\begin{aligned} R_f(T_i) &= 0, & \text{wenn } T_i \leq T_{BF} \\ R_f(T_i) &= \frac{28.4}{1 + \exp(-0.185(T_i - T_{BF} - 18.4))}, & \text{wenn } T_i > T_{BF} \end{aligned} \quad (3)$$

Zur Modellierung der Pflanzenentwicklung unter geänderten Klimabedingungen sind grundsätzlich phänologische Modelle vorzuziehen, die sowohl die Phase der Dormanz als auch den Zeitraum der nachfolgenden ontogenetischen Entwicklung berücksichtigen. Hierfür ist das Kältebedürfnis (C^*), das zur Überwindung der pflanzlichen Dormanz notwendig ist, zusätzlich in den Modellen zu integrieren (Gleichung 4).

$$S_c(t) = \sum_{i=t_0}^t R_c(T_i), \text{ wobei } S_c(t_1) := C^* \quad (4)$$

Der Zustand des „chilling“ $S_c(t)$ wird ebenfalls durch tägliche „chilling rates“ $R_c(T_i)$ beschrieben, wobei der Ruhezustand beendet ist, wenn ein kritischer Wert C^* erreicht wurde. Zur Berechnung der „chilling rates“ existieren ebenfalls vielfältige Ansätze in der internationalen Literatur. Die „chilling rates“ können analog zu den „forcing rates“ als „chilling days“ bzw. „chilling units“ angegeben werden. Gleichung 5 zeigt eine sehr einfache Möglichkeit zur Berechnung von „chilling days“. Dieser Ansatz geht von der Annahme aus, dass die Gehölze zur Überwindung der Dormanz für eine bestimmte Anzahl von Tagen Temperaturen unterhalb eines Schwellenwertes T_{Bc} ausgesetzt sein müssen.

$$\begin{aligned} R_c(T_i) &= 0, & \text{wenn } T_i \geq T_{Bc} \\ R_c(T_i) &= 1 & \text{wenn } T_i < T_{Bc} \end{aligned} \quad (5)$$

Etwas komplexer ist die Berechnung von „chilling units“, die nach unterschiedlichen Methoden berechnet werden können. HÄNNINEN (1990) hat beispielsweise den nachfolgenden Ansatz vorgeschlagen:

$$\begin{aligned}
R_c(T_i) &= 0, & \text{wenn } T_i \leq -3.4 \text{ oder } T_i \geq 10.4 \\
R_c(T_i) &= \frac{T_i + 3.4}{T_B + 3.4} & \text{wenn } -3.4 < T_i \leq T_{Bc} \\
R_c(T_i) &= \frac{T_i - 10.4}{T_B - 10.4} & \text{wenn } T_{Bc} < T_i < 10.4
\end{aligned} \tag{6}$$

Die Kombination der „chilling“ und „forcing“ Einheiten kann auf zwei Wegen erfolgen. *Sequentielle Modelle* gehen davon aus, dass „forcing units“ erst dann auf die Pflanze einwirken können, wenn die Dormanz beendet ist und der spezifische „chilling“ Bedarf der Pflanze C^* erreicht ist. Dementsprechend wird in den Modellen entweder C^* optimiert oder der Termin t_1 , zu dem die Dormanz aufgehoben ist. Zudem wird in einigen Modellen die Annahme gemacht, dass eine inverse Beziehung zwischen C^* und F^* existiert („Alternating model“). Dies kann durch Gleichung 7 zum Ausdruck gebracht werden. Hiernach verringert sich mit zunehmendem Kältereiz der Wärmebedarf der Pflanze bis zum Eintritt der Phase.

$$F^*(t_2) = a \exp(b S_c(t_1)) = a \exp(b C^*) \tag{7}$$

Parallele Modelle gehen hingegen davon aus, dass Kälte- und Wärmereize gleichzeitig in der Zeit von t_0 bis t_2 wirksam sein können. Zusätzlich wird meist auch Gleichung 7 in diesen Modellen mit berücksichtigt, wobei sich das für die Pflanze erforderliche Wärmebedürfnis sowohl bereits zum Zeitpunkt t_1 als auch erst zum Zeitpunkt t_2 ergeben kann.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden insgesamt 24 unterschiedliche phänologische Modellierungsansätze programmiert und mit den Daten von Sachsen getestet. Hierbei entsprechen 6 Modelle dem „thermal time“ Modell, die die Phase der Dormanz nicht berücksichtigen. Die übrigen Modelle sind ausschließlich „chilling-forcing“ Modelle.

Zur Überprüfung der Modellgüte wurde der Stichprobenumfang in gerade und ungerade Jahre im Zeitraum 1962-2005 geteilt. Die Optimierung der Modellparameter wurde an den geraden Jahren dieses Zeitraums (1962-2004) durchgeführt. Nachfolgend wurde die Genauigkeit des Modells an den verbleibenden ungeraden Jahren (1963-2005) getestet. Als Fehlermaß wurde der RMSE zwischen den modellierten und beobachteten Wert berechnet.

3 Ergebnisse

Phänologische Mittelwerte sind grobe Anhaltspunkte für die regionale Entwicklung der Vegetation. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die mittleren Eintrittstermine der betrachteten phänologischen Phasen.

Tab. 1 Mittelwerte (x) phänologischer Phasen in Sachsen, s: Standardabweichung, n: Anzahl verwendeter Phänostationen, BO: Blattentfaltung

Phänophase	Zeitraum	n	x (DOY, Datum)	s (Tage)	Max ... Min (DOY)
BO Stieleiche	1961-2005	136	129 (09.05.)	6.2	116 ... 142
BO Rotbuche	1961-1981, 1992-2005	137	123 (03.05.)	5.0	113 ... 131

Aus der Vielzahl der phänologischen Ansätze wurden diejenigen Modelle ausgewählt, die einen möglichst geringen Fehler im Verifikationszeitraum aufweisen. Abbildung 1 zeigt einen Vergleich der Modellgüte für die Phase Blattentfaltung der Stieleiche. Während einige Modelle im Optimierungszeitraum durchaus akzeptable Ergebnisse liefern (20c, 22, 24a, 25a, 27) versagen diese Ansätze im Verifikationszeitraum. Dies ist teilweise bei den komplexeren

Modellen der Fall, wo sehr viele Modellparameter zu optimieren sind (z.B. Modell 22, 27). Vermutlich erfolgt hier eine Überanpassung der Modelle. Alle Modelle mit einem RMSE kleiner 4.7 Tage sind besser als die Verwendung eines mittleren Phaseneintritts (Nullmodell: $RMSE_0$).

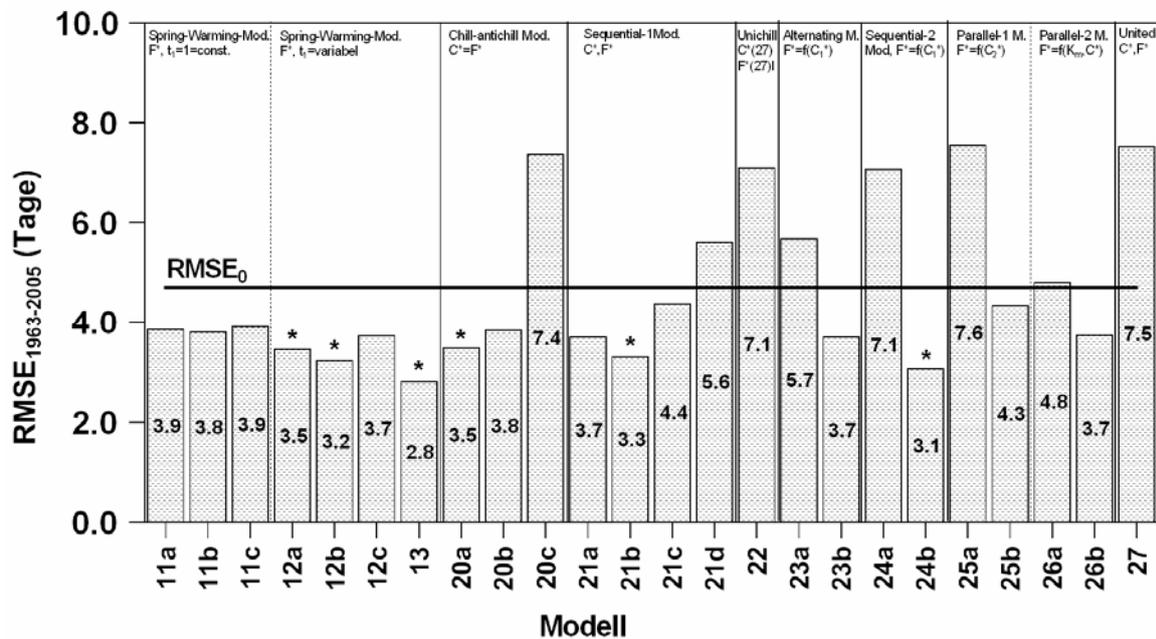


Abb. 1: Modellgüte für die Phänophase Blattentfaltung der Stieleiche, RMSE für ungerade Jahre (1963-2005), *Modelle mit $RMSE \leq 3.5$ Tage, $RMSE_0$: Nullmodell, Modellbezeichnungen intern

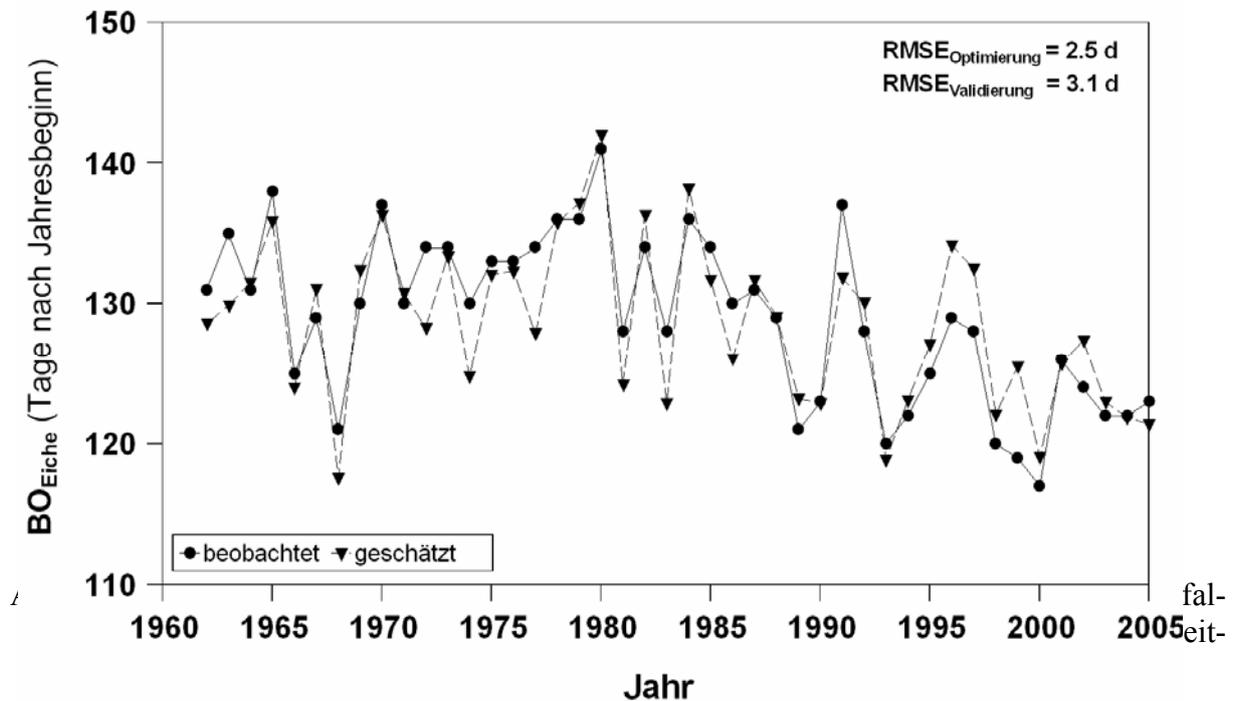
Tab. 2 Modellparameter für den Beginn der Blattentfaltung (BO) bei Eiche und Buche in Sachsen

Phase	Modell	Höhe (m)	Optimierte Parameter	RMSE (1963-2005) unabhängige Daten
Eiche BO	12b	296	$t_1=66, T_{Bf}=0.0, F^*=221.2,$	3.2 Tage
	24b		$t_0=244, t_1=60, T_{Bf}=0.2, T_{Bc}=8.4, a=231.6, b=0.0$	3.1 Tage
Buche BO	12b	332	$t_1=60, T_{Bf}=0.0, F^*=175.2,$	4.3 Tage
	24b		$t_0=244, t_1=110, T_{Bf}=0.0, T_{Bc}=11.1, a=303.2, b=-0.019$	3.3 Tage

Von den hier dargestellten Modellen zeigen vor allem die Ansätze 12a, 12b, 13, 20a, 21b und 24b die kleinsten Fehler. Als sehr anschauliches Modell für die Berechnung der Blattentfaltung unter heutigen klimatischen Verhältnissen eignet sich das Modell 12b, für das nur 3 Eingangsparameter erforderlich sind (t_1, T_{Bf}, F^*). Dieses Modell ist gegenüber dem Modell 13 für alle modellierten Pflanzenarten wesentlich robuster, so dass es hier ausgewählt wurde. Zu den, für die Modellierung der Blattentfaltung geeigneten „chilling-forcing“ Modellen gehören

die Versionen der sequentiellen Modelle 21b und 24b, wobei das Modell 24b einen etwas geringeren Fehler ausweist. Dieses Modell benötigt insgesamt 5 Inputgrößen.

Die Genauigkeit der Modellierung ist für das Modell 24b in Abbildung 2 zu ersehen. Sowohl für die Jahre der Optimierung, als auch für die unabhängigen Jahre sind die Abweichungen zwischen beobachtetem und geschätztem Phaseneintritt gering. Die maximale Abweichung liegt in einem Einzeljahr bei -7 Tagen (1977).



Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass phänologische Modelle, die auf Kälte- und Wärmesummen basieren, in der Lage sind die phänologische Entwicklung der zu untersuchenden Phänophasen zu modellieren. Die meisten Modellansätze sind deutlich besser als die Verwendung statischer Eintrittstermine (langjähriger Mittelwert). Für jede Baumart wurden jeweils 2 Modellansätze unterschiedlicher Komplexität selektiert. Der einfachste Ansatz (thermal time Modell) basiert auf nur 3 Eingangsparameter und ist geeignet die pflanzliche Entwicklung unter heutigen klimatischen Bedingungen zu beschreiben. Für Untersuchungen unter veränderten klimatischen Verhältnissen (Klimaimpaktstudien) ist es vorteilhaft komplexe Modelle zu verwenden, die sowohl den notwendigen Kältereiz zur Überwindung der Dormanz, als auch das nachfolgende Wärmebedürfnis bis zum Eintritt der Phänophase berücksichtigen („chilling-forcing“ Modelle). Beide Modelle liefern gute Resultate. Die mittleren Fehler der Modelle liegen zwischen 3 und 4 Tagen.

Literaturverzeichnis

- HÄNNINEN, H., 1990: Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions. - Act. For. Fenn., 213, 47 p.
- REAUMUR, R. A. F., DE, 1735: Observations du thermometer, faites à Paris pendant l'année 1735, comparées avec celles qui ont été faites sous la ligne, à l'isle de France, à Alger et quelques unes de nos isles de l'Amérique. - Memoires de l'Académie des Sciences de Paris.

- RÖTZER, T., GROTE, R., PRETZSCH, H., 2004: The timing of bud burst and its effect on tree growth. - *Int. J. Biometeorol.* 48, 109–118.
- SARVAS, R., 1974: Investigations on the annual cycle of development of forest trees II. Autumn dormancy and winter dormancy. - *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 84 (1), 1-101.
- SCHABER, J., BADECK, F.-W., 2003: Physiology-based phenology models for forest tree species in Germany. - *Int. J. Biometeorol.* 47, 193-201.

Anschrift der Autoren

PD Dr. Frank-M. Chmielewski, Dipl.-Ing. Yvonne Henniges, Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Pflanzenbauwissenschaften, Lehrgebiet Agrarmeteorologie, Albrecht-Thaer-Weg 5, 14195 Berlin

Selbstsuchende Lesen der phänologischen Phasen durch die Fotokamera im Meteorologischen Observatorium Doksany

Jiri Nekovar¹, Martin Mozny² und Daniel Bares²

¹ Tschechisches Hydrometeorologischen Institut, Prag, Tschechien

² Tschechisches Hydrometeorologischen Institut, Doksany, Tschechien

Abstract

In September 2006, a year-long project of filming of phenological phases of forest-tree species was launched at the observatory. A project of Geographical Institute at university in Bern served as inspiration. The camera Canon PowerShot S3 is located on a piece of land, where there is an International Phenological Garden, and is connected via ethernet cable to a computer inside the observatory. In intervals given in advance a set of defined points is photographed and the images are saved to a computer in the building. The camera is fully controlled from the computer thanks to a special program; it can set the parameters of photographing, focus the camera to a particular detail, and move the camera in both vertical and horizontal direction. All images are archived on DVDs for further processing. Gradually, digital images will be made available on the Internet. For the project purposes, we made a 3D model of the observatory with all adjacent buildings. The camera will also be used for monitoring of interesting meteorological phenomena. We expect that this project will increase objectivity and preciseness of phenological observations and will therefore increase predicative capability and accuracy of phenological information. We expect that information obtained in this project will be used for modelling and objectification of satellite information.

1 Vorwort

Im September 2006 wurde die ganzjährige Bildaufnahme der Waldbaumartphänophasen durch die Fotokamera im Agrometeorologischen Observatorium in Doksany (Abb. 1) gestartet. Als Inspiration dient ein Projekt vom Geographischen Institut bei der Universität Bern (BRÜGGER, 2005).

2 Technische Daten

Für die Aufnahme wurde digitale Kompakt Kamera Canon PowerShot S3 (Computer-Windows XP, USB-Ethernet, Software RemoteCapture, Stromversorgung- Netzadapter), ausgerüstet mit:

- 12fach optischem Zoom mit optischem Bildstabilisator (IS),
- CCD - Sensor mit ca. 6,0 Megapixeln,
- Umfangreiche Movie-Funktionen,
- DIGIC-II-Prozessor mit iSAPS-Technologie,
- FlexiZone-Steuerung AF/AE,
- 20 Aufnahmemodi und My Colors,
- ISO 800,

- 16:9 Breitbild-Aufnahmen,
- Dreh- und schwenkbarer 2,0-Zoll LCD-Bildschirm,
- Umfangreiches Zubehör,
- Kompatibel mit PictBridge; Print/Share-Taste,
- Umfangreiches Softwarepaket
ausgenutzt.

3 Der Computer als Kameraauslöser

Die Kamera ist auf dem Internationale-Phänologische-Gartensgrundstück aufgestellt. Sie ist durch das Netzkabel „ethernet“ mit dem PC im Observatoriumsgebäude vernetzt.

Die definierte Daten sind abgetastet und die Aufnahmen sind im Primärcomputer gespeichert, dabei die Zeit der Abnahme ist voreingestellt. Da wir spezielles Programm im Besitz haben, sind wir in der Lage, die Anlagen aus Primärcomputer voll zu bedienen:

- die Kamera handhaben
- die Abnahmeparametern einstellen
- Fokussierung des ausgewählten Detail durchführen
- mit der Kamera vertikal und horizontal rotieren.

Alle Aufnahmen sind für die weitere Bearbeitung auf DVD archiviert. Wir nehmen an, die Dateien im Internet mit der Zeit zu erschließen.

4 3D Modell

Damit das Projekt bestmöglich funktionieren könnte, wurde ein dreidimensionales Observatoriums- und Grundstücksmodell geschafft (Abb. 2).

Wir möchten auch die interessanten meteorologischen Erscheinungen mittels der Kamera aufnehmen.



Abb. 1: Fotokamera im Agrometeorologischen Observatorium in Doksany



Abb. 2: Dreidimensionales Observatoriums- und Grundstücksmodell

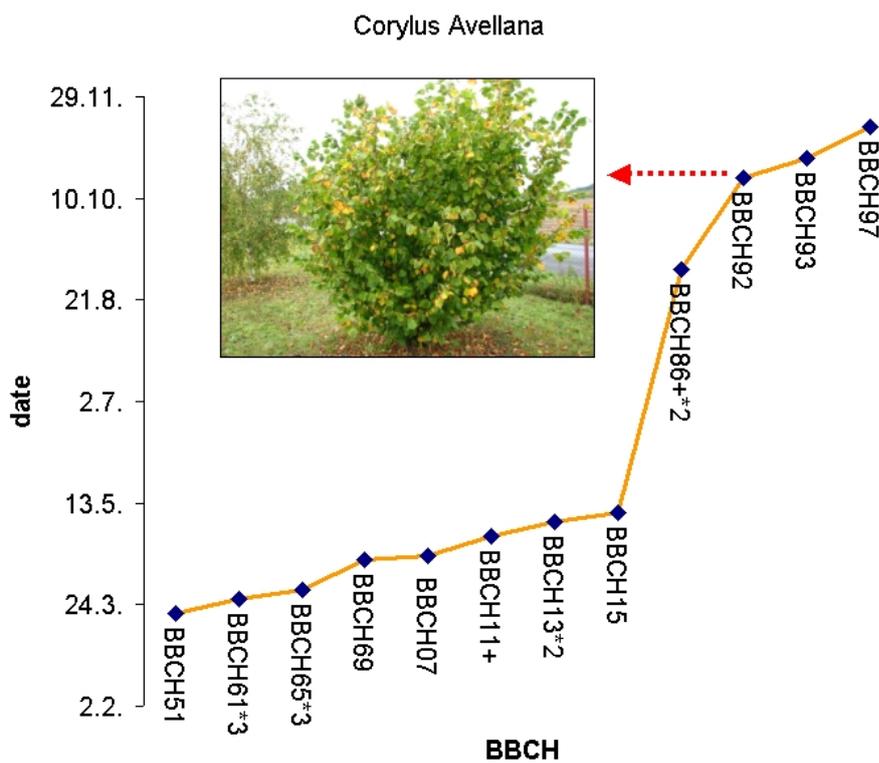


Abb. 3: Corylus avellana (Haselstrauch)- Phänologischen Phasen im Jahresverlauf 2006 in Doksany

5 Schlussfolgerungen

Von diesem Projekt erwartet sich die Objektivierung und die Verbesserung der Phänobeobachtungsqualität sowie auch die Ausdrucksfähigkeitserhöhung und Genauigkeit der Phä-

noinformationen (Abb. 3). Es steht zu erwarten, diese Informationen für die Modellierung und Objektivierung der Satellitendaten zu nutzen.

Literatur:

BRÜGGER, R., 2005: Photometric evaluation of phenological growth stages in forest stands: Application to climate monitoring using digital image analysis. Annalen der Meteorologie /ICB 2005, September 5th - 9th 2005, Garmisch Partenkirchen, 41.

Anschrift der Autoren:

Ing. Jiří Nekovář, PhD, Tschechisches Hydrometeorologischen Institut, Na Šabatce 17, 14306
Praha 4 – Komořany, Tschechische Republik

Dr.Ing.Martin Možný – Mgr.Daniel Bareš, Tschechisches Hydrometeorologischen Institut,
Doksany 105, 41182 Doksany, Tschechische Republik,

Online: <http://www.chmi.cz/meteo/ok/oba/obs/eobs.html>

Spruce, Beech, Linden and Strawberry phenophases in different Forest Vegetation Layer

Rudolf Bagar and Jiří Nekovář

CZ - 62500 Brno, Oděská 8 & Czech Hydrometeorological Institute Prague

Abstract

Presented contribution evaluates selected wild plants phenological development in 5 Forest Vegetation Layers (FVL). FVL I includes localities vertically below 350 m above sea level, FVL II is between 350-400 m, III 400-550, IV 550-600, FVL V 600-700 m a.s.l. Norway spruce (*Picea excelsa*), European beech (*Fagus silvatica*), Small-leafy linden (*Tilia cordata*), Wild strawberry (*Fragaria vesca*) are selected as dominant plant representatives of Central European forest. Entrance of phenological phases like bud break (BBCH07), begin of leafing 10% (BBCH11), begin of leafing 100% (BBCH15), inflorescence emergence (BBCH51), flowering 10% (BBCH61), flowering 100% (BBCH65), end of flowering (BBCH69), in the case of strawberry BBCH51, 61, 65 phases are studied, using the period 1991-2005 in South Moravia region. Interphase periods between mentioned phenophases are studied resulted as duration in days, entrance tendency during 1991-2005 and the need of degree-days total of daily air temperature above 0 °C. Selected phenophases entrance is generally started at first in FLV I and it is observed later in higher FVL; but important exceptions are noted.

1 Introduction, methods

Presented contribution evaluates selected wild plants phenological development in 5 Forest Vegetation Layers (FVL). FVL I includes localities vertically below 350 m above sea level, FVL II is between 350-400 m, III 400-550 m, IV 550-600 m, FVL V 600-700 meter a.s.l. Norway spruce (*Picea excelsa*), European beech (*Fagus silvatica*), Small-leafy linden (*Tilia cordata*), Wild strawberry (*Fragaria vesca*) are selected as dominant plant representatives of Central European forest. Entrance of phenological phases like bud break (BBCH07), begin of leafing 10% (BBCH11), begin of leafing 100% (BBCH15), inflorescence emergence (BBCH51), flowering 10% (BBCH61), flowering 100% (BBCH65), end of flowering (BBCH69), concerning in straw-berry BBCH51, 61, 65 phases are studied; using the period 1991-2005 in South Moravia region.

Inter-phase periods between mentioned phenophases are studied resulted as duration in days, entrance tendency during 1991-2005 and the need of degree-days total of daily air temperature above 0 °C.

2 Results

2a Correlation coefficients

Correlation coefficients are given at first for individual forest plants inside first to fifth forest vegetation layers and for time duration between specified phases and need of degree-days total of daily air temperature above 0 °C. Phenophases are used: BB =bud break, BL10 =begin of leafing 10%, BL100 =begin of leafing 100%, IE =inflorescence emergence, BF10 =begin of flowering 10%, BF100 =begin of flowering 100%, EF =end of flowering.

Tab. 1: Correlation coefficients between phenophases

Wooden plant	Correlation between EF / IE	Correlation between EF / BF 10	Correlation between EF / BF 100
Spruce	0,649	0,871	0,665
Beech	0,977	0,933	0,83
Linden	0,852	0,985	0,939

Herb	Correlation between BF 100 / IE	Correlation between BF 100 / BF 10
Strawberry	0,704	0,93

2b Spruce phenophase entrance in different forest vegetation layer

Tab. 2: Well-balanced value by regression line (day of year and day of calendar)

FVL	BB	BL 10	BL 100	IE	BF 10	BF 100	EF
I.	114,9 25. IV.	126,3 6.V.	143,3 23.V.	120,4 30. IV.	125,2 5.V.	134,6 15.V.	142,0 22.V.
II.	117,6 28. IV.	127,4 7.V.	142,1 22.V.	119,3 29. IV.	125,3 5.V.	134,2 14.V.	142,0 22.V.
III.	120,2 30. IV.	128,5 9.V.	141,0 21.V.	118,3 28. IV.	125,4 5.V.	133,7 14.V.	141,8 22.V.
IV.	122,8 3.V.	129,5 10.V.	139,9 20.V.	117,2 27. IV.	125,5 6.V.	133,3 13.V.	141,7 22.V.
V.	125,5 6.V.	130,6 11.V.	138,7 19.V.	116,1 26. IV.	125,6 6.V.	132,9 13.V.	141,6 22.V.

Spruce - the need of degree-days total of daily air temperature above 0 °C for phenophases entrance in different FVL.

Tab.3: Well-balanced value by regression line (in Celsius degrees)

FVL	BB	BL 10	BL 100	IE	BF 10	BF 100	EF
I.	530,5	688,4	950,8	617,1	696,1	840,7	964,1
II.	503,0	634,9	855,2	542,3	627,0	755,9	875,4
III.	475,4	581,5	759,7	467,2	557,9	671,1	788,6
IV.	447,8	528,0	664,2	392,4	488,8	586,3	700,8
V.	420,3	474,5	568,7	317,5	419,7	501,5	613,0

Spruce – day number from mentioned phenophases (IE, BF10 & BF100) until EF; 1991-2005

Tab.4: Well-balanced value by regression line (in day number)

FVL	from IE to EF	from BF 10 to EF	from BF 100 to EF
I.	21,6	16,7	7,4
II.	22,6	16,6	7,7
III.	23,5	16,4	8,1
IV.	24,5	16,2	8,4
V.	25,5	16,0	8,7

Spruce - the need of degree-days total of daily air temperature above 0 °C starting from IE, BF10, BF100 phenophases until end of flowering.

Tab.5: Well-balanced value by regression line (in Celsius degree total)

FVL	from IE to EF	from BF10 to EF	from BF100 to EF
I.	341,9	268,0	123,4
II.	328,9	249,3	120,4
III.	316,0	230,6	117,4
IV.	303,0	211,9	114,4
V.	290,1	193,2	111,4

2c Beech phenophase entrance in different forest vegetation layer

Tab. 6: Well-balanced value by regression line (day of year and day of calendar)

FVL	BB	BL 10	BL 100	IE	BF 10	BF 100	EF
I.	103,4 13. IV.	111,5 22. IV.	127,7 8.V.	115,3 25. IV.	120,0 30. IV.	128,9 9.V.	134,2 14.V.
II.	105,0 15. IV.	112,8 23. IV.	126,3 6.V.	117,6 28. IV.	122,2 2.V.	130,2 10.V.	135,9 16.V.
III.	106,5 17. IV.	114,1 24. IV.	124,9 5.V.	119,8 30. IV.	124,5 5.V.	131,4 11.V.	137,6 18.V.
IV.	108,1 18. IV.	115,3 25. IV.	123,5 4.V.	122,0 2.V.	126,7 7.V.	132,7 13.V.	139,3 20.V.
V.	109,6 20. IV.	116,6 27. IV.	122,1 2.V.	124,2 4.V.	129,0 9.V.	133,9 14.V.	141,0 21.V.

Beech - the need of degree-days total of daily air temperature above 0 °C for phenophases entrance in different FVL.

Tab. 7: Well-balanced value by regression line (in Celsius degrees)

FVL	BB	BL 10	BL 100	IE	BF 10	BF 100	EF
I.	396,2	495,4	711,5	551,6	618,5	750,7	839,9
II.	364,0	449,7	626,5	515,3	588,0	702,6	793,0
III.	331,8	403,9	541,5	478,9	557,5	654,6	746,1
IV.	299,6	358,2	456,5	442,6	527,0	606,6	699,2
V.	267,4	312,4	371,4	406,2	496,5	558,5	652,2

Beech – day number from mentioned phenophases (IE, BF10 & BF100) until EF; 1991-2005

Tab. 8: Well-balanced value by regression line (in day number)

FVL	from IE to EF	from BF 10 to EF	from BF 100 to EF
I.	18,9	14,3	5,3
II.	18,4	13,7	5,8
III.	17,9	13,1	6,2
IV.	17,3	12,6	6,6
V.	16,8	12,0	7,1

Beech - the need of degree-days total of daily air temperature above 0 °C starting from IE, BF10, BF100 phenophases until end of flowering.

Tab. 9: Well-balanced value by regression line (in Celsius degree total)

FVL	from IE to EF	from BF 10 do EF	from BF 100 do EF
I.	288,3	221,4	89,2
II.	277,7	205,0	90,3
III.	267,1	188,6	91,5
IV.	256,6	172,2	92,6
V.	246,0	155,8	93,7

3 Conclusion

Selected phenophases entrance is generally started at first in FLV I and it is observed later in higher FVL; the need of degree-days total of daily air temperature above 0 °C is falling from first to fifth FVL, exceptions existed and they are noted. Microclimate and exposition of forest stand plays important role.

Authors addresses:

Doz. Dipl.-Ing. Rudolf Bagar, PhD, Oderská 8, CZ-62500 Brno

Dipl.-Ing. Jiri Nekovar, PhD, Czech Hydrometeorological Institute, CZ-14306 Prague 4, Na Šabatce 17, Czech Republic

Phänologisches Monitoring in Österreich – das neue Internetportal der ZAMG

www.zamg.ac.at/phaeno_portal , http://zacost.zamg.ac.at/phaeno_portal/,
www.zamg.ac.at/phaenologie

Elisabeth Koch¹ und Robert Neumcke²

¹ Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

² Johann-von-Weerth-Str. 26, 79100 Freiburg

Abstract

The Central Institute for Meteorology and Geodynamics ZAMG in Vienna is one of the oldest national weather services of the world and since its establishment in 1851 ZAMG has been running – with some breaks - a phenological network.. Although phenology has been gaining growing interest in the climate impact research community the number of the volunteer observers is decreasing and ZAMG has to encounter a thinning of the network in Austria. The internet portal which was developed by ZAMG and has been online since summer 2006 will hopefully help to strengthen the network and gives an overview on the actual state of plant development but also on some animal. Also in the European context

Zusammenfassung

Die ZAMG betreibt seit ihrer Gründung im Jahr 1851 (mit Unterbrechungen) ein phänologisches Messnetz. Obwohl die Phänologie einen zunehmende Akzeptanz in den letzten 20 Jahren in Zusammenhang mit Klima und Klimafolgen - Forschung erlangt hat, musste bedauerlicherweise in Phäno - Netz der ZAMG ein Beobachterschwund hingenommen werden, so dass ein flächendeckendes Monitoring des Klima - Impacts auf die Tiere und Pflanzen in Hinkunft nicht mehr gewährleistet werden kann. Um das Beobachtungsnetz zu verdichten, werden neue Wege beschritten, indem die ZAMG ein Webportal für alle Naturbegeisterten entwickelt hat, in dem jeder seine Beobachtungsdaten eingeben kann aber auch die "historischen" phänologischen Daten der ZAMG allgemein zugänglich gemacht werden. Dieses Webportal ist auch im gesamteuropäischen Kontext zu sehen, die ZAMG beherbergt die sich im Aufbau befindliche europäische phänologische Datenbank der COST Aktion 725 (Establishing a European phenological data platform for climatological purposes, Koch et al, 2005). Die Erfahrungen des österreichischen Webportales werden in das Gesamteuropäische Webportal einfließen.

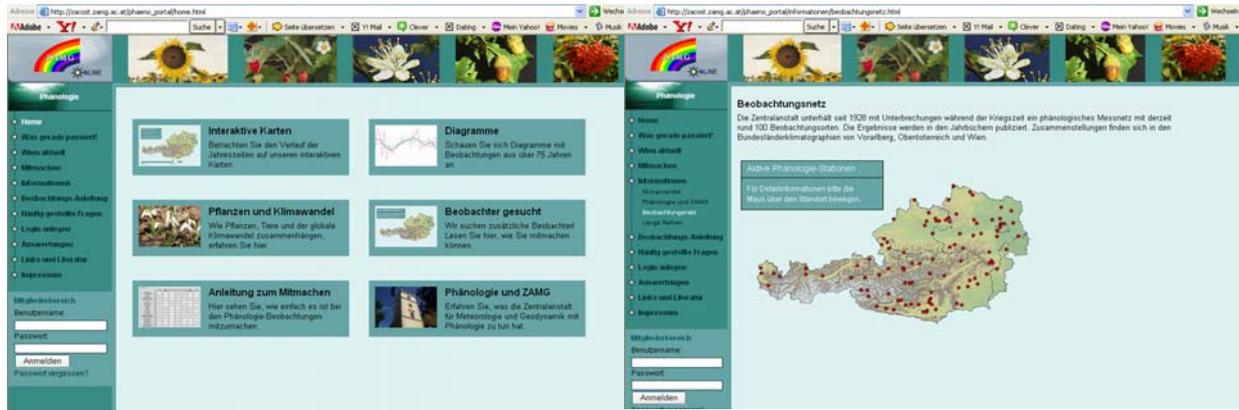
1. Einleitung

Phänologie, die Lehre von den alljährlich wiederkehrenden Erscheinungen in der Tier- und Pflanzenwelt hat nach einigen Jahrzehnten des Dämmerchlafes ein Revival erlebt. Die Temperaturerhöhung in den letzten 100 Jahren von 0.6 Grad global aber von 1.5 Grad C im Alpenraum zeigt deutliche Auswirkungen auf den Wachstums- und Entwicklungsrhythmus der Pflanzen, die Tierwelt z.B. die Ankunftsstermine von Zugvögel bleibt ebenfalls nicht unbeeinflusst (MENZEL et al, 2006, SCHEIFINGER et al, 2006, IPCC 2001, EEA 2004, PARMESAN and YOHE, 2003, CHMIELEWSKI und RÖTZER, 2001, CHMIELEWSKI et al., 2004, SCHWARTZ, 2003).

2. Material und Methode

Das Phänologie-Webportal auf der ZAMG – Homepage, das am 1. Juli 2006 seine Pforten öffnete, stellt nicht nur die Arbeitsweisen und Methoden der Phänologie vor und ruft zur Mitarbeit bzw. zum Beobachten auf, sondern präsentiert die gesamte (digitale) Phänologie Da-

tenbank der ZAMG in anschaulicher Weise der interessierten Öffentlichkeit.



(http://zacost.zamg.ac.at/paeno_portal/home.html)

Abb. 1: Eingangsseite des ZAMG –

Abb. 2: Stationsnetz, aktueller Stand

Fig. 1: Entrance page of the Phänologie – Fig. 2: Status quo of the station network Portal

Um seine persönlichen Beobachtungsdaten eingeben zu können, öffnet sich nach erfolgter Anmeldung ein übersichtliches Eingabeformular, zu allen zu beobachtenden Pflanzen und Phasen gibt es ein Hilfefenster. Die vollständige Beobachtungsanleitung des phänologischen Netzes der ZAMG (WEIß und KOCH, 2000) ist selbstverständlich auch zum Downloaden.

Die Pflanzen sind in drei Gruppen geteilt. Wildpflanzen, landwirtschaftliche Kulturpflanzen und Obst, des weiteren sind auch folgende tierphänologische Beobachtungen im Programm: Ankunft der Rauchschwalben und des Kuckucks sowie erste Beobachtungen von Insekten (Fuchsfalter, Zitronenfalter, Honigbiene,), Almauf- Almatrieb.

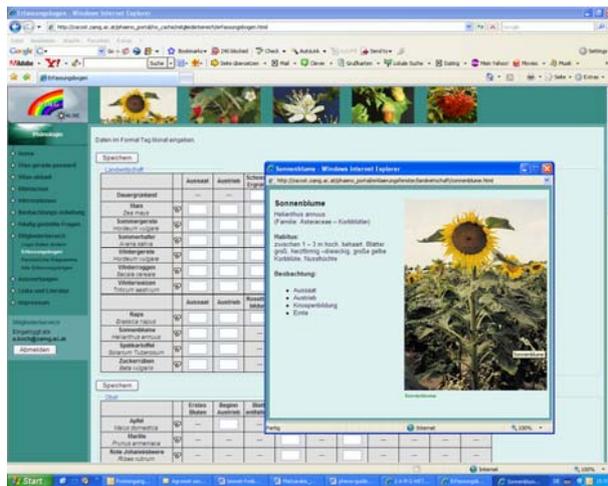


Abb. 3: Eingabebereich Landwirtschaft: Formular mit Hilfe Fenster

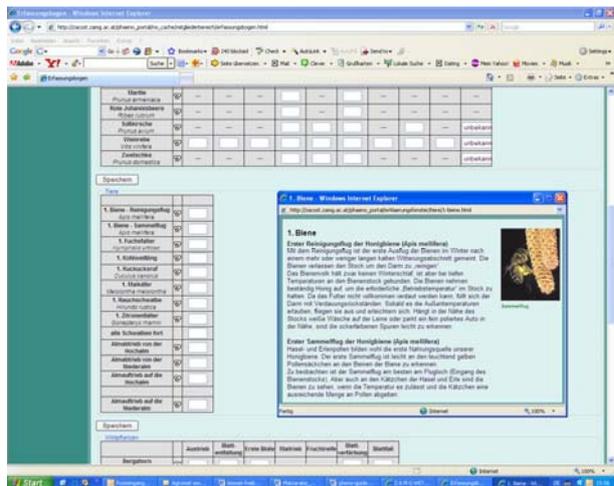


Abb. 4: Eingabebereich Wildpflanzen: Formular mit Hilfe Fenster

Fig. 3: Data input sheet of agricultural crops with help window

Fig. 4: Data input sheet of animals with help window

Unmittelbar nach dem Speichern der Eingabe und einem Qualitycheck fließen die Daten in

die Datenbank und werden damit auch sofort im Menüpunkt Auswertungen, Diagramme, Flashmaps eingebunden. Der registrierte Beobachter hat zu seinen eigenen Daten jederzeit Zugriff.

3. Ergebnisse

Jede Pflanzen bzw. Tierbeobachtung kann online in Diagrammen und Flashmaps dargestellt werden. Bei den Diagrammen wird eine österreichweit gemittelte Darstellung (siehe Abbildung 5) und eine Grafik auf Stationsbasis (Abbildung 6) angeboten. Gezeigt wird immer der zeitliche Verlauf seit Beobachtungsbeginn. Am Beispiel vom Flieder, erste Blüte ist ersichtlich, dass im österreichischen Mittel ab Mitte der 1980 eine Verschiebung zu früheren Blühterminen zu beobachten war Jahre.

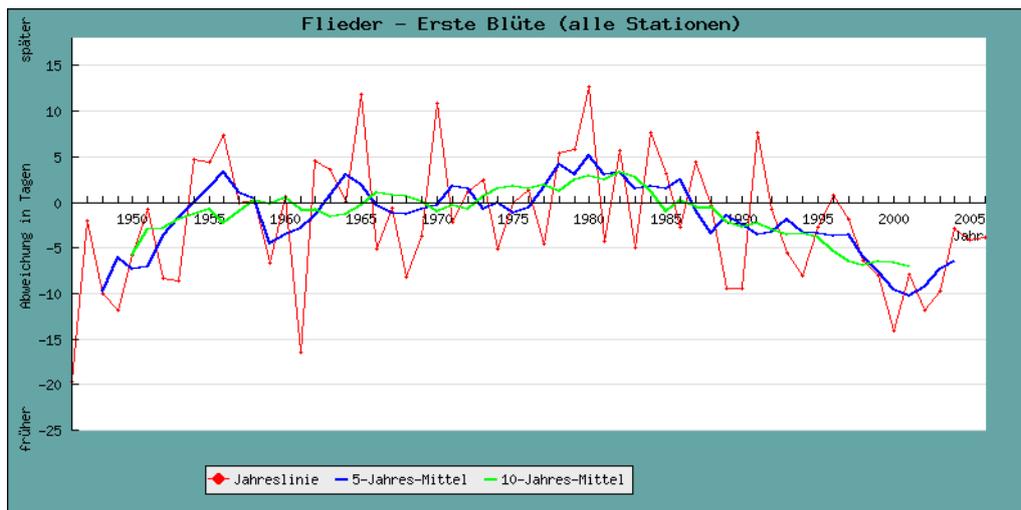


Abb. 5. Zeitlicher Ablauf der Fliederblüte Österreich. Dargestellt sind die Abweichungen in Tagen vom österreichischen Mittel

Fig. 5: Lilac first flowers: deviation from the mean from 1945 to 2006 (red single years, blue 5 years running mean, green 10 years running mean)

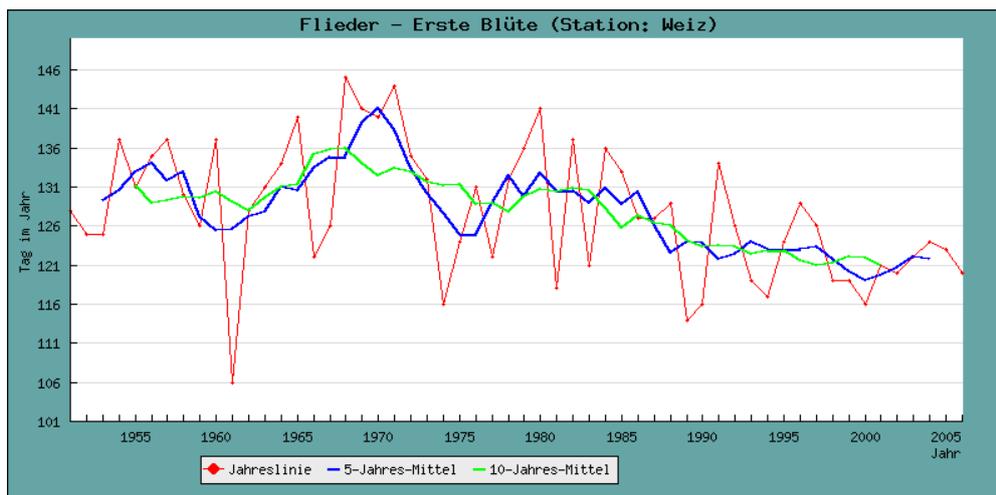
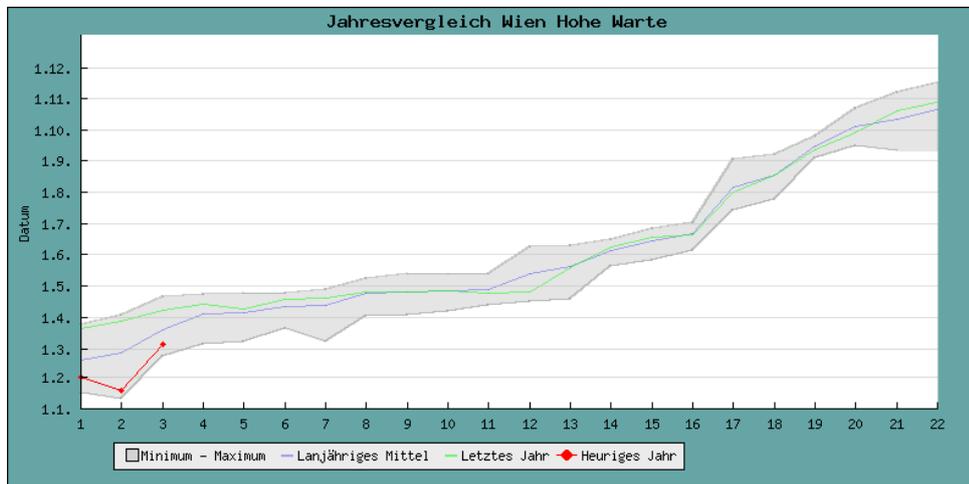


Abb. 6. Zeitlicher Ablauf der Fliederblüte in Weiz. Dargestellt sind die Eintrittstermine in Tagen am Jahresbeginn

Fig. 6: Lilac first flower: observed data in DOY, red single years, blue 5 years running mean, green 10 years running mean

In den Flashmaps zeigen, wie sich in einem konkreten Jahr eine Phase über das Land ausbreitet. Auf eine Abbildung wird hier aus verständlichen Gründen verzichtet und auf http://zacost.zamg.ac.at/phaeno_portal/no_cache/auswertungen/karten.html verwiesen.

Eine gute Möglichkeit, den Stand der aktuellen Vegetationsentwicklung einzuordnen bietet der „Jahresvergleich“, derzeit nur für Wien Hohe Warte verfügbar ist an. Hier werden ausgewählte typische Phasen, die alle Jahreszeiten des phänologischen Jahres repräsentieren, mit dem Vorjahr, dem Mittelwert und den absoluten Extrema verglichen (Abbildung 7).



- | | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 = Schneeglöckchen - Erste Blüte | 2 = Haselstrauch - Erste Blüte | 3 = Forsythie - Erste Blüte |
| 4 = Marille - Erste Blüte | 5 = Europ. Lärche - Blattentfaltung | 6 = Rosskastanie - Blattentfaltung |
| 7 = Süßkirsche - Erste Blüte | 8 = Apfel - Erste Blüte | 9 = Weinrebe - Beginn Austrieb |
| 10 = Flieder - Erste Blüte | 11 = Rosskastanie - Erste Blüte | 12 = Schwarzer Holunder - Erste Blüte |
| 13 = Dauergrünland - Ernte 1. Mahd | 14 = Weinrebe - Erste Blüte | 15 = Süßkirsche - Reife früh |
| 16 = Weinrebe - Ende der Blüte | 17 = Apfel - Reife früh | 18 = Schwarzer Holunder - Fruchtreife |
| 19 = Rosskastanie - Fruchtreife | 20 = Weinrebe - Lese früh | 21 = Apfel - Blattverfärbung |
| 22 = Apfel - Blattfall | | |

Abb. 7: Jahresvergleich Wien Hohe Warte

Fig. 7: comparison of phenological development of specific phenological phases in the actual year (= Heuriges Jahr) with last year (= Letztes Jahr), mean (= Langjähriges Mittel) and extreme years (= Minimum – Maximum)

Das Phäno Webportal der ZAMG wurde mittels Presseausendungen, Radio-Interviews und einem Bericht im ORF Fernsehen der Öffentlichkeit vorgestellt. Die Zugriffszahlen, im Mittel im Juli 733 pro Tag, im August 977 pro Tag beweisen, dass großes Interesse an Natur- und phänologischen Beobachtungen besteht. Bis Ende August 2006 haben sich knapp 70 neue User registriert, die Dateneingabe ist allerdings noch nicht am selben Stand. Im März 2007 gewann die ZAMG mit diesem Webportal den Klimaschutzpreis der Österreichischen Hagelversicherung.

4. Zusammenfassung

Das Phänologie Webportal der ZAMG eröffnet einen Einblick in die unmittelbaren Auswirkungen des Klimawandels. Pflanzen und Tiere reagieren deutlich auf die sich ändernden Klimabedingungen. Das Medienecho und das Interesse der breiten Öffentlichkeit in der Phänologie ist groß, das Öffnen und Zugänglich Machen des phänologischen Datenarchivs der

ZAMG unterstützt die ohnehin vorhandene Bereitschaft, sich mit dem Klimawandel und hoffentlich auch mit Klimaschutz auseinanderzusetzen.

Literaturverzeichnis

- MENZEL, A, T. H. SPARKS, N. ESTRELLA, E. KOCH, A. AASA, R. AHAS, K. ALM-KÜBLER, P. BISSOLLI, O. BRASLAVSKÁ, A. BRIEDE, F. M. CHMIELEWSKI, Z. CREPINSEK, Y. CURNEL, Å. DAHL, C. DEFILA, A. DONNELLY, Y. FILELLA, K. JATCZAK, F. MÅGE, A. MESTRE, Ø. NORDLI, J. PEÑUELAS, P. PIRINEN, V. REMISOVÁ, H. SCHEIFINGER, M. STRIZ, A. SUSNIK, F.-E. WIELGOLASKI, A. V. VLIET, S. ZACH, A. ZUST, 2006: European phenological response to climate change matches the warming pattern. - *Global Change Biology* **12**, 1969–1976.
- IPCC, 2001: *Climate Change 2001, Impacts, Adaption and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- EEA Report No2, 2004: *Impacts of Europe's changing climate. - An indicator based assessment*. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.
- PARMESAN, C. and G. YOHE, 2003: A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. - *Nature* **421**, 37-42.
- FRITSCH, C., 1854: *Instruction für Vegetationsbeobachtungen*. Jahrbücher der k.k. Centralanstalt für Meteorologie und Erdmagnetismus, II. Band, Jg 1850. - Kaiserlich Königliche Staatsdruckerei Wien.
- KOCH, E., 1982: Das phänologische Schnellmeldesystem. - *Wetter und Leben* **34**, 41-44.
- WEISS, C. and E. KOCH, 2000: *Anleitung zur Phänologischen Beobachtung in Österreich. Anleitungen und Betriebsunterlagen Nr. 1*, ZAMG, Wien, 31pp.
- HAMMERL Ch., W. LENHARDT, R. STEINACKER, P. STEINHAUSER (Hg.), 2001: *Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 1851-2001. - 150 Jahre Meteorologie und Geophysik in Österreich*. Leykam, Graz.
- SCHEIFINGER H., KOCH E., WINKLER H., 2006: Erste Ergebnisse einer Analyse vogelphänologischer Beobachtungen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 1951 – 1999 in Österreich. - *promet JG 33*, Heft 1/2, 2007.
- KOCH E., DITTMANN, E., LIPA W., MENZEL, A., VLIET, A.v., 2005: COST 725 Establishing a European phenological data platform for climatological purposes. - *Annalen der Meteorologie* **41**, VI 2, DWD.
- SCHWARTZ, M.D. (ed.), 2003: *Phenology: An Integrative Environmental Science*. (chapter 2.4) edited by M.D. Schwartz, Kluwer Academic press, 57-73.
- CHMIELEWSKI, F.M., A. MÜLLER, E. BRUNS, 2004: Climate changes and trends in phenology of fruit trees and crops in Germany, 1961-2000. - *Agricultural and Forest Meteorology* **121**, 69-78.
- CHMIELEWSKI, F.M., T. RÖTZER, 2001: response of tree phenology to climate change across Europe. - *Agricultural and Forest Meteorology* **108**, 101-112.

Anschrift der Autoren

Dr. Elisabeth Koch, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hohe Warte 38, A-1190 Wien

Robert Neumcke, Johann-von-Weerth-Str. 26, 79100 Freiburg

Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg

- Nr. 1: Fritsch, J.: Energiebilanz und Verdunstung eines bewaldeten Hanges. Juni 1998
- Nr.2: Gwehenberger, J.: Schadenpotential über den Ausbreitungspfad Atmosphäre bei Unfällen mit Tankfahrzeugen zum Transport von Benzin, Diesel, Heizöl oder Flüssiggas. August 1998
- Nr. 3: Thiel, S.: Einfluß von Bewölkung auf die UV-Strahlung an der Erdoberfläche und ihre ökologische Bedeutung. August 1999
- Nr. 4: Iziomon, M.G.: Characteristic variability, vertical profile and modelling of surface radiation budget in the southern Upper Rhine valley region. Juli 2000
- Nr. 5: Mayer, H. (Hrsg.): Festschrift „Prof. Dr. Albrecht Kessler zum 70. Geburtstag“. Oktober 2000
- Nr. 6: Matzarakis, A.: Die thermische Komponente des Stadtklimas. Juli 2001 *)
- Nr. 7: Kirchgäßner, A.: Phänoklimatologie von Buchenwäldern im Südwesten der Schwäbischen Alb. Dezember 2001 *)
- Nr. 8: Haggagy, M.E.-N.A.: A sodar-based investigation of the atmospheric boundary layer. September 2003 *)
- Nr. 9: Rost, J.: Vergleichende Analyse der Energiebilanz zweier Untersuchungsflächen der Landnutzungen „Grasland“ und „Wald“ in der südlichen Oberrheinebene. Januar 2004 *)
- Nr. 10: Peck, A.K.: Hydrometeorologische und mikroklimatische Kennzeichen von Buchenwäldern. Juni 2004 *)
- Nr. 11: Schindler, D.: Characteristics of the atmospheric boundary layer over a Scots pine forest. Juni 2004 *)
- Nr. 12: Matzarakis, A., de Freitas, C.R., Scott, D. (eds.): Advances in Tourism Climatology. November 2004 *)
- Nr. 13: Dostal, P.: Klimarekonstruktion der Regio TriRhena mit Hilfe von direkten und indirekten Daten vor der Instrumentenbeobachtung. Dezember 2004 *)
- Nr. 14: Imbery, F.: Langjährige Variabilität der aerodynamischen Oberflächenrauigkeit und Energieflüsse eines Kiefernwaldes in der südlichen Oberrheinebene (Hartheim). Januar 2005 *)
- Nr. 15: Ali Toudert, F.: Dependence of outdoor thermal comfort on street design in hot and dry climate. November 2005 *)
- Nr. 16: Matzarakis, A., Mayer, H. (Hrsg.): Proceedings zur 6. Fachtagung BIOMET des Fachausschusses Biometeorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e.V.. März 2007 *)

*) Bericht online verfügbar unter:

https://www.meteo.uni-freiburg.de/forschung/publikationen/berichte/index_html

