

SPEKTRUM



UNIVERSITÄT
BAYREUTH

7. JAHRGANG • AUSGABE 1 • MAI 2011

Dienstleister Wald

**Mehr als Holz:
Wald schafft Werte**

SEITEN 78-93

Globaler Wandel

**Werden die Wälder
überleben?**

SEITEN 14-23 . 48-53 . 66-77

Forschung Lokal

**Das BayCEER geht in die
Tiefe – und in die Luft**

SEITEN 44-65

Das Spektrum – ganz neu!

IMPRESSUM

Spektrum-Magazin der Universität Bayreuth

Auflage: 2.100 Stück

HERAUSGEBER:

Universität Bayreuth
Frank Schmälzle, Pressereferent (V.i.S.d.P.)

KONTAKTANSCHRIFT:

Pressestelle der Universität Bayreuth
95440 Bayreuth
Telefon (09 21) 55 - 53 23 / - 53 24
Telefax (09 21) 55 - 53 25
pressestelle@uni-bayreuth.de
www.uni-bayreuth.de

REDAKTION:

Frank Schmälzle, Birgit Thies (BayCEER),
Yana Balling, Andrea Früh

SATZ UND LAYOUT:

GAUBE media agentur, Bayreuth
Telefon (09 21) 5 07 14 41
spektrum@gaube-media.de

DRUCK:

Ellwanger Bayreuth
Diese Ausgabe des SPEKTRUM wurde auf
waldschonendem Recyclingpapier gedruckt.

**Alle Beiträge sind bei Quellenangaben und
Belegexemplaren frei zur Veröffentlichung.**

Wir freuen uns, Ihnen mit dieser Ausgabe ein neu gestaltetes Spektrum präsentieren zu können. Manches wird Ihnen beim Blättern und beim Lesen sicher bekannt vorkommen, vieles aber ist neu und anders. Gemeinsam mit der Bayreuther Agentur GAUBE media haben wir ein Layout entwickelt, das Ihnen Inhalte anschaulicher, frischer und besser gegliedert nahe bringen möchte. Das Spektrum ist ein Forschungsmagazin, diesem Anspruch wollen wir gerecht werden.

Auch konzeptionell hat das Spektrum inzwischen einen neuen Rahmen. Mindestens eine Ausgabe im Jahr ist einem Schwerpunktthema gewidmet. Das Spektrum, das Sie jetzt gerade in Händen halten, beschäftigt sich mit dem Internationalen Jahr der Wälder und insbesondere mit der vielfältigen Forschung der Universität Bayreuth in diesem Bereich.

Ich wünsche Ihnen viel Freude und vor allem einen großen Erkenntnisgewinn bei der Lektüre. Falls Sie Ideen haben, wie wir das Forschungsmagazin der Universität Bayreuth noch besser machen können, verraten Sie sie mir bitte. Sie erreichen mich per E-Mail an pressestelle@uni-bayreuth.de

Herzliche Grüße
Ihr

Frank Schmälzle
Pressereferent der Universität Bayreuth

DAS REDAKTIONSTEAM DIESER AUSGABE

Zum Redaktionsteam dieser Ausgabe, die sich rund um das Thema Wald dreht, gehörten zwei Studentinnen aus dem Masterstudiengang ‚Global Change Ecology‘. Im Rahmen des Projektseminars „Coordination and Communication“ sammelten und reflektierten sie Erfahrungen damit, eine Zeitschriftenausgabe mit zwei Dutzend Autoren zu koordinieren und die Kommunikation beim allgegenwärtigen Zeitdruck am Laufen zu halten.

Yana Balling

hat in Paris Theater- und Musikwissenschaften sowie in Montpellier und Aberdeen Biologie studiert. Derzeit nimmt sie an der Universität Bayreuth an dem Masterprogramm Global Change Ecology teil. Redaktionserfahrung hat sie bereits beim Radio und bei dem Wissenschaftsmagazin Nature gesammelt. Ihr Interesse gilt der Entwicklungshilfe und dem Umweltschutz.



Andrea Früh

ist Diplom-Ingenieurin in Landschaftsarchitektur und Umweltplanung und hat sich in ihrer Diplomarbeit mit der Bewertung von Erinnerungslandschaften am Beispiel des Grünen Bandes beschäftigt. Berufserfahrung sammelte sie als Mitarbeiterin in einem renommierten Nürnberger Landschaftsplanungsbüro sowie in einem Ingenieurbüro für Wasser, Umwelt und Datenverarbeitung in Höxter. Aufgrund ihres Hintergrunds in Umweltplanung und -bewertung wird sie sich in ihrer Masterarbeit mit den Auswirkungen der Landschaftsnutzung auf Ökosystemdienstleistungen beschäftigen und mit Hilfe von Landnutzungsmodellen mögliche Zukunftsszenarien entwickeln.



Liebe Leserinnen und Leser,

mit Aktionen und Berichten wird 2011 die Bedeutung des Waldes und seiner nachhaltigen Bewirtschaftung ins Bewusstsein gerufen. Die Wälder der Erde sind unbestritten wichtig für die Menschen. An erster Stelle als Dienstleister: Sie liefern Holz, Sauerstoff zum Atmen, filtern Staub aus der Luft und binden Treibhausgase, reinigen und speichern Wasser, schützen den Boden vor Erosion und bieten Lebensraum für eine Vielzahl von Wildpflanzen und -tieren. Die Wälder in unseren Breiten sind das Resultat einer Jahrhunderte langen Nutzungsgeschichte. Gleichzeitig ist der Wald der Ort von Mythen und Märchen, dient uns als Rückzugs- und Erholungsraum und symbolisiert als „Ur-Wald“ die Sehnsucht nach ungestörter Natur.

Die Wälder der Welt sind gefährdet: Durch den Klimawandel, an den sie sich schneller anpassen müssen, als Bäume nachwachsen können, und durch den Holz hunger und Platzbedarf der Menschen, die den (Regen-)Wald roden, um Nahrungsmittel anzubauen. Der Wald und seine Gefährdung waren für die Umweltforschung an der Universität Bayreuth von großer Bedeutung. Das Thema „Waldsterben“ führte Ende der 1980er Jahre zur Gründung des Bayreuther Instituts für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK). Inzwischen hat sich der Fokus von den Auswirkungen des ehemals

„sauren Regens“ auf die des spürbaren Klimawandels verschoben. Auf das Institut BITÖK folgte im Jahre 2004 das Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung (BayCEER), das breit angelegt die naturwissenschaftlichen Arbeitsgruppen der Uni Bayreuth in diesem Schwerpunkt bündelt.

Als sich Ende letzten Jahres die Idee eines Spektrums zum Internationalen Jahr der Wälder konkretisierte, hat sich gezeigt, dass auch heute Mitarbeiter fast aller Forschungsgruppen im Wald aktiv sind: Vor der Haustür im Fichtelgebirge und an unterschiedlichsten Orten der Erde nehmen sie die verschiedensten Aspekte des Ökosystems ‚Wald‘ unter die Lupe. So bietet dieses Heft den Lesern ein Kaleidoskop spannender Einblicke in aktuelle Forschungsprojekte mit Bezug zum Wald – und gleichzeitig einen Überblick aller Arbeitsgruppen, die aktuell im BayCEER aktiv sind.

Viel Spaß bei der Lektüre wünscht im Namen des Redaktionsteams

Birgit Thies
Geschäftsstelle BayCEER



**INTERNATIONAL YEAR
OF FORESTS • 2011**

Bayceer

Bayreuth Center of Ecology
and Environmental Research

Klimawandel, Landnutzungsänderungen und Umweltbelastung erfordern ein fächerübergreifendes Verständnis der Mechanismen und Strukturen natürlicher Systeme und Lebensgemeinschaften. Dies ist Kern des Bayreuther Forschungsschwer-

punkts Ökologie und Umweltwissenschaften, der durch Umweltrecht, Umweltinformatik und Umweltingenieurwissenschaften abgerundet wird.

Das **Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung** bündelt die fachlichen und technischen Kompetenzen von mehr als 20 Arbeitsgruppen, unterhält zentrale Labore und Serviceeinrichtungen und ist Träger des strukturierten Promotionsprogramms PEER in der Graduiertenschule BayNAT.

- www.bayceer.uni-bayreuth.de

INFO

Fotonachweise Titelseite:
Dariush M./Shutterstock.com;
S. 4: Inga Nielsen/Shutterstock.com

Das Internationale Jahr der Wälder



- 2 **Das Spektrum – ganz neu!** Vorwort von Frank Schmäzle, Pressereferent der Universität Bayreuth.
- 3 **Editorial** von Birgit Thies, Geschäftsstelle BayCEER.
- 4 **Inhaltsverzeichnis**



WLAN am Waldstein. Solarpaneele auf der Messfläche Schläppnerbrunnen.

PALÄO-UMWELT

- 6 **Zeitzeugen einer früheren Waldvegetation.** Rhizolithe verraten viel über vergangene Vegetation.
- 10 **Mit Biomarkern den Wäldern der Vergangenheit auf der Spur.** Pflanzenbürtige Lipide als molekulare Fossilien: neue Einblicke in die Vegetationsgeschichte Mitteleuropas.



Im Blitzlicht: Die Arbeitsgruppen des BayCEER.

WÄLDER WELTWEIT

- 14 **Die Wälder des Kilimanjaro.** 1.000 Quadratkilometer Tropenwald zwischen Trocken- und Kältengrenze.
- 20 **Tropische Wälder und Globaler Wandel.** Forschung über Trockenheit im Regenwald.
- 24 **Waldforschung in Äthiopien.** Naturwaldverjüngung unter Exoten.
- 28 **Bodenkartierung im tropischen Bergregenwald.** Problemlösung in unwegsamem Gelände.
- 32 **Überleben im Dunkeln.** Wie Waldbodenpflanzen mit der Lichtlimitation in ihrem Lebensraum umgehen.
- 36 **Den Wald vor lauter Bäumen sehen!** Unterschätzte Biodiversität im Unterwuchs der Wälder.
- 40 **Wälder der Erde.** An einem Tag im Ökologisch-Botanischen Garten der Universität Bayreuth.

BAYCEER

- 9 **Die PAST-Gruppe.** Paleoenviromental Studies.
- 31 **Im Blitzlicht I.** Weitere Arbeitsgruppen in der Biologie.
- 61 **Arbeitsgruppe EDV und Datenbanken.**
- 65 **Chemische Analytik.**
- 73 **Im Blitzlicht II.** Weitere Arbeitsgruppen aus Geowissenschaften und Sport.
- 85 **Die BayCEER Geschäftsstelle.**



Forschung über Trockenheit im Regenwald. Prof. Dr. Bettina Engelbrecht begutachtet die Experimente in den Wäldern des Kongobeckens.



- 50 **Der Wald im Fichtelgebirge im Extremjahr 2003.** Ökosystem ist widerstandsfähiger als Modelle zeigen.
- 54 **Komplizierte Austauschbedingungen in einem hohen Waldbestand.** Kohlenstoffsenke „Wald“ nur mit erheblichem Aufwand quantifizierbar.
- 58 **Bananen im Fichtelgebirge.** Wälder als Quelle und Senke für Feinstaub.
- 62 **Lachgasproduktion und -konsumption in Fichtenwäldern bei Bodenfrost und Trockenheit.** Nicht nur Kohlendioxid trägt zum globalen Klimawandel bei.

GLOBALER WANDEL

FORSCHUNG LOKAL

- 44 **WLAN am Waldstein.** Forschungsinfrastruktur im Fichtelgebirge.
- 48 **Auswirkungen des Klimawandels auf den Austrag gelöster organischer Substanz und Nitrat.** Identifikation der Quellen und Möglichkeiten der Vorhersage.

- 66 **Warum verschwindet das Treibhausgas Methan im Waldboden?** Bedeutung von Bakterien für das Klima.
- 70 **Totholz – ein Kohlenstoffspeicher?** Eine Studie über den Beitrag von Totholz zur Kohlenstoffspeicherung in bayerischen Wäldern.
- 74 **Anpassungsoptionen für unsere Wälder.** Innerartliche Unterschiede bei Bäumen bezüglich der Reaktion auf den Klimawandel.



Die Wälder des Kilimanjaro. Forschergruppe untersucht Veränderungen durch Klimawandel und zunehmenden Nutzungsdruck.

14

DIENTSTLEISTER WALD

- 78 **Dynamischer Lebensraum Wald.** Thema der Arbeitsgruppe der Juniorprofessur „Biogeographische Modellierung“
- 82 **Dienstleister Wald.** Bewerten und Entscheiden in Mensch-Umwelt Systemen.
- 86 **Simulation menschlicher Eingriffe im Wald.** Komplexe Modelle vom Wald und der komplexe Wald als Modell.
- 90 **Der Wald im Wandel der Zeit.** Umweltbildung im „Grünen Klassenzimmer“.



70

Totholz – ein Kohlenstoffspeicher? Inken Krüger bei der Arbeit an einer Studie in bayerischen Wäldern.

MEINUNG

- 94 **Der Schutz alter Wälder.** Ein Plädoyer für die Buchenwälder des Steigerwalds.

UNI INTERN

- 39 **Wer braucht noch ein Herbarium?** Das Herbarium der Universität Bayreuth.



PALÄO-UMWELT

■ GUIDO L. B. WIESENBERG
MARTINA GOCKE

Zeitzeugen einer früheren Wald- vegetation

RHIZOLITHE VERRATEN VIEL ÜBER
VERGANGENE VEGETATION

EIN PROJEKT DER BAYCEER
ARBEITSGRUPPE PAST
(PALEOENVIRONMENTAL STUDIES)

Bevor der Mensch umfassend die Vegetation im Südwesten Deutschlands verändert hat, standen hier weit ausgedehnte Wälder. Diese Kenntnis stammt überwiegend aus Sedimentarchiven von Seen, die sowohl die klimatischen Veränderungen als auch das Handeln des Menschen über die vergangenen Jahrtausende hinweg dokumentieren. Solche Archive, die ein kontinuierliches Abbild der früheren Umwelt enthalten, sind jedoch nicht flächendeckend vorhanden und mit verschiedenen Problemen behaftet. Seesedimente dokumentieren in erster Linie das Umweltsignal ihres Einzugsgebietes, wobei die Erhaltungsbedingungen dieses Signals von zahlreichen Faktoren abhängen, so dass eine genaue flächenhafte Verteilung der Vegetation nur bedingt ermittelt werden kann. Neben Seesedimenten, die vor allem Holz, Holzkohle, Blätter, Pollen, aber auch molekulare Spuren der früheren Vegetation als Zeitzeugen enthalten, gibt es weitere Optionen, die frühere Wald- und Strauchvegetation *in situ* zu studieren – also an dem Ort, an dem sie gewachsen ist. Eine Möglichkeit bieten verkalkte Wurzelröhren, die auch unter Namen wie Rhizolithe, Osteokollen, Beinbrech und weiteren seit über 280 Jahren beschrieben werden.

In Südwestdeutschland sind Rhizolithe an mehreren Stellen beschrieben worden, wo kaltzeitliche Sedimente (Löss) unmittelbar unterhalb vom heutigen Boden auftreten. Diese Sedimente sind reich an Kalziumkarbonat (bis zu 30 %), so dass eine Nachlieferung von Kalzium die Bildung der Rhizolithe begünstigt hat. Während die Exorhizolithe in Deutschland in der Regel Durchmesser von bis zu fünf Zentimeter haben und im Profil über Längen von über 1,5 Meter verfolgt werden können, sind z. B. von den Kanaren Rhizolithe mit Durchmessern von über 30 Zentimeter und mehreren Metern Länge beschrieben worden (so genannte „Megarhizolithe“). Rhizolithe sind von allen Kontinenten beschrieben worden, wobei eine heutige Bildung von Rhizolithen selten beobachtet worden ist und somit die meisten der bekannten Rhizolithvorkommen auf frühere Vegetationsformen zurückgehen.

In der rund 15 Meter mächtigen Lössabfolge mit eingeschalteten Paläoböden (ehemalige Böden) bei Nussloch nahe Heidelberg treten unterhalb des heutigen Bodens Rhizolithe in Tiefen zwischen 0,6 bis mindestens acht Meter auf. Ihre Größe und Morphologie ist an diesem Standort relativ divers, so dass man davon ausgehen kann, dass

die Rhizolithe nicht nur um Wurzeln einer spezifischen Pflanze, sondern vielmehr um Wurzeln von verschiedenen tief wurzelnden Bäumen und Sträuchern gebildet wurden. Mittels Radiokohlenstoffdatierung wurde ein Alter eines Exorhizoliths von rund gut 3.000 Jahren ermittelt, während in einem benachbarten Profil auch Endorhizolithe mit Altern von über 9.000 Jahren beschrieben wurden.

Häufig wurden Rhizolithe in der Vergangenheit rein morphologisch beschrieben, während mittels moderner geochemischer Analysenverfahren weitere Informationen gewonnen werden können. Exorhizolithe aus Nussloch werden unter anderem auf ihren Gehalt und die Zusammensetzung an pflanzenbürtigen und mikrobiellen Inhaltsstoffen untersucht. Bei den pflanzlichen Inhaltsstoffen wird einerseits die Fragestellung verfolgt, von welchen Pflanzen die Rhizolithe gebildet worden sind und andererseits, wie die Durchwurzelung den ursprünglichen Gehalt an organischen Inhaltsstoffen im Löss überprägt hat. Die Zusammensetzung von Lipiden wie Alkanen und Fettsäuren und der Vergleich mit der heutigen Vegetation haben bestätigt, dass die Exorhizolithe von Nussloch nicht durch die heutigen Bäume und Sträucher, die seit der Beendigung der ackerbaulichen Nutzung vor wenigen Jahren an dem Standort wachsen, gebildet wurden. Stattdessen war eine frühere Vegetation für die Bildung der Rhizolithe verantwortlich. Aufgrund des Radiokohlenstoffalters und der chemischen Zusammensetzung von Alkanen und Fettsäuren lässt sich vermuten, dass die Exorhizolithe von Nussloch auf Wurzeln von Haselnuss, Buche, Eiche und Erle zurückzuführen sind.



Dr. Guido L.B. Wiesenberg
vertritt im Sommersemester
2011 die Professur am **Lehrstuhl für
Agrarökosystemforschung.**



Dr. Martina Gocke,
Wissenschaftliche Mitarbeiterin am **Lehrstuhl für Agrarökosystemforschung.**

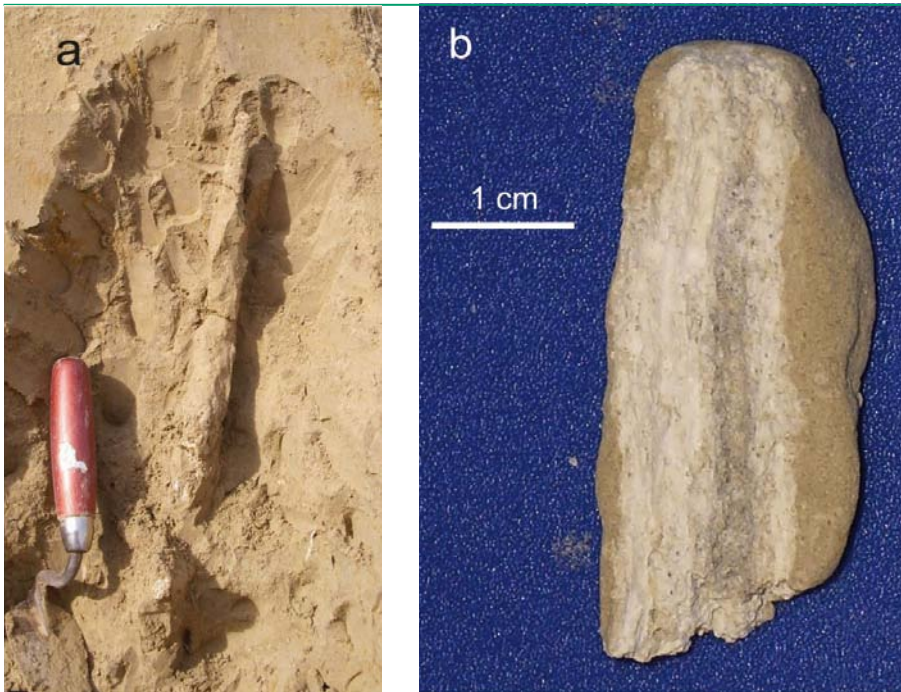
WEBLINK

- www.aes.uni-bayreuth.de

INFO

Die Entstehung von Rhizolithen

Rhizolithe entstehen zu Lebzeiten oder spätestens kurz nach Absterben insbesondere von Strauch- und Baumwurzeln in kalkreichen Sedimenten oder Böden. Durch Wurzelexsudate und einen Überschuss an CO₂ im Wurzelraum wird dortiges Karbonat in Gegenwart von Wasser gelöst und dann um die Wurzeln herum ausgefällt. Die Ausfällung an der Wurzeloberfläche erfolgt dadurch, dass die Pflanzen das Wasser aufnehmen und somit Wasser aus dem umgebenden Boden bzw. Sediment in Richtung der Wurzel fließt. Durch die Wasseraufnahme steigt die Konzentration an gelöstem Kalzium an der Wurzeloberfläche an und Kalziumkarbonat wird ausgefällt, wenn die CO₂ Konzentration im Wurzelraum ausreichend hoch ist. Die an der Wurzeloberfläche entstehenden Rhizolithe werden auch Exorhizolithe genannt. Im Gegensatz dazu bezeichnet man Kalziumkarbonatausfällungen innerhalb von Wurzelzellen auch als Endorhizolithe. Letztere sind jedoch meistens nur schwierig mit bloßem Auge zu erkennen, während die meist durch den hohen Kalziumkarbonatanteil strahlend weißen Exorhizolithe häufig sehr gut wahrzunehmen sind.



Rhizolith im Lössprofil bei Nussloch (a) und aufgeschnitten im Labor (b). Im Gegensatz zum weißen Kalziumkarbonat sind die Überreste der ehemaligen Wurzel dunkel gefärbt.

Desweiteren hat sich gezeigt, dass sich infolge der Durchwurzelung die chemische Zusammensetzung der Lössorganik in der Umgebung der Rhizolithe deutlich verändert hat, was in Entfernungen von mindestens fünf Zentimetern zu den Rhizolithen bisher belegt ist. Ob und inwiefern eine Überprägung auch in weiteren Distanzen zur Wurzel stattgefunden hat, soll mittels verschiedener Methoden wie organischer Analytik, Altersbestimmungen und Farbmessungen in Nussloch und an anderen Standorten untersucht werden.

Neben pflanzlichen Inhaltsstoffen geben Rhizolithe auch Einblick in molekulare Fossilien von mikrobiellen Vergesellschaftungen. Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraether (GDGT) als molekulare Überreste anaerober Bakterien und Archaeen haben gezeigt, dass die bislang noch schlecht spezifizierte Gruppe von Mikroorganismen sich nach dem Ab-

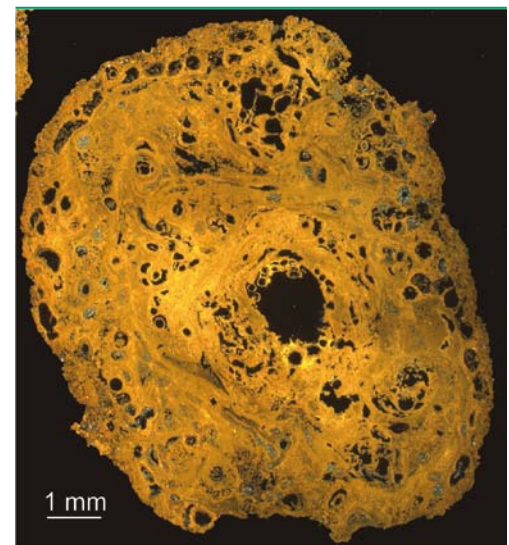
alle Abb. aus: Gocke, M., Pustovoytov, K., Kühn, P., Wiesenberger, G.L.B., Löscher, M. & Kuzyakov, Y. Carbonate rhizoliths in loess and their implications for paleoenvironmental reconstruction – revealed by isotopic composition: $\delta^{13}\text{C}$, ^{14}C , Chemical Geology 283, 251-260.

Abb. rechts: Querschnitt durch einen Rhizolith. Der ehemalige Hauptwurzelkanal (zentral) sowie weitere kleinere Wurzelkanäle sind in schwarzer Farbe zu sehen. Manche Wurzelkanäle sind nach Absterben und Zersetzung der Wurzel durch grobe Kalziumkarbonatkristalle ausgefüllt worden (helle Stellen). Die Matrix besteht ebenfalls aus feinem Kalziumkarbonat, das im Dünnschliff gelb gefärbt ist.

sterben von Wurzeln von deren Überresten ernährt und somit die molekularen Überreste in den Rhizolithen hinterlassen hat. Während andere Mikroorganismen wie aerobe Bakterien im ehemaligen Wurzelraum gelebt und sich von Wurzelhaaren und Wurzelexsudaten ernährt haben, lässt sich somit die mikrobielle Vergesellschaftung in und an Rhizolithen differenzieren.

Rhizolithe bieten nicht nur die Möglichkeit, Aussagen zu früheren Waldstandorten in situ zu treffen, also welche Vegetation zu welcher Zeit auf dem Standort gewachsen ist. Sie ermöglichen auch Einblicke in bodenbildende Prozesse, die in der Umgebung der einstigen Wurzeln stattgefunden haben. Über die Untersuchung des ehemaligen Wurzelraumes lässt sich darüber hinaus auch erkennen, welche langfristigen Beiträge zur CO_2 -Fixierung tief wurzelnde Pflanzen im Laufe ihres Lebens leisten können, bzw. inwiefern sie zur Veränderung des ursprünglichen Signals der durchwurzelten Sedimente beigetragen haben, und bieten insofern vielfältige Lösungsansätze für geökologische Fragestellungen.

AUS DEM EHEMALIGEN WURZELRAUM LÄSST SICH ABLEITEN, WELCHE LANGFRISTIGEN BEITRÄGE ZUR CO_2 -FIXIERUNG TIEF WURZELNDE PFLANZEN LEISTEN KÖNNEN.



Die PAST-Gruppe

PALEOENVIRONMENTAL STUDIES

Unsere Umwelt ist einem beständigen Wandel unterworfen, verursacht durch das Wirken des Menschen und durch natürliche Klimaschwankungen. Wie sich solche Faktoren auf Ökosysteme auswirken, lässt sich aus der Erforschung vergangener Klima-, und Umweltbedingungen ableiten. – **„The Past is the key to the future.“** – Die PAST-Gruppe ist ein lehrstuhlübergreifender Zusammenschluss von Arbeitsgruppen innerhalb des BayCEER, die sich mit der Rekonstruktion der Umweltveränderungen in der Vergangenheit beschäftigen. Da die PAST-Gruppe ein breites innovatives Methodenspektrum abdeckt, basieren die Projekte zur Paläoumweltrekonstruktion, wie die hier vorgestellten Fallbeispiele, auf einem multidisziplinären Ansatz: Die frühere Vegetation (Paläovegetation) in einem Untersuchungsgebiet wird hierbei anhand von Biomarkern (Professuren Bodenphysik und Agrarökosystemforschung) rekonstruiert (siehe Artikel Seite 10). Die Analyse kalzifizierter Wurzelgänge (Rhizolithe) und darin erhaltener organische Substanz (Professur für Agrarökosystemforschung) stellt eine weitere Herangehensweise zur Rekonstruktion der Paläovegetation dar (siehe Artikel Seite 6). Der Nachweis und die relative Konzentration bestimmter organischer Moleküle, die Tierkot entstammen, erlauben ferner Rückschlüsse auf die Faunenzusammensetzung (Professur Bodenphysik). Diese innovativen Methoden werden weiterhin ergänzt durch mineralogische, geochemische, bodenkundliche



und gesteinsmagnetische Untersuchungen (Professuren für Bodenphysik und Geomorphologie). Dies liefert wertvolle zusätzliche Hinweise auf die Umweltbedingungen, die in den Untersuchungsgebieten zu Vegetationsveränderungen geführt haben. Zum Teil können selbst Veränderungen in der Saisonalität von Klimaparametern mit solch einem multidisziplinären Ansatz rekonstruiert werden. Stabilisotopenanalysen (^{18}O , ^2H , ^{13}C , ^{15}N) erlauben weitere Rückschlüsse auf Veränderungen von Temperatur, Niederschlag, Trockenstress und Photosynthese-Mechanismus (Professuren für Bodenphysik und Agrarökosystemforschung). Lumineszenz-Datierung, Expositionsdatierung mittels kosmogener Nuklide und paläo- und umweltmagnetische Untersuchungen (Lehrstuhl Geomorphologie) ermöglichen es, die Ergebnisse in einen zeitlichen Kontext zu stellen. Seit kurzem trägt auch die Professur für Klimatologie mit Klimamodellrechnungen zu den Forschungen der PAST-Gruppe bei. Dieser produktive Zusammenschluss verschiedener Disziplinen unter dem Dach des BayCEER lässt auch in Zukunft auf weitere wichtige Erkenntnisse zur Grundlagenforschung im Themenfeld „Wald und Klimaveränderungen“ hoffen, speziell vor dem Hintergrund langer Zeitskalen.



Die Mitarbeiter der Bodenphysik und der Agrarökosystemforschung: Sitzend von links nach rechts: Ines Röhringer (Doktorandin), Dr. Martina Gocke, Simon Rass. Stehend von links nach rechts: Jago Birk (Doktorand), Dr. Michael Zech, Björn Buggle (Doktorand). Nicht im Bild: Guido Wiesenberg.

WEBLINK

- www.bayceer.uni-bayreuth.de/past

Foto links: Die Mitarbeiter des Lehrstuhls Geomorphologie: Prof. emeritus Dr. Wolfgang Zech, Dr. Ulrich Hambach, Dipl.-Geogr. Sebastian Kreutzer, PD Dr. Daniel Richter, Prof. Dr. Ludwig Zöller, PD Dr. Markus Fuchs, PD Dr. Klaus-Martin Moldenhauer.

PERSONALIA

Die Mitglieder der PAST-Gruppe

- **Björn Buggle**, Abteilung Bodenphysik, Universität Bayreuth
- **Jago Birk**, Abteilung Bodenphysik, Universität Bayreuth
- **Markus Fuchs**, Lehrstuhl Geomorphologie, Universität Bayreuth
- **Bruno Glaser**, Professur für Bodenbiogeochemie, Martin-Luther Uni Halle-Wittenberg
- **Martina Gocke**, Lehrstuhl für Agrarökosystemforschung, Universität Bayreuth
- **Ulrich Hambach**, Lehrstuhl Geomorphologie, Universität Bayreuth
- **Sebastian Kreutzer**, Lehrstuhl Geomorphologie, Universität Bayreuth
- **Klaus-Martin Moldenhauer**, Lehrstuhl Geomorphologie, Universität Bayreuth
- **Simon Rass**, Abteilung Bodenphysik, Universität Bayreuth
- **Daniel Richter**, Lehrstuhl Geomorphologie, Universität Bayreuth
- **Ines Röhringer**, Lehrstuhl Geomorphologie, Universität Bayreuth
- **Guido Wiesenberg**, Lehrstuhl für Agrarökosystemforschung, Universität Bayreuth
- **Michael Zech**, Abteilung Bodenphysik und Lehrstuhl Geomorphologie, Uni Bayreuth
- **Wolfgang Zech**, Professur für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Bayreuth
- **Ludwig Zöller**, Lehrstuhl Geomorphologie, Universität Bayreuth



■ BJÖRN BUGGLE
MICHAEL ZECH

Mit Biomarkern den Wäldern der Vergangenheit auf der Spur

PFLANZENBÜRTIGE LIPIDE ALS MOLEKULARE FOSSILIEN –
NEUE EINBLICKE IN DIE VEGETATIONSGESCHICHTE MITTELEUROPAS

■ Titelbild: Mögliches Landschaftsbild im Karpatenbecken zur Zeit des Letzten Glazialen Maximums, gemäß den Biomarkerbefunden, sowie paläontologischen Ergebnissen und Untersuchungen an fossilen Holzkohlen und Schneckenfaunen (Bild von www.mauricioanton.com).

WO WAREN DIE BÄUME WÄHREND DER LETZTEN EISZEIT?

In den vergangenen Jahrhunderttausenden haben sich Gebirgsgletscher und das Inlandeis wiederholt über große Bereiche der Nordhemisphäre ausgedehnt. Diese von Gletschern und tiefen Temperaturen geprägten Zeiten werden allgemein als Eiszeiten oder Glaziale bezeichnet. Für Europa waren dabei nicht nur die starke Absenkung der Winter- und Sommertemperaturen charakteristisch, sondern auch die im Vergleich zu heutigen Verhältnissen drastisch reduzierten Niederschlagsmengen.

Bisher wurde davon ausgegangen, dass in den Eiszeiten temperate und boreale Bäume nur in südlichen Regionen entlang des Mittelmeeres (Italien, Spanien, Griechenland) geeignete Refugien fanden und in Mitteleuropa eine baumlose Kältsteppe bestand. Diese Ansicht stützte sich vor allem auf Pollenstudien an eiszeitlichen Sedimenten. Geringe Anteile von Baumpollen sind üblicherweise über Ferntransport erklärt worden. Seit einigen Jahren gibt es jedoch zunehmend Studien, die basierend auf Holzkohlefunden und fossilen Schneckenfaunen dieses traditionelle Bild in Frage stellen. Der Großteil dieser Befunde stammt aus dem Karpatenbecken (Abb. 1). Dort finden sich mehrere Dekameter mächtige Ablagerungen aus Staub (mittlerer Korndurchmesser ca. 5-60 µm), der während den Eiszeiten aus saisonal trockengefallenen Flussbetten der großen Ströme ausgeweht wurde. Man bezeichnet dieses eiszeitliche Sediment als Löss. In den Warmzeiten (Interglazialen) haben sich in diesen Sedimenten Böden entwickelt, die in nachfolgenden Glazialen wiederum von Löss überdeckt wurden. Die so entstandenen Abfolgen von Lössen und fossilen Böden (Paläoböden) – sogenannte Löss-Paläobodenabfolgen – stellen wertvolle Archive für die Klima-, und Landschaftsentwicklung dar (Abb. 3).

Aktuelle Untersuchungen der PAST-Arbeitsgruppe der Universität Bayreuth an Löss-Paläoboden-Abfolgen im Karpatenbecken leisten daher nicht nur einen Beitrag zur Rekonstruktion der regionalen Umweltgeschichte, sondern auch zur Refugiendiskussion.

Im Fokus der Untersuchungen stehen molekulare Fossilien, die auch Studien zur Paläoumwelt ermöglichen, wenn keine sichtbaren Fossilien vorhanden sind. Ein Beispiel solcher molekularen Fossilien sind so genannte Alkane, die bei lebenden

Pflanzen einen Hauptbestandteil der äußersten Wachsschicht ausmachen und die Pflanzen gegen Umwelteinflüsse schützen. Bäume lassen sich vielfach von Gräsern anhand der Zusammensetzung der Alkane unterscheiden, wobei Alkane durch eine gute Erhaltungsfähigkeit charakterisiert sind. So kann die Häufigkeitsverteilung von Alkanen im Löss ein Marker (auch Biomarker genannt) für den Eintrag von Blattwachsen sein. Während kettenförmige (n-)Alkane mit 27 und 29 Kohlenstoffatomen typisch für Baumwachse sind, haben Grasalkane mit einer Bevorzugung von 31 und 33 Kohlen-

AUTOREN

Dipl. Geoökologe Björn Buggle Dr. Michael Zech

Björn Buggle (links) wurde 1981 in Kempten/Allgäu geboren. Er studierte von 2001 bis 2007 Geoökologie mit den Hauptfächern Bodenkunde und Bodenphysik an der Universität Bayreuth. 2005 beschäftigte er sich erstmalig im Rahmen eines Forschungspraktikums an den Lehrstühlen Limnologie und Chemische Sedimentologie der ETH Zürich mit der Paläoumweltrekonstruktion. Themen waren die „Rekonstruktion der Umweltbedingungen des Zürichsees mittels C-, N-Isotopenanalysen von Seesedimenten in jährlicher Auflösung“ und „Seismische und sedimentologische Untersuchungen an Seesedimenten des Vierwaldstättersees auf Hinweise der Tsunami von 1601“. In den Jahren 2006 und 2007 fertigte er am Lehrstuhl Bodenkunde, später **Abteilung Bodenphysik** (Universität Bayreuth) seine Diplomarbeit zur Stratigraphie und Geochemischen Charakterisierung von Südosteuropäischen Lösspaläobodensequenzen an. Seit Ende 2007 beschäftigt er sich im Zuge seiner Doktorarbeit mit der Rekonstruktion der Quartären Klima- und Vegetationsgeschichte Südosteuropas. Löss-Paläobodensequenzen dienen ihm hierfür als Umweltarchiv. Seine Arbeiten stützen sich auf einen multidisziplinären Ansatz, bei dem er innovative Methoden wie die Biomarker und Stabilisotopenanalytik mit klassischen bodenkundlichen, mineralogischen sowie anorganisch-geochemischen Methoden kombiniert.

Michael Zech (rechts) wurde 1977 in Rosenheim geboren. Er studierte Biologie und Chemie an der Ludwig Maximilians-Universität München und verfasste seine Zulassungsarbeit zum Thema Klimaentwicklung und Landschaftsgeschichte am

Kilimandscharo. Von 2003 bis 2007 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und der Universität Bayreuth. 2007 promovierte er an der Universität Bayreuth zum Dr. rer. nat. mit dem Thema „Biomarker- und Stabilisotopen-Analytik in der Paläopedologie“. Seitdem führt er diese Arbeiten mit Schwerpunkt in Südamerika als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der **Abteilung Bodenphysik** und am **Lehrstuhl Geomorphologie** in Bayreuth fort. Zudem folgte er der Einladung von Prof. S. Marković und forschte die vergangenen Jahre als Feodor-Lynen Forschungsstipendiat der Alexander von Humboldt-Stiftung viele Monate an der Universität Novi Sad, Serbien. Seit Sommer 2010 ist er Feodor-Lynen Rückkehrstipendiat an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und der Uni Bayreuth und Habilitand für das Fachgebiet Geoökologie.



stoffatomen eine tendenziell längere Kettenlänge. Über ein Verhältnis der Alkane aus diesen Quellen lassen sich in Sedimentarchiven Rückschlüsse auf die einstige Vegetation ziehen, d.h. ob eine Wald- oder eine Grasvegetation dominiert hat.

Erste Ergebnisse liegen bereits für das nord-serbische Lössprofil Crvenka vor (Abb. 2). Die Sequenz an Lössen und fossilen Böden umfasst mehr als die letzten 125.000 Jahre. Über einen Paläoboden aus dem letzten Interglazial (V-S1) ist ein mehrere Meter mächtiges Lösspaket während der letzten Eiszeit abgelagert worden. Ein Paläoboden (V-L1S1) aus einer schwach ausgeprägten Warmperiode (Interstadial) während der letzten Eiszeit gliedert dieses Lösspaket in zwei Einheiten (V-L1L2 und V-L1L1). Die obere entspricht dem „Letzten Glazialen Maximum“ (Maximum der globalen Eisausdehnung). Steppe oder Waldsteppe ist die heutige potentielle natürliche Vegetation an diesem Standort, wie auch im Großteil des übrigen Karpatenbeckens. Sowohl für das letzte Interglazial als auch für das letzte Glazial weist das n-Alkan Tiefenprofil auf Grasland-Dominanz hin. Jedoch ergeben sich für die Kälteperioden einschließlich des Letzten Glazi-

alen Maximums auch Hinweise auf leicht erhöhte Baumanteile am Vegetationsbild.

Während also infolge einer ausgeprägten Sommertrockenheit unter warmzeitlichen Bedingungen im Karpatenbecken meist reine Grassteppen vorherrschten, waren in der kaltzeitlichen Landschaft Bäume zumindest vereinzelt vertreten. Die Holzkohlefunde in ungarischen Lössen lassen darauf schließen, dass es sich hierbei vornehmlich um Nadelbäume (Kiefer, Fichte, Lärche) handelt. Es zeichnet sich das Bild einer Taigasteppe ab (siehe Titelbild). Klimamodellen folgend lässt sich das kaltzeitliche Auftreten von Baumvegetation im Karpatenbecken auch klimatisch erklären. Selbst in Zeiten des globalen Vereisungsmaximums waren die Sommermonate noch relativ warm (um oder leicht über 10 °C Durchschnittstemperatur des wärmsten Sommermonats) und – noch viel wichtiger – sie wiesen eine positivere klimatische Wasserbilanz (Niederschlag – Verdunstung) auf als heute. Die Befunde aus den Biomarkeranalysen ergänzen somit die bisherigen Hinweise auf die Existenz glazialer Baumrefugien nördlich der klassischen Refugienstandorte entlang des Mittelmeeres. Die nördliche Verbreitungsgrenze von Bäumen

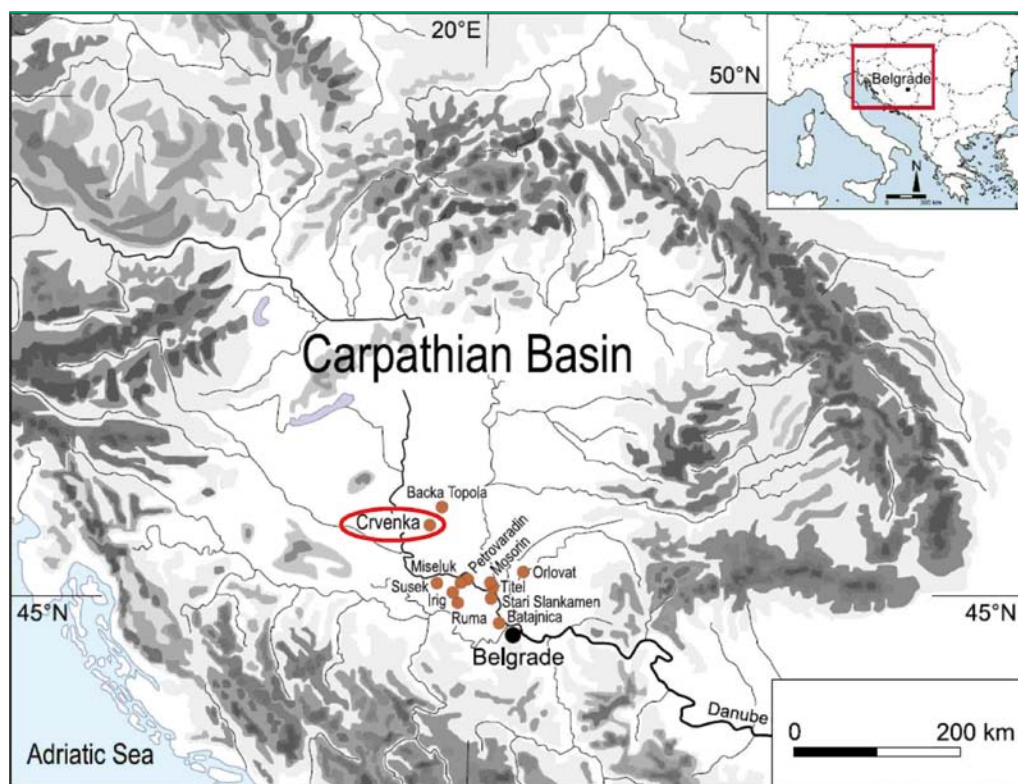


Abb. 1: aus "Zech et al., 2009, Reconstructing Quaternary vegetation history in the Carpathian basin, SE Europe, using n-alkane biomarkers as molecular fossils. Quaternary Science Journal 58 (2) , 148-155."

Abb. 2: modifiziert nach: ebenda.

Abb. 1: Topographische Karte des Karpatenbeckens mit der geographischen Lage des Lössprofils Crvenka (Serbien) und anderer Lössprofile.

während der Eiszeiten ist jedoch ungeklärt. Einen Beitrag zur Klärung dieser Frage sollen die derzeitigen Forschungsaktivitäten der PAST-Arbeitsgruppe liefern. Diese beschäftigen sich unter anderem mit der Frage, inwieweit sich eiszeitliche Baumvorkommen auch in Deutschland nachweisen lassen. Hierzu werden momentan Lössprofile nahe Heidelberg und in Sachsen eingehender untersucht.

KEIN WALD AUF FOSSILEN WALDBÖDEN?

Im Karpatenbecken sowie im Steppengebiet der unteren Donau befinden sich einige der längsten terrestrischen Umweltarchive Europas. Es sind wiederum Löss-Paläoboden-Sequenzen, oft mehr als 30 m mächtig (Abbildung 3). Sie sind Zeugen der Landschaftsentwicklung der letzten 1 Million Jahre. Wie die heutigen Böden, so sind auch die Böden der letzten drei Warmzeiten als (fossile) Steppenböden ausgebildet; hingegen sind aus den älteren Warmzeiten (400.000 - 1.000.000 Jahre) vorwiegend Braunerden und Parabraunerden überliefert, die üblicherweise als fossile Waldböden interpretiert wurden. Biomarkeruntersuchungen der PAST-Gruppe zeigen jedoch, dass sich diese Böden unter Grasvegetation entwickelt haben. Weitere geochemische und mineralogische Merkmale deuten zudem auf ein stark saisonales Klima hin. Milde und feuchte Winter führten zu einer intensiven Mineral(Silikat)verwitterung, während sich warm-trockene Sommer in verstärkter Hämatitbildung (Eisenoxid) widerspiegeln.

Aus diesen Befunden lässt sich Folgendes ableiten: Sei es unter einem Mediterranen Klima wie vor über 400.000 Jahren oder unter einem Step-

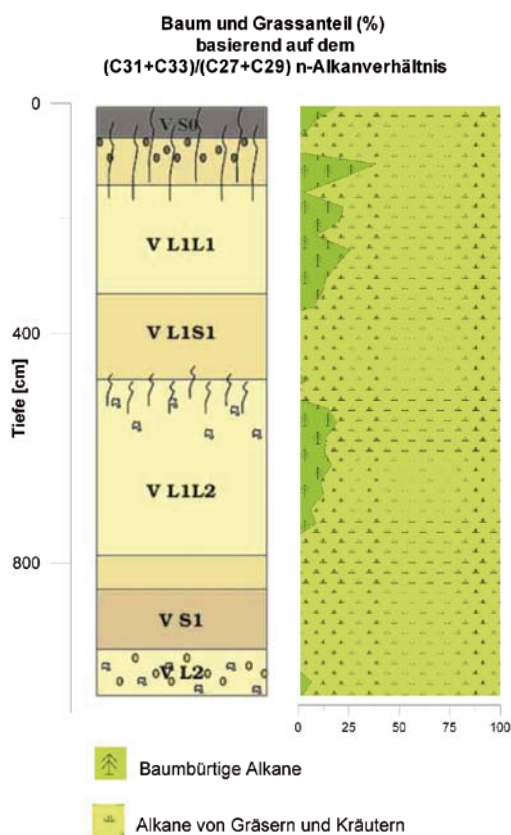


Abb. 2: Löss-Paläobodenabfolge des Profils Crvenka (Serbien). Die dunklen Horizonte markieren mehr oder weniger stark entwickelte fossile Böden, die hellen Lagen markieren Löss. Der relative Baumanteil wurde basierend auf der Zusammensetzung fossiler n-Alkane abgeschätzt.

WEBLINK

- www.bayceer.uni-bayreuth.de/bophy
- www.geomorph.uni-bayreuth.de

penklima wie in den nachfolgenden Interglazialen oder der gegenwärtigen Warmzeit, Sommer-trockenheit war ein charakteristisches Merkmal des warmzeitlichen Klimas in diesem Raum. Dies ermöglichte nur eine eingeschränkte Verbreitung von Bäumen. In Kaltzeiten hingegen war auf Grund einer günstigeren Wasserbilanz eine stärkere Ausbreitung der Baumvegetation möglich.

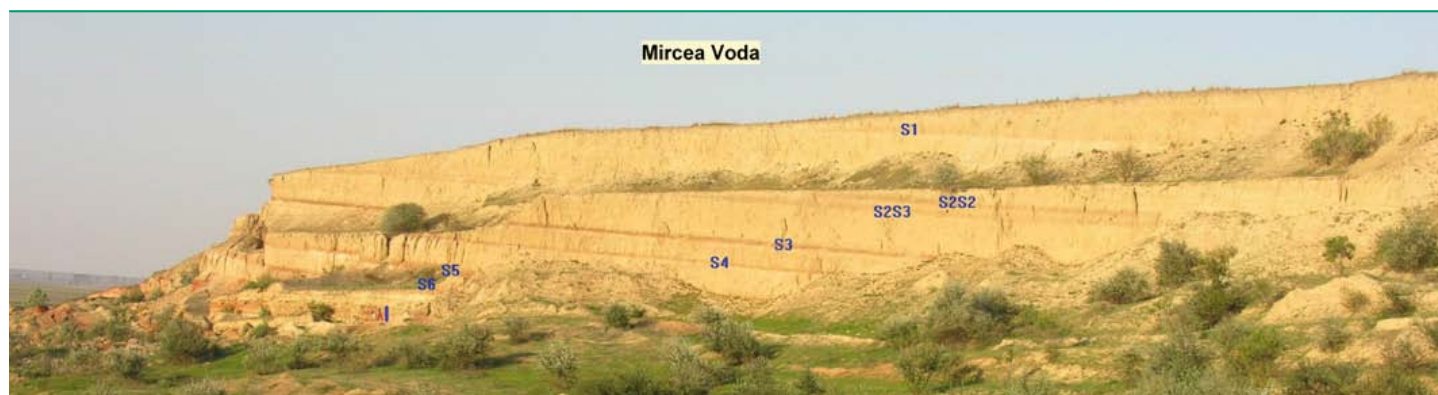


Abb. 3: Die 30 m mächtige Löss-Paläobodenabfolge von Mircea Voda (Rumänien). Die vertikale blaue Linie markiert die Größe eines 1,80 m großen Mannes als Maßstab (links unten). Fossile Böden der letzten Warmzeiten sind markiert mit S1 (letztes Interglazial, ca. 100.000 Jahre), S2S2 und S2S3 (vorletztes Interglazial, ca. 200.000 Jahre), S3 (Interglazial vor ca. 300.000 Jahren), S4 (Interglazial vor ca. 400.000 Jahren), S5 (Interglazial vor ca. 500.000 - 600.000 Jahren) und S6 (Interglazial vor ca. 700.000 Jahren).

WÄLDER WELTWEIT

■ ANDREAS HEMP

Die Wälder des Kilimanjaro

1.000 QUADRATKILOMETER
TROPENWALD ZWISCHEN
TROCKEN- UND KÄLTEGRENZE

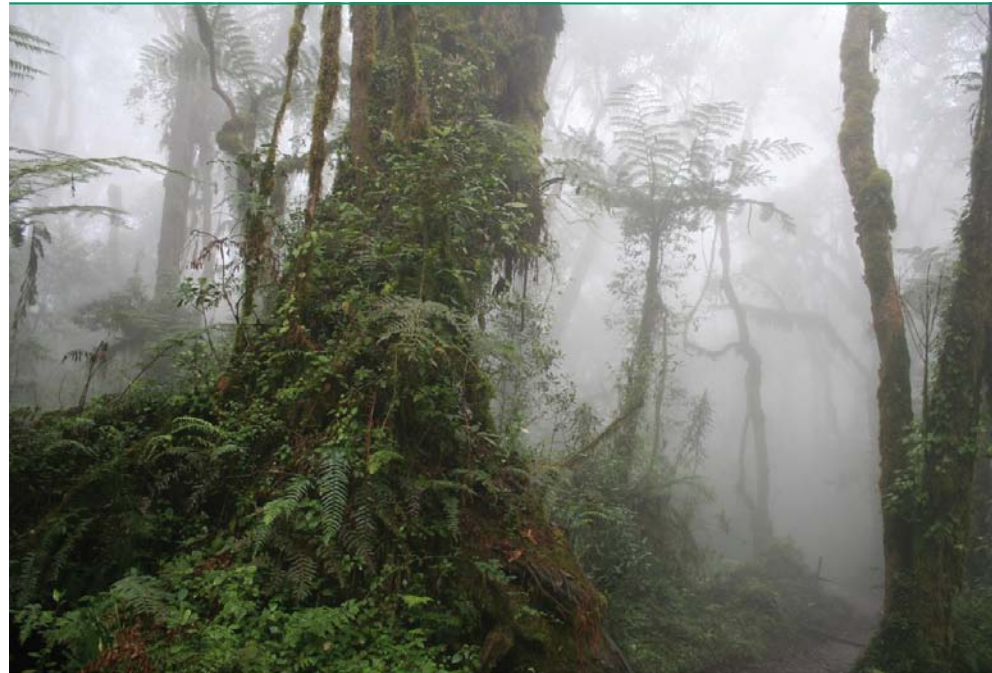


■ Großes Foto: Eine typische Orchideenart hochmontaner Podocarpuswälder: *Cynorkis pleistadenia*.
Kleines Foto: Jedes Jahr vernichten Feuer große Flächen subalpinen Wald- und Buschlandes. Hier ein Brand am Mawenzi, dem mit 5.300 Metern zweithöchsten Gipfel des Kilimanjaro.

Weit über die Wolken, die seine Hänge jeden Tag verhüllen, erhebt sich der Kilimanjaro über die Savanne Ostafrikas. Dieser majestätische Vulkan ist nicht nur der höchste Berg Afrikas, sondern zugleich der höchste freistehende Berg der Welt mit einem kontinuierlichen Hanganstieg von über 5.000 Metern. Daher finden sich hier äußerst gegensätzliche Klima- und Vegetationszonen, von der trocken-heißen tropischen Savanne über die feuchte Nebelwaldstufe bis zur nivalen Zone, auf engstem Raum vereinigt und bieten somit ideale Voraussetzungen für vegetationsökologische Studien. Andere Eigenarten des Kilimanjaro sind sein vergleichsweise geringes Alter und seine isolierte Lage. Diese werfen interessante pflanzengeographische und vegetationsgeschichtliche Fragen auf. Auch Artbildungsprozesse lassen sich hier beispielhaft untersuchen. Andererseits ist der Kilimanjaro stellenweise sehr dicht besiedelt – über eine Million Menschen leben insbesondere am Süd- und Osthang mit entsprechenden Auswirkungen für die natürlichen Bergökosysteme. Fast unberührte Wildnis und intensive Landnutzung und Besiedlung, dieser Gegensatz ist ein weiteres typisches Merkmal des Kilimanjaro. Der Kilimanjaro besitzt noch gut 1.000 Quadratkilometer Wald, die im Rahmen mehrerer DFG-Projekte untersucht wurden. Diese Forschungsarbeiten waren bereits Thema sowohl einer Folge aus der ZDF-Fernsehreihe „Humboldts Erben“ als auch aus der CNN-Reihe „Global Challenges“.

Von den ursprünglichen Trockenwäldern der Savanne sind nur kleine Reste, besonders entlang der Flussläufe, erhalten. Auf den vielen kleinen Seitenvulkanen, besonders aber am Chala-See, einem über hundert Meter tiefen Kratersee am Südostfuß des Kilimanjaro, gibt es noch eine reichhaltige Savannenvegetation. Auf den Steilufern dieses klaren, tiefblauen Sees, der sein Wasser unterirdisch vom Kilimanjaro erhält, gedeiht ein auffällig gegliederter Trockenwald mit sukkulenten, hartlaubigen und laubwerfenden Bäumen und Sträuchern (*Euphorbia*-, *Aloe*- und *Commiphora*-Arten) an den trockenen Oberhängen und immergrünen Laubbäumen (v. a. *Ficus*- und *Trichilia*-Arten) in Wassernähe. Die mittlere Jahrestemperatur liegt am Oberhang bei 22,5 °C und die mittlere

UMSO DEUTLICHER ZEICHNET SICH ANGESICHTS DER FORTSCHREITENDEN WALDVERWÜSTUNG DIE DÜSTERE ZUKUNFT DIESER WALDRELIKTE AB.



Kampferbäume prägen den Bergwald bis in eine Höhe von 2.700 m auf der feuchten Südseite des Kilimanjaro.

monatliche Luftfeuchtigkeit erreicht nur im April und Mai 80 %. Diese Klimabedingungen führen zu einer ausgeprägten Saisonalität dieser Wälder mit einer weitgehenden Wachstumsruhe während der Trockenzeit.

Die trockene Savannenzone, die heutzutage weitgehend mit Mais- und Sonnenblumenfeldern bedeckt ist, erstreckt sich um den gesamten Berg. Hangaufwärts jedoch verstärken sich die klimatischen Gegensätze zwischen der trockeneren Nordseite und der sehr feuchten Süd- und Ostseite. Hier siedeln seit vielen Jahrhunderten die Chagga, die das Gebiet zwischen etwa 1.100 und 1.700 Metern in Form einer Baumgartenkultur bewirtschaften, indem sie Baum-, Strauch- und Krautschicht gleichermaßen nutzen. Weite Bereiche dieser submontanen Kulturlandstufe gleichen daher einem lockeren Waldland mit dichtem Bananen- und Kaffeeunterwuchs. Das erklärt, warum sich hier zahlreiche Waldarten halten konnten, die den größten Anteil der über 500 in diesen Baumgärten („homegarden“) nachgewiesenen Pflanzenarten ausmachen. Wichtige Rückzugsgebiete für Flora und Fauna, die den hohen Artenreichtum in



PD Dr. Andreas Hemp vom Lehrstuhl für Pflanzensystematik leitet zusammen mit Prof. Dr. Ingolf Steffan-Dewenter (Würzburg) und Prof. Dr. Markus Fischer (Bern) die neue Forschergruppe KiLi.



Mit seiner enormen Höhenspanne von 5.000 Metern vereint der in Tansania gelegene Kilimanjaro äußerst gegensätzliche Lebensräume über kurze Distanzen.

diesen dicht besiedelten Gebieten weiter steigern, sind tief eingeschnittene Flusstäler. An einigen besonders unzugänglichen Stellen haben sich hier interessante Waldreste erhalten. Beim Gang durch diese feuchten Steilhangwälder wähnt man sich ins Reich der Riesen versetzt: teilweise über 60 Meter ragen einige der Baumgiganten (besonders *Entandrophragma excelsum*) in die Höhe. In Struktur und Artenzusammensetzung unterscheiden sich diese submontanen Wälder völlig von den nur wenige 100 Meter höher gelegenen montanen Wäldern. Sie gleichen eher denen der sogenannten Eastern Arc Mountains, einer Kette alten Grundgebirges in Tansania und Kenia, zu denen z. B. die Usambara-Berge zählen. Neben noch unbeschriebenen Pflanzenarten gedeihen hier zahlreiche Arten, die bislang als endemisch für die Eastern Arc Mountains galten. Die viel beschriebene pflanzengeographische Sonderstellung dieser Berge, insbesondere ihr Endemitenreichtum, scheint somit weniger mit ihrem hohen Alter und einer angenommenen langen ökoklimatischen Stabilität als vielmehr mit der Tatsache zusammenzuhängen, dass derartige submontane Waldtypen dort noch in größerem Umfang existieren und bislang noch nicht vollständig vernichtet sind. Die heute nur mehr kläglich

Waldreste in den Schluchten am Unterhang des Kilimanjaro stellen daher ein unersetzliches Archiv für die Waldgeschichte Ostafrikas dar. Im Angesicht dieser üppigen tropischen Urwälder kann man nur erahnen, wie weite Teile des Kilimanjaro vor der intensiveren Besiedlung durch den Menschen vor rund 2.000 Jahren ausgesehen haben. Umso deutlicher zeichnet sich angesichts der fortschreitenden Waldverwüstung die düstere Zukunft dieser Waldrelikte ab.

DER AUS ÖKOLOGISCHER HINSICHT WICHTIGSTE LEBENSRAUM AM KILIMANJARO IST DER MONTANE WALDGÜRTEL

Über 1.200 Pflanzenarten, darunter allein über 100 Farne, machen den montanen Waldgürtel zur artenreichsten Höhenstufe des Berges. Erstmals konnten in tropischen Bergwäldern alle Gefäßpflanzenschichten bei der Vegetationsaufnahme mit einbezogen werden. Dies erlaubt Aussagen über die ökologische Bedeutung verschiedener

WEBLINK

- www.bayceer.uni-bayreuth.de/kilimanjaro

Artengruppen und Vegetationsschichten in diesem komplexen, vielschichtigen Lebensraum. So tragen Farnpflanzen in den Wäldern des feuchten Südhangs rund ein Fünftel zur gesamten Blattbiomasse bei, und stellenweise gedeihen mehr Arten in der Epiphytenschicht als am Boden. Jeder Ast und jeder Stamm ist hier dick mit den schwellenden Polstern von Hautfarnen und anderen Epiphyten bedeckt, Ausdruck der enormen Feuchtigkeit in der mittleren Waldstufe des Kilimanjaro. 3.000-4.000 Millimeter Regen fallen hier in einigen Gebieten, weit mehr als auf den anderen hohen Vulkanen Ostafrikas und die relative Luftfeuchtigkeit liegt in diesen immergrünen Wäldern fast durchgehend bei 100 %. Daher erfährt hier auch der eindrucksvolle, an knorrige Eichen erinnernde Kampferbaum *Ocotea usambarensis*, ein Lorbeergewächs, seine optimale Entfaltung mit Wuchshöhen von über 40 und Stammdurchmessern von bis zu 5 Metern. Ebenfalls weit verbreitet ist der Feuchtigkeit liebende, Pioniercharakter zeigende 10-15 Meter hohe Baumfarn *Cyathea manniana*. Er gelangt besonders auf Störstellen zur Vorherrschaft, wo er eine eigene Vorwaldgesellschaft aufbaut, die die Waldregeneration einleitet.

Auf der Nordseite dagegen fehlen derartig feuchtigkeitsliebende Arten. Stattdessen bilden hier Afrikanischer Ölbaum (*Olea africana*), East African Pillarwood (*Cassipourea malosana*) und insbesondere der bis zu 40 Meter hoch werdende ostafrikanische Wacholder *Juniperus procera* eine völlig anders strukturierte Waldgesellschaft.

Das Fehlen eines in der Regel recht monotonen Bambusgürtels, der für viele andere Berge Ostafrikas so typisch ist, wirkt sich auf die Diversität des Kilimanjaro positiv aus, da in der oberen montanen Stufe stattdessen artenreiche Nebelwälder mit Steineibe (*Podocarpus latifolius*) und den baumförmigen Rosengewächsen *Hagenia abyssinica* und *Prunus africana* gedeihen. Der fehlende Bambusgürtel des Kilimanjaro stellt eines der großen biogeographischen Rätsel Ostafrikas dar und wurde vielfach mit der vermeintlichen Trockenheit des Kilimanjaro begründet. Dies ist ebenso falsch wie die Vermutung, es könne an Bodeneigenschaften oder Ausbreitungsbarrieren liegen. Vielmehr scheint der Grund in einem vielschichtigen Zusammenspiel abiotischer Faktoren klimatischer und geomorphologischer Natur sowie biotischer Einflussgrößen (Auswirkung von Großwild und Menschen) zu liegen: Bambus (*Sinarundianria alpina*) benötigt zum Wachstum eine Mindestmenge an Niederschlag und wird als lichtliebende Pionierart durch

Elefanten und Büffel ausgebreitet und gefördert. Auf der Nordseite des Berges kommen diese Tiere in großer Zahl vor; jedoch ist es dort für die Ausbildung eines Bambusgürtels zu trocken. Auf der ausreichend feuchten Südseite dagegen fehlt Großwild, das durch gewaltige Schluchten im Südwesten und Nordosten, die von der Savanne bis in die alpine Zone reichen, an der Zuwanderung gehindert wird. Eine Einwanderung von unten ist durch die dichte menschliche Besiedlung ebenso unmöglich. Der fehlende Bambusgürtel am Kilimanjaro stellt demnach ein interessantes Beispiel dafür dar, wie der Einfluss von Mensch und Tier die Vegetation großer Landstriche Afrikas schon seit langem verändert hat.

Etwa 3.000 Meter über dem Meeresspiegel ändert sich das Waldbild drastisch: die Steineibenwälder gehen abrupt in reine *Erica excelsa*-Wälder über – eine Folge von Feuern. Feuer spielen in der subalpinen Höhenstufe des Kilimanjaro, wie auch auf den anderen hohen Bergen Afrikas, eine große ökologische Rolle. Während einer Periode trockener Jahre mit wiederholten Feuern breiten sich die *Erica*-Wälder nach unten aus, da *Erica excelsa* als lichtbedürftige und zum Stockausschlag befähigte Nebenbaumart durch Brände gefördert wird. Feuchte Perioden führen dagegen zu einer Regeneration der *Podocarpus*-Wälder. Mit steigendem Anteil von *Erica excelsa* steigt das Feuerrisiko, da *Erica* auch in frischem Zustand leicht brennt. Dies verschlechtert die Chancen für eine Regeneration der *Podocarpus*-Wälder. Die Folge sind kontinuierlich wiederkehrende Feuer, die die *Erica*-Wälder zunächst in niedrige Buschländer umwandeln, die schließlich bei gleichbleibender Feuerintensität zu



Die baumförmige sukkulente (dickfleischige) Wolfsmilch *Euphorbia quinquecostata* im Trockenwald am Chala-See.

Höchstgelegener Wald Afrikas: Subalpiner *Erica trimera*-Wald an der Baumgrenze bei 4000 Metern.





Verwandt mit unserer Mistel: der epiphytische Schmarotzer *Englerina woodfordioides* im Kampferwald des Kilimanjaro.

offenen *Helichrysum*-Heiden – der charakteristischen Vegetation in Höhen über 4.000 Metern – degradiert werden. Noch kann man an der oberen Baumgrenze, also bei etwa 4.000 Metern, auf Reste ehemals ausgedehnter *Erica*-Wälder treffen, die die derzeit höchstgelegenen Bergwälder Afrikas darstellen.

Die Erforschung des Kilimanjaro ist nicht nur eine wissenschaftliche Herausforderung, sondern auch umweltpolitisch ein Muss, um Anhaltspunkte und Grundlagen für eine nachhaltige Nutzung sowie einen wirksamen Schutz dieses empfindlichen Bergökosystems zu schaffen. Vor rund 100 Jahren lebten etwa 50.000 Menschen an den Hängen des Kilimanjaro, heute sind es über eine Million. Diese Zahlen verdeutlichen den Nutzungsdruck, dem insbesondere der Bergwald ausgesetzt ist. Vor diesem Hintergrund erfolgte zusammen mit der Umweltorganisation der Vereinten Nationen (UNEP) eine Waldschadenskartierung aus der Luft.

Während der Befliegung wurden fast 8.000 frisch gefällte Bäume

gezählt, obwohl im natürlichen Bergwald das Fällen von Bäumen verboten ist. Dennoch stellt die illegale Holznutzung zusammen mit Waldweide und dem Sammeln von Viehfutter die größte Gefährdung der unteren Bereiche des Bergwaldes dar. Hinzu kommt eine andere Gefahr, die vor allem die oberen Waldgebiete betrifft: die immer verheerender werdenden Feuer. Durch Satellitenbildauswertungen lässt sich nachweisen, dass seit 1976 150 km² hochmontaner und subalpiner Wälder ein Raub der Flammen wurden. In den vergangenen 100 Jahren mögen es insgesamt über 300 km² sein. In diesem Zeitraum hat der Kilimanjaro zusammen mit den Verlusten durch Rodungen rund die Hälfte seiner Waldfläche verloren. Neben den bekannten stabilisierenden Auswirkungen der Bergwälder auf Wasserabfluss und Boden kommt in den höheren Lagen noch ein anderer Faktor hinzu: die Fähigkeit zum sogenannten Auskämmen von Nebelwasser und damit die Ausschöpfung einer zusätzlichen Wasserquelle. Der jährliche Verlust in der Wasserbilanz durch den Wegfall dieser 150 km² natürlicher Nebelfänger in den Hochlagen des Berges beläuft sich auf rund 20 Millionen Tonnen Wasser. Diese Menge entspricht etwa dem jährlichen Wasserbedarf der eine Million Bewohner am Kilimanjaro, die mit ihrem intensiven Bewässerungssystem völlig vom Wasser aus dem Wald abhängen.

Die Mehrzahl der Feuer wird durch menschliche Unachtsamkeit verursacht. Doch ihre Auswirkungen wären längst nicht so verheerend ohne die klimatischen Veränderungen, die auch zum Abschmelzen der Gletscher führen. In den letzten 100 Jahren haben die Jahresniederschläge am Kilimanjaro um über 30% nachgelassen und seit 1976 sind die Temperaturen deutlich angestiegen. Entsprechend haben die Gletscher seit ihrer ersten detaillierten Kartierung im Jahr 1912 über 80 %

FEUER SPIELEN IN DER SUBALPINEN HÖHENSTUFE DES KILIMANJARO EINE GROSSE ÖKOLOGISCHE ROLLE.

Vor 10 Jahren abgebrannter *Erica*-Wald. Bartflechten der Gattung *Usnea* umhüllen abgestorbene Äste und Stämme.



ihrer Fläche verloren, und Glaziologen rechnen mit ihrem völligen Verschwinden in den nächsten Jahrzehnten. Die Auswirkungen der abschmelzenden Gletscher auf die Wasserbilanz des Bergökosystems sind jedoch gering: weniger als eine Million Tonnen Schmelzwasser ergießen sich pro Jahr in die Flüsse des Berges. Verglichen mit den über 1.000 km² Bergwald, in denen über 90 % der Niederschläge fallen, ist der Verlust der 2,6 km² großen Gletscher hydrologisch gesehen fast völlig zu vernachlässigen.

Während sich das Abschmelzen der Gletscher nicht aufhalten lassen wird, kann gegen die Vernichtung der Wälder etwas unternommen werden. In Reaktion auf die alarmierenden Ergebnisse der Waldschadenskartierung wurde der gesamte Waldgürtel in den Nationalpark einbezogen. Durch die bessere personelle und finanzielle Ausstattung dieser Institution im Vergleich zur Forstbehörde, der der Wald zuvor unterstand, bestehen nun effektivere Möglichkeiten zur Überwachung der Waldgebiete und zur Bekämpfung der Feuer. Überdies könnte ein rund 90 km² großer, etwa ein Kilometer breiter Waldstreifen am unteren Rand des Bergwaldes wesentlich effektiver zur Produktion von Bauholz genutzt werden, um so den Druck vom Bergwald zu nehmen.

Die beschriebenen Untersuchungen zeigen, dass sich mit vegetationskundlichen Forschungsansätzen auch in tropischen Lebensräumen ganz verschiedenartige ökologische und naturschutzfachliche Fragestellungen effizient bearbeiten lassen. Insbesondere die angefertigte Vegetationskarte des Kilimanjaro erweist sich als wichtige Grundlage, um Landschaftsveränderungen zu überwachen und das Management des Nationalparks zu unterstützen.

Die Auswirkungen der teils durch Klimawandel, teils durch zunehmenden Nutzungsdruck verursachten Veränderungen am Kilimanjaro zu untersuchen und ein tieferes Verständnis der komplexen ökologischen Zusammenhänge zu erlangen, ist das Ziel der im letzten Jahr gebildeten DFG-Forschergruppe KiLi (Kilimanjaro ecosystems under global change: Linking biodiversity, biotic interactions and biogeochemical ecosystem processes), an der mehrere Arbeitsgruppen der Universität Bayreuth beteiligt sind. Der Kilimanjaro bietet aufgrund seiner herausragenden Vielfalt an Lebensräumen, Klimazonen und Landnutzungsformen, aber auch seiner schnell wachsenden Probleme, eine einzigartige Voraussetzung für dieses Forschungsvorhaben.



In den hochmontanen *Podocarpus*-Wäldern spielt Nebelwassereintrag eine wichtige Rolle; Stämme und Äste sind von dicken Moosbällen bepackt.



Früchte der Steineibe (*Podocarpus latifolius*), die zu den Nadelhölzern zählt.



Savannen-Trockenwälder am Chala, einem tiefen Kratersee am Südostfuß des Kilimanjaro mit deutlicher Zonierung: immergrüne Bäume am Seeufer werden nach oben hin durch sukkulente oder laufwerfende Arten abgelöst



■ BETTINA ENGELBRECHT

Tropische Wälder und Globaler Wandel

FORSCHUNG ÜBER TROCKENHEIT IM REGENWALD

■ Ein Bewässerungsexperiment zur Bestimmung der Trockenresistenz von Baumarten, die in den Wäldern des Kongobeckens vorkommen, wurde in der Nähe von Poine Noire in der Republik Kongo durchgeführt.

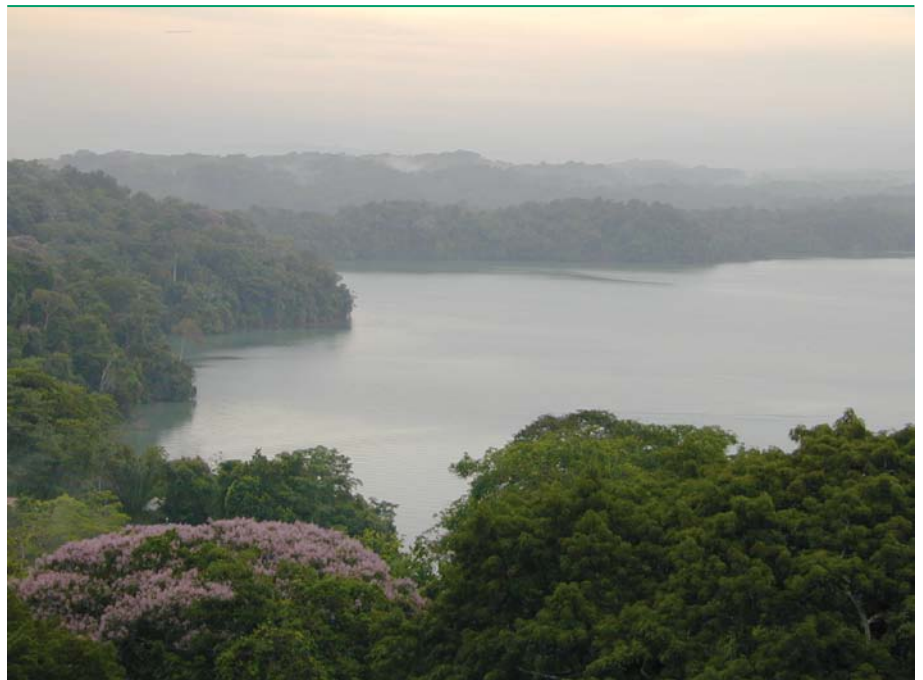
Von den Wäldern unserer Erde liegen mehr als die Hälfte in den Tropen. Tropische Wälder bedecken 23 Millionen Quadratkilometer, das entspricht 65mal der Fläche von Deutschland. Die größten zusammenhängenden tropischen Waldgebiete liegen in Amazonien, dem Kongobecken und Südostasien.

Tropische Wälder sind berühmt für ihre einzigartige Biodiversität. Etwa 43.000 Baumarten werden in tropischen Wäldern geschätzt – in Europa sind es nur 124. Ein eindrucksvoller Vergleich ist auch der folgende: in einem nur einen halben Quadratkilometer großen Regenwaldgebiet in Borneo wurden 1.175 Baumarten identifiziert, fast genau dieselbe Zahl an Arten, die in allen Wäldern der gemäßigten Zone zusammen vorkommt. Auch die tierische Diversität ist überwältigend: Etwa 200.000 Wirbeltierarten und (im wahrsten Sinne des Wortes) Millionen von Insektenarten leben in tropischen Wäldern. Insgesamt wird geschätzt, dass 80 % aller landlebenden Arten in tropischen Wäldern vorkommen. Trotz jahrhundertelanger Forschung bleiben die meisten noch immer unbeschrieben, und die grundlegende Biologie und Ökologie der Arten ist bis auf wenige Ausnahmen völlig unerforscht – es bleibt ein weites Arbeitsfeld.

Neben ihrer beeindruckenden Diversität sind tropische Wälder im globalen Kohlenstoffkreislauf von herausragender Bedeutung. In tropischen Wäldern – in den Bäumen und den darunterliegenden Böden – ist mehr Kohlenstoff gebunden, als in der Atmosphäre als CO₂ vorliegt, und jährlich werden 1,3 Milliarden Tonnen Kohlenstoff zusätzlich fixiert. Für die Prognose von zukünftigen CO₂-Änderungen in der Atmosphäre und dem

damit verbundenen Klimawandel spielen tropische Wälder daher eine zentrale Rolle.

Die herausragende Bedeutung tropischer Wälder unter den Wäldern weltweit wurde bei einer in Cambridge veranstalteten internationalen Tagung zu ‚Wäldern und Globalem Wandel‘ Ende März dieses Jahres unterstrichen: Mehr als die Hälfte der Vorträge befasste sich mit tropischen Wäldern – wie sie vom Globalen Wandel beeinflusst werden, und wie sie selber den Wandel durch Rückkopplungen beeinflussen.



Ein halbimmergrüner Regenwald in Panama in der Regenzeit.

AUTORIN



Prof. Dr. Bettina Engelbrecht

leitet seit 2009 die **Arbeitsgruppe Ökologie und Ökophysiologie tropischer Pflanzen**. In ihrer Forschung verknüpft sie Ökophysiologie, Populationsökologie und Biogeographie tropischer Pflanzen, untersucht die Konsequenzen von Klimawandel und Landnutzung für tropische Wälder und die Bedeutung funktioneller Pflanzencharakteristika für die Verbreitung von Arten und die Zusammensetzung von Pflanzengemeinschaften.



In der Trockenzeit werfen viele Bäume ihre Blätter ab - daher die Bezeichnung ‚halbbimmergrüner‘ Regenwald.

Trotz ihrer zentralen Bedeutung für die Biodiversität und den globalen Kohlenstoffhaushalt sind tropische Wälder extrem gefährdet: 14.000 Quadratkilometer Regenwald – die doppelte Fläche von Oberfranken – werden jedes Jahr zerstört, davon 60 % Primärwälder. Allein zwischen 1990 und 2005 wurden 8,3 % der Regenwälder abgeholzt. Es wird geschätzt, dass damit täglich 100 Arten unwiederbringlich verloren gehen. Zusätzlich sind tropische Wälder stark durch den globalen Klimawandel gefährdet. Wichtiger als die globale Erwärmung und die Erhöhung der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen sind dabei Änderungen der Niederschläge. Für weite Teile der Tropen werden niedrigere Jahresniederschläge und längere und intensivere Trockenperioden prognostiziert.

Die Arbeitsgruppe von Professor Engelbrecht am Lehrstuhl für Pflanzenökologie der Universität Bayreuth fokussiert ihre Arbeit daher darauf, die Rolle von Trockenperioden für tropische Wälder in der Gegenwart zu verstehen und daraus Prognosen für die Zukunft dieser Wälder unter Klima- und Landnutzungswandel abzuleiten. Nur wer versteht, welche Faktoren die Verbreitung der vielen Baumarten in tropischen Wäldern bestimmen, kann vorhersagen, welche Arten zukünftig besonders gefährdet sein werden, lokal oder sogar global auszusterben. Dies wird die Diversität verringern und kann sich auf die Kohlenstoffspeicherung der Wälder auswirken. Auch die Entwicklung von ef-

Tropische Wälder sind extrem divers: Hunderte von Arten – Bäume, Sträucher, Lianen, Kräuter und Aufsitzerpflanzen – können in einem einzigen Hektar vorkommen.

fektiven Schutz- und Waldnutzungsstrategien, mit denen man die negativen Auswirkungen des Globalen Wandels zu minimieren versucht, sind auf solche Untersuchungen angewiesen.

Während wir mit tropischen Wäldern gemeinhin extrem feuchte, heiße Regenwälder assoziieren, sind die meisten tropischen Wälder einer oder sogar zwei Trockenzeiten im Jahr ausgesetzt. Dabei variieren die Niederschläge sowohl räumlich – lokal, regional und kontinental, als auch zeitlich – zwischen der Trocken- und Regenzeit, zwischen verschiedenen Jahren, und in mehrjährigen Zyklen im Zusammenhang mit wechselnder Meeresströmungen, sogenannten ‚El Niño‘-Phänomenen. Die räumliche und zeitliche Variabilität der Niederschläge wird – in Verbindung mit Experimenten – genutzt, um die Folgen zukünftiger veränderter Niederschläge auf tropische Wälder zu untersuchen.

Zusammen mit Kollegen und Kolleginnen aus den USA, Frankreich und England untersucht die Arbeitsgruppe die Konsequenzen der Niederschlagsbedingungen für die Verbreitungsmuster tropischer Baumarten, und vergleicht sie mit weiteren Faktoren, wie Nährstoffen und Pflanzenfressern, die die Verbreitung beeinflussen können. Zwei Untersuchungsgebiete stehen dabei im Vordergrund: Der **Isthmus von Panama in Zentralamerika** stellt mit einem starken Niederschlagsgradienten ein ideales Modellsystem dar: der jährliche Regen verdoppelt sich annähernd über eine Distanz von



nur 65 Kilometern von 1.600 auf 3.100 Millimeter (zum Vergleich: der mittlere Jahresniederschlag in Bayreuth beträgt nur 750 Millimeter). Diese Wälder werden in Zusammenarbeit mit dem Smithsonian Tropical Research Institute in Panama untersucht. Ein weiteres Untersuchungsgebiet sind die afrikanischen **Wälder des Kongobeckens**, des zweitgrößten zusammenhängenden tropischen Waldgebietes weltweit. Die Konsequenzen von Klima- und Landnutzungswandel in diesem Gebiet werden im Rahmen des EU-geförderten Projekts CoForChange bearbeitet. Für die weit über tausend Baumarten in den beiden Untersuchungsgebieten sind bisher erschreckend wenige Informationen verfügbar, ganz im Gegensatz zu unseren heimischen Arten, für die aus der Forstwirtschaft jahrhundertlange Erfahrungen vorliegen.

In beiden Gebieten werden daher Bewässerungsexperimente durchgeführt, so dass das Verhalten von Baumkeimlingen unter trockenen und feuchten Bedingungen direkt verglichen und so ihre Trockenresistenz quantitativ bestimmt werden kann. Arten, deren Keimlinge unter trockenen Bedingungen eine deutlich höhere Sterberate haben und weniger wachsen, sind dabei trockensensitiv, während andere keinerlei Unterschiede zwischen trockenen und feuchten Bedingungen zeigen, also

TROPISCHE WÄLDER BEDECKEN WELTWEIT ETWA 65MAL DIE FLÄCHE VON DEUTSCHLAND.

trockenresistent sind. Die Ergebnisse können dann mit den beobachteten Verbreitungsmustern der Baumarten verglichen werden, um zu evaluieren, ob Niederschläge die Verbreitungsmuster formen oder nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Die enorme Diversität der tropischen Wälder stellt für solche Untersuchungen natürlich eine besondere Herausforderung dar,

und so kommt es, dass die Bayreuther Arbeitsgruppe erstmals eindeutig zeigen konnte, dass Niederschläge tatsächlich eine ganz zentrale Rolle für die Verbreitung

von Baumarten in den Neuwelttropen spielen. Abnehmende Niederschläge werden daher in diesem Gebiet zu deutlichen Änderungen der Verbreitungsmuster von Baumarten und der Zusammensetzung und Diversität von Wäldern führen, wobei besonders trockensensitive Arten von lokalem oder sogar globalem Aussterben bedroht sind.

Im Gegensatz dazu hat sich gezeigt, dass Baumarten im Kongobecken in Zentralafrika sehr gut an Trockenheit angepasst sind und Nährstoffe im Boden einen weit größeren Effekt auf die Baumarten haben als die Niederschläge. Im Kongobecken können wir daher erwarten, dass Niederschlagsänderungen nur geringe direkte Auswirkungen für die Wälder haben, und stattdessen Änderungen der Landnutzung von größerer Bedeutung sein werden.

Laufende Studien der Arbeitsgruppe konzentrieren sich darauf, mit Hilfe der bisherigen Ergebnisse konkrete Szenarien für die Veränderungen der Wälder in Panama und im Kongobecken mit dem Globalen Wandel zu erstellen, und Empfehlungen für Strategien für ihren Schutz und ihre langfristige Nutzung zu erarbeiten. Daneben zeigen die Ergebnisse deutlich, dass der Niederschlag natürlich nicht der einzige Faktor ist, der diese hochdiversen Wälder formt. Das komplexe Zusammenspiel von Niederschlägen und anderen Faktoren wie Nährstoffen und Temperatur, Tieren - wie Bestäubern und Pflanzenfressern - und der Landnutzung durch den Menschen stehen daher im Zentrum weiterer Forschungsarbeiten, um die Prognosen zu optimieren.



In der Trockenzeit welken die Keimlinge von trockensensitiven Baumarten und sterben schliesslich ab.



WEBLINKS

- AG Ökologie und Ökophysiologie tropischer Pflanzen: www.bayceer.uni-bayreuth.de/tropecol
- Smithsonian Tropical Research Institute in Panama: www.stri.si.edu
- EU-Projekts CoForChange: www.coforchange.eu

ERWIN BECK
SIMONE STROBL

Waldforschung in Äthiopien

NATURWALDVERJÜNGUNG
UNTER EXOTEN

Abb. 2: Blick in einen Experimentierplot im Naturwald. BayCEER unterstützt die Arbeiten durch Bereitstellung von Gerüstmaterial. So können Messungen im besonnten Teil der Baumkronen durchgeführt werden. Links am Stamm eines *Podocarpus* ein Messgerät zur Feststellung des Wasserflusses durch den Stamm. Damit kann man den täglichen Wasserverbrauch eines Baums berechnen.

Seit 2001 forschen deutsche Bodenkundler, Dendrologen, Pflanzenphysiologen und Forstwissenschaftler zusammen mit Kollegen aus den Biowissenschaften der Universität von Addis Abeba und des Forestry College in Wondogenet in einem der wenigen, noch verbliebenen zusammenhängenden Waldgebiete Südostäthiopiens, dem Sheshamene-Munessa Wald (23.000 Hektar) am Ostabhang des ostafrikanischen Grabenbruchs. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft, die das Verbundprojekt unterstützt, hat Mittel für den Bau einer Forschungsstation auf 2.280 Metern Meereshöhe zur Verfügung gestellt, die weitab von Wasser und Strom auf einer Waldlichtung im Jahre 2004 erbaut und von der Universität Addis Abeba eingerichtet wurde. Die Station hat 18 Schlafplätze, einen Tagungsraum, ein Labor mit Bibliothek, Küche und sanitäre Einrichtungen, die mit gesammeltem Regenwasser betrieben werden. Der steile, unbefestigte Weg zum nächsten Ort ist in der Regenzeit selbst für Fahrzeuge mit Vierradantrieb und Differentialsperre nur schwer zu bewältigen.

Sieht man von eventuellen Versorgungsengpässen ab, so ist die Station für Forschungszwecke ideal gelegen, am Schnittpunkt von vier verschiedenen Waldtypen (Abb. 1): dem natürlichen, vorwiegend immergrünen *Podocarpus*-Bergwald, und dreier Forste, nämlich einer *Eucalyptus*-Plantage (*E. globulus* und *saligna*), einem Bestand der langnadeligen *Pinus patula* und einer Zypressenpflanzung (*Cupressus lusitanica*). Die Forste, die mittlerweile 30 % des gesamten Waldgebiets ausmachen, werden von dem unter der Provinzregierung stehenden Sheshamene Wood Enterprise mit einem stationären und vier mobilen Sägewerken aus der Väterzeit bewirtschaftet. Die drei Forsttypen halten einem Vergleich mit einem deutschen Wirtschaftsforst nicht Stand, äthiopische Forstwirtschaft baut auf anderen Erfahrungen und Betriebsweisen auf. Andererseits ist der von bis zu 50 Meter hohen Steineiben (*Podocarpus falcatus*), Ölbäumen (*Olea europaea* in verschiedenen Unterarten), dem afrikanischen Kirschbaum (*Prunus africana*) und einigen weiteren immergrünen tropischen Baumriesen gekrönte Naturwald weniger urwaldähnlich (Abb. 2), und – sieht man einmal von Dornengerank (Brombeeren) und anderem Stachelzeug (z. B. *Maytenus*) ab – durch Waldweide stark ausgeräumt, denn die Gegend ist für ein Waldgebiet dicht, zu dicht besiedelt. So ziehen an den Markttagen mit Knüppelholz beladene Eselskarawanen hinunter in den Nachbarort Goljotha, wo Brennholz nach wie vor gefragt ist.

Was und warum forscht man in diesen Wäldern? Der Titel des Forschungsprojekts sagt es: **Functional Ecology and Sustainable Management of the Munessa Forest, Ethiopia**. Es geht also um vergleichende Ökosystemforschung in den vier Waldtypen und, darauf aufbauend, um nachhaltige Waldbewirtschaftung. Die Arbeiten werden in enger Kooperation der deutschen und äthiopischen Wissenschaftler durchgeführt, die ihrerseits PhD-, MSc- und BSc-Kandidaten einbringen, ebenso wie von deutscher Seite Zuarbeit im Rahmen von Diplom- und Doktorarbeiten geleistet wird. In der Anfangsphase arbeiteten auch noch Biogeographen und Mykorrhizaforscher mit. Dass man mit dem von der Universität Bayreuth ausgehenden Projekt nach Äthiopien ging, hat wie so oft in der Wissenschaft persönliche Gründe. Prof. Fetene, mittlerweile Vizepräsident der Addis Ababa University war als Postdoc längere Zeit am Lehrstuhl für Pflanzenphysiologie der UBT und hat dabei auch die Kollegen in der Geoökologie kennengelernt. Daraus entwickelten sich mehrere Kooperationsprojekte in Äthiopien, wovon das „Munessa-Projekt“ das größte ist. Ebenso gut hätte man entsprechende Bergwälder in anderen ostafrikanischen Ländern studieren können, was wiederum zeigt, dass die erzielten Ergebnisse – *mutatis mutandis* – nicht nur regionale Bedeutung haben. Hier soll ein Blick auf ein pflanzenphysiologisches Projekt gerichtet werden, das natürlich im Datenaustausch mit allen anderen Projekten steht. Dabei geht es um die Naturverjüngung in den vier Waldtypen.

Während sich der *Podocarpus*-Wald, der Zypressen- und der *Eucalyptus*-Forst von selbst verjüngen, ist dies bei den Kiefern trotz reichlicher Zapfenbildung nicht der Fall. Interessanterweise findet man aber in allen vier Waldtypen Jungwuchs der einheimischen wertvollen Steineibe (*Podocarpus*), im Zypressenforst allerdings nur am lichtdurchdrungenen Waldrand, da die Bäume im Inneren dieses Forstes viel zu dicht stehen und die Lichtstärke für das Aufkommen einer Bodenvegetation nicht ausreicht. Die Dichte der *Podocarpus* Jungpflanzen ist in den beiden anderen Plantagen größer als im Naturwald, obwohl die Samen von dort oder von vereinzelt stehenden Überhältern („mother-trees“) her durch Tiere eingetragen werden müssen. Erstaunlich ist, dass die jungen *Podocarpus*-Bäume unter dem Kronendach der exotischen Forstbäume nicht nur zahlreicher sind, sondern offensichtlich besser als im Naturwald gedeihen. Dieser den Erwartungen widersprechende sog. Nurse-Tree-Ef-



Erwin Beck ist Emeritusprofessor am Lehrstuhl für Pflanzenphysiologie der UBT



Simone Strobl ist Doktorandin im Munessa-Projekt am Lehrstuhl Pflanzenphysiologie

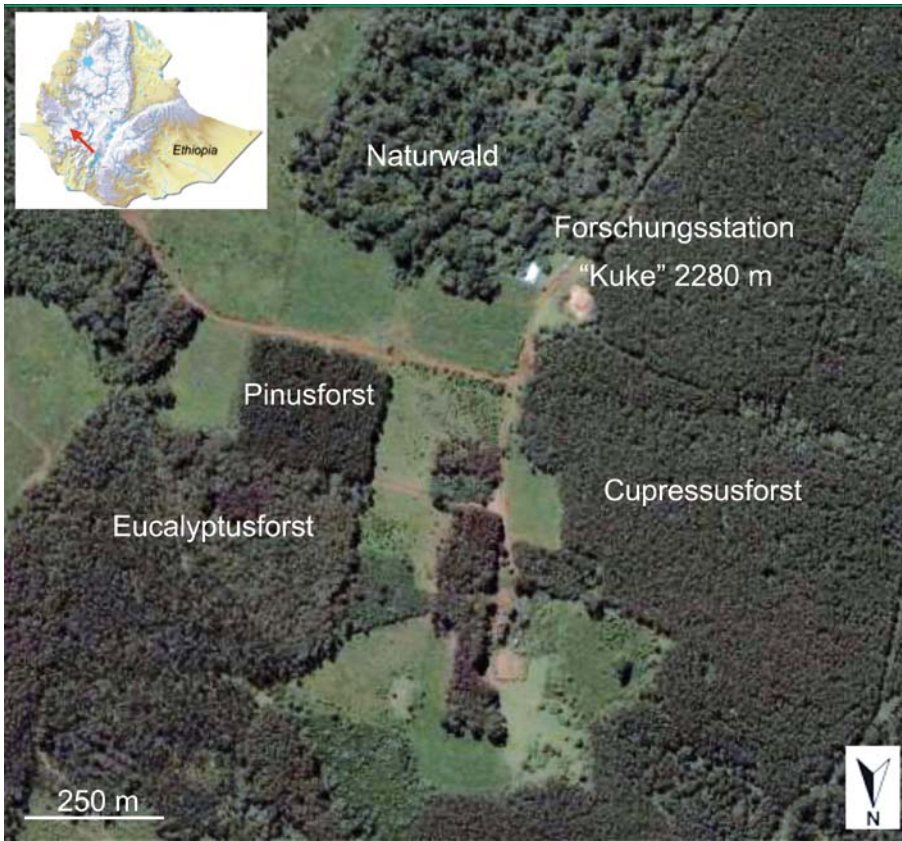


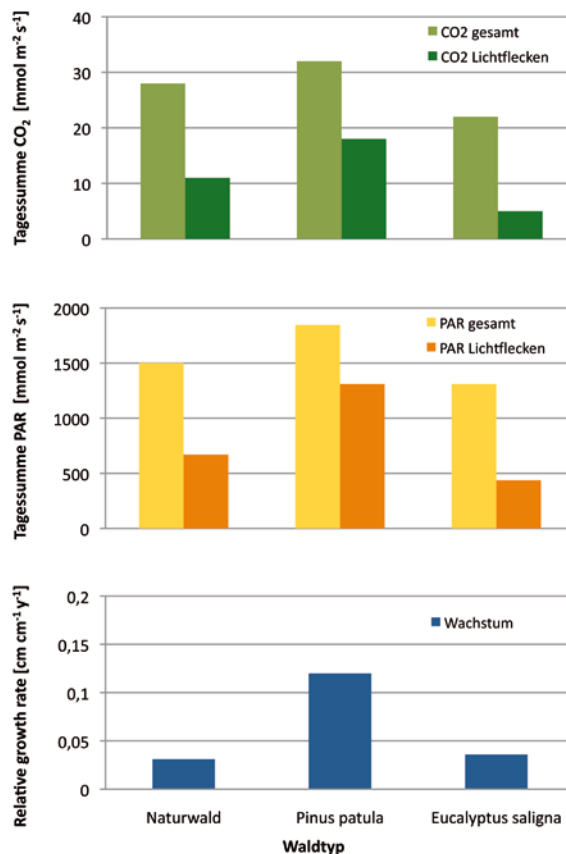
Abb. 1: Die Lage des Forschungsgebiets (roter Pfeil) am Ostrand des ostafrikanischen Grabens und Satellitenbild des Munessa-Waldes mit den verschiedenen Forstplantagen und dem Naturwald (Bild geändert nach Google Earth 2007)

Abb. 3: Einige Messergebnisse zum Kronendach-Effekt in den drei untersuchten Waldtypen.

A: Das durchschnittliche Lichtklima unter dem Kronendach des Naturwaldes, der Kiefern- und der *Eucalyptus*-Plantage. Man beachte die unterschiedlichen Anteile der Lichtflecken an den Tagessummen der Lichtmenge. PAR bezeichnet die photosynthetisch wirksame Strahlung (Photosynthetically Active Radiation).

B: Der tägliche Kohlenstoffgewinn durch Photosynthese von *Podocarpus* Jungpflanzen unter den drei Kronendächern. Ein Vergleich der Lichtmengen und der daraus resultierenden CO₂-Aufnahme zeigt, dass die Lichtflecken photosynthetisch weniger effektiv sind als die diffuse indirekte Strahlung.

C: Die jährlichen Raten des Stammthickenwachstums. Zur Normierung bezieht man den Durchmesserzuwachs auf den zu Beginn des Messjahres vorhandenen Stammdurchmesser.



fect (besser Shelter-Tree-Effekt: Kronendacheffekt) wurde kürzlich in einer Dissertation aufgeklärt. Er beruht hauptsächlich auf den Unterschieden des Lichtklimas unter den verschiedenen dichten und strukturierten Kronendächern.

Während im Naturwald im Jahresdurchschnitt höchstens 1 % der (photosynthetisch wirksamen) auftreffenden Lichtintensität unter dem Kronendach gemessen wurde, waren es im Kieferforst immerhin 3 % und unter *Eucalyptus* fast 4 %. Das Licht im Schatten des Kronendachs setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, der diffusen Helligkeit und der durch Lücken des Kronendachs zeitweise einfallenden direkten Strahlung, den sog. Licht- oder Sonnenflecken. Deren Helligkeit beträgt ein Vielfaches des diffusen Lichts. Die photosynthetische Wirksamkeit dieses im Tagesverlauf stark wechselnden Lichtklimas hängt besonders von der Intensität der diffusen Strahlung und der zeitlichen Verteilung und Dauer der Lichtflecken ab. Einen Vergleich der Lichtklimas unter den drei verschiedenen Kronendächern zeigt die Abb. 3a. Die höchste Tagessumme an photosynthetisch wirksamer Strahlung erfährt der *Podocarpus*-Jungwuchs unter Kiefern, wo auch der Anteil der Lichtflecken am höchsten ist. Die schlechtesten Lichtverhältnisse hat der Jungwuchs im *Eucalyptus*-Forst mit dem niedrigsten Anteil an Lichtflecken. Das Lichtklima im Naturwald liegt zwischen den beiden Extremen.

Vergleicht man das Lichtklima mit den Photosyntheseleistungen der jungen *Podocarpus*-Pflanzen, so zeigt sich die gleiche Reihung (Abb. 3b), man sieht aber auch, dass die Lichtflecken in der Summe weniger effektiv sind als das diffuse Licht, da sie oft den Lichtsättigungswert der Photosynthese übersteigen. Während die Photosynthesemessungen den Shelter-Tree-Effekt der Kiefern klar erkennen lassen, scheinen die jungen *Podocarpus*-Bäume unter dem Kronendach der *Eucalyptus*-Bäume eher in einem ungünstigen Lichtklima zu stehen. Trotzdem ist ihr Stammwachstum gleich oder sogar etwas stärker als das der Vergleichsbäume im Naturwald (Abb. 3c). Wie ist dies zu erklären? In der äthiopischen Forstwirtschaft werden *Eucalyptus*-Plantagen in etwa sechs- bis zehnjährigem Rhythmus mit Ausnahme von Überhältern zur Naturverjüngung auf Stock gesetzt. Während das Kronendach der Überhältern nur zu 72 % geschlossen ist, und somit relativ viel Strahlung passieren lässt, bildet sich durch den Stockausschlag ein zweites „Kronendach“, das in seinem Wachstum den lang-

samer wachsenden *Podocarpus* schnell überholt. Durch dieses zweite Kronendach verschlechtert sich das Lichtklima, wie es die Abb. 3a zeigt. In dieser Zeit wachsen die jungen *Podocarpus* Bäume nicht besser als die im Naturwald. Beim nächsten Schnitt jedoch verbessert sich das Lichtklima dramatisch und der *Podocarpus* Jungwuchs erfährt einen enormen Wachstumsschub (Abb. 4). Während der Kronendacheffekt unter dem Kronendach von *Pinus* durch stetig stärkeres Wachstum zustande kommt, resultiert er im *Eucalyptus*-Forst aus einer stufenweisen Wachstumskurve.

Es ist selbstverständlich, dass auch andere Faktoren, wie geringe Unterschiede im täglichen Temperaturgang und in der relativen Luftfeuchte,

sowie im Wassergehalt der Wurzelhorizonte beim Kronendacheffekt mitspielen. Allerdings lassen sich über 70 % des photosynthetischen Kohlenstoffgewinns durch das Lichtklima und nur etwa jeweils 4 % durch Feuchte und Temperatur erklären. Die Arbeit zeigt, dass die weit verbreitete Meinung, dass exotische Plantagen den tropischen Waldökosystemen abträglich sind, nicht generell zutrifft und dass sie als Vorwald für die Renaturierung der Wälder gute Dienste leisten können.

LITERATUR

- Strobl S, Fetene M, Beck E (2011) Analysis of the “shelter tree-effect” of natural and exotic forest canopies on the growth of young *Podocarpus falcatus* trees in southern Ethiopia. *Trees* DOI: 10.1007/s00468-011-0554-x

Abb. 4: Der *Podocarpus*-Jungwuchs nach der Entfernung des letzten *Eucalyptus* Stockaustriebs. Im Hintergrund ein *Eucalyptus*-Überhälter, rechts ein *Podocarpus* „Mutterbaum“ (Steineiben sind zwei-häusig, d.h. es gibt männliche und weibliche Bäume). Foto E. Beck (2008)





■ MAREIKE LIESS

Bodenkartierung im tropischen Bergregenwald

PROBLEMLÖSUNG IN UNWEGSAMEM GELÄNDE

■ Abb. 1: Blick auf das Forschungsgebiet. Das Gelände ist steil, die baumlosen Rinnen im Hintergrund sind durch Hangrutsche entstanden

Die Hänge im Forschungsgebiet im südlichen Ecuador sind steil und schwer zugänglich. Ein einfaches Wegenetz zieht sich auf einer Höhe von 1.800 bis 3.200 Metern über dem Meeresspiegel steil bergan bis zum höchsten Berggipfel, dem Cerro de Consuelo. Das Gebiet, welches im Rahmen der DFG Forschergruppe 816 untersucht wird, umfasst ca. 25 km². Es grenzt an den Nationalpark Podocarpus und ist seit September 2009 ebenfalls Teil des Biosphärenreservates „Podocarpus – El Condor“.

Die Erstellung einer Bodenkarte ist in der Forschergruppe, die bereits seit 1998 besteht, schon lange ein Thema, um einzelne Untersuchungsergebnisse in einen größeren Zusammenhang zu setzen. Zahlreiche Bodenprofile wurden beprobt. Dennoch fehlte bisher eine systematische Herangehensweise in der Beprobungsstrategie, welche die Erstellung einer Bodenkarte ermöglichen würde.

Traditionelle Bodenkartierung, bei der einzelne Bodeneinheiten durch gezielte Sondierung räumlich von einander abgegrenzt werden, ist aufgrund des schwer zugänglichen Geländes nicht möglich. An den steilen Hängen herrscht insbesondere im oberen Bergwald ein dichtes Netz an krüppelwüchsigen Bäumen vor, die kein Eindringen zulassen. Dort wo der Zugang, wenn auch beschwerlich, möglich ist, zieht sich ein dichtes Wurzelnetz durch den Wald, das nicht selten über dem festen Boden zu schweben scheint. Man bewegt sich gleichsam kletternd von Wurzel zu Wurzel vorwärts und läuft Gefahr, bei Fehlritten in ein bis zu 1 Meter tiefes Loch zu stürzen. Hangrutsche (siehe



Diplom-Geoökologin Mareike Ließ

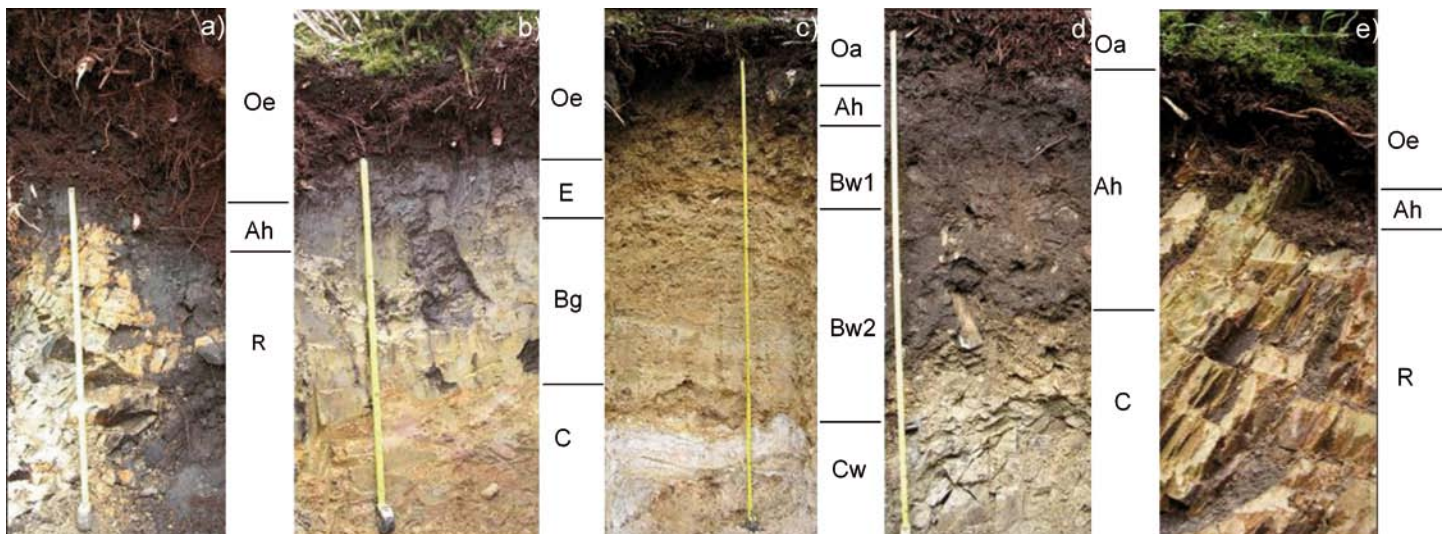
ist wissenschaftliche Mitarbeiterin der **Abteilung Bodenphysik**, Universität Bayreuth, Fakultät für Biologie, Chemie und Geowissenschaften.

Mareike Ließ studierte Diplom-Geoökologie und den BA Geographische Entwicklungsforschung Afrikas an der TU-Bergakademie Freiberg und der Universität Bayreuth. Nach Auslands-Tätigkeit u. a. in der Entwicklungszusammenarbeit ist sie seit September 2007 an der Abteilung Bodenphysik angestellt. Ausgehend von ihrer im letzten Jahr vollendeten Dissertation in der DFG Forschergruppe 816 in Ecuador, liegt der Schwerpunkt ihrer Arbeit insbesondere im Fachbereich Bodenlandschaftsmodellierung.

Abb. 1) erschweren die bodenkundliche Arbeit noch zusätzlich. Es ist daher verständlich, dass sich die Forschungsarbeiten der Bodenkundler in diesem Gebiet in der Vergangenheit weitestgehend auf eine Höhe unterhalb 2.100 Meter ü. d. M. beschränkten, da der Wald hier sehr viel leichter zugänglich ist.

Im Rahmen der kürzlich abgeschlossenen Projektphase 2007 - 2010 ist es jetzt jedoch gelungen eine Karte zu erstellen, die die Verbreitung der natürlich vorkommenden Bodentypen Histosol, Stagnosol, Umbrisol, Leptosol und Regosol (World Reference Base for Soil Resources, Abb. 2) im Projektgebiet beschreibt (siehe Abb. 3).

Abb. 2: Bodentypen im Projektgebiet: a) Histosol, b) Stagnosol, c) Cambisol, d) Umbrisol, e) Leptosol (veröffentlicht in Liess et al., 2009).

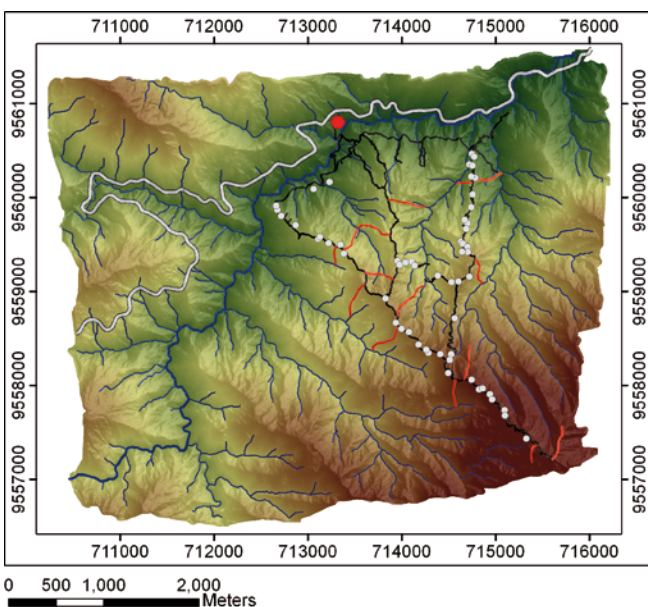
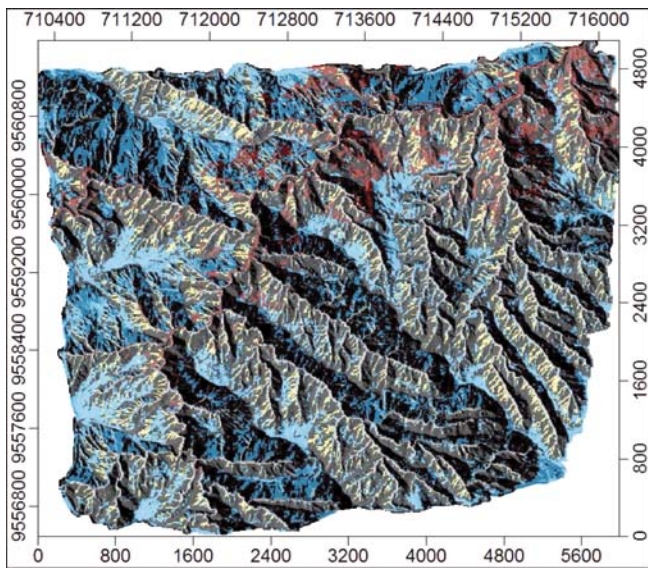


Die Erstellung der Bodenkarte machte eine erneute systematische Bodenbeprobung notwendig, um das Gelände repräsentativ abzudecken. Hierbei wurde das Gebiet in 24 Terrainklassen unterteilt, die zunächst gleichmäßig entlang des bestehenden Wegenetzes durch Bodenprofile beprobt wurden (Liess et al., 2009). Anschließend erfolgte mit einem zwei Meter langen Bohrstock eine umfassendere Beprobung derselben Klassen entlang von Transekten. So konnten die Hangrücken entlang der Seitenhänge bis hin zu den Seitentalbächen im Sinne des Catena-Konzeptes untersucht werden (Liess et al., 2009). Die Verteilung der Profile und Probenahme-transecte ist in Abb. 4 dargestellt.

Die anschließende Erstellung der Bodenkarte erfolgte mittels des statistischen Modells CART (Classification and Regression Trees, Breimann et al., 1984). Hier werden die vor Ort erfassten Bodentypen zu Parametern wie Hangneigung, Exposition oder dem Abstand zum Fließgewässernetz in Beziehung gesetzt. Diese aus einem digitalen Geländemodell berechneten Terrainparameter sind flächendeckend vorhanden und fungieren daher als Vorhersageparameter, um die Bodeninformation in die Fläche zu projizieren. Die geplante hydrologische Modellierung sowie eine Modellierung des Hangrutschrisikos im Untersuchungsgebiet, benötigen diese wie auch weitere Karten einzelner Bodenparameter, die bereits in Bearbeitung sind.

Abb. 3: Verbreitung der Böden im Forschungsgebiet (veröffentlicht in Liess et al., 2009).

Abb. 4: Untersuchungsgebiet mit Bodenprofilen und Probenahme-transecten (gemäß Liess et al., 2009)



soil type
 Umbrisol
 Stagnosol
 Regosol
 Leptosol
 Histosol

LITERATUR

- Breimann, L., Friedmann, J. H., Olshen, R. A., Stone, C. J., 1984. Classification and regression trees, CRC press, Wadsworth.
- Jenny, H. (1941): Factors of soil formation. A system of quantitative pedology. New York.
- Liess, M., Glaser, B., Huwe, B., 2009. Digital Soil Mapping in Southern Ecuador. Erdkunde, 63/ 4: 309–319.

WEBLINK

- www.bayceer.uni-bayreuth.de/bophy

INFO

Das hier angewandte Verfahren gehört zum Forschungsbereich der Bodenlandschaftsmodellierung, bei dem neben geostatistischen Interpolationsverfahren statistische Modelle zur Vorhersage von Bodenparametern verwendet werden. Die Vorhersage von Bodentypen mittels anderer Parameter, wie hier z. B. den Terrainparametern, beruht auf dem Konzept von Jenny (1941), wonach der Boden in seinen Eigenschaften durch seine Position in der Landschaft bestimmt wird und daher u. a. durch das Relief, das Klima und die Vegetation.

UTM Zone 17 M, WGS 84

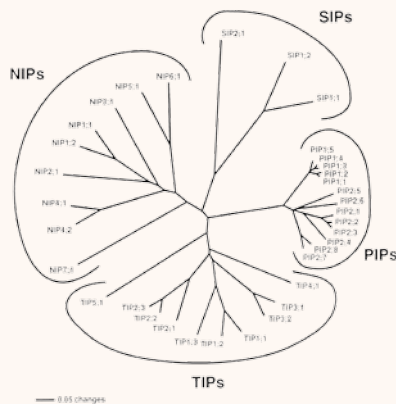
Im Blitzlicht I

WEITERE ARBEITSGRUPPEN IN DER BIOLOGIE

DNA-Analytik und Ökoinformatik

Das Zentrale Labor für DNA-Analytik und Ökoinformatik (Koordination: Dr. Alfons Weig, Leitung: Prof. G. Rambold) unterstützt seit 2008 die Arbeitsgruppen von BayCEER und anderer Forschungszentren in verschiedenen Forschungsprojekten, so unter anderem in Arbeiten zur Populationsstruktur bestandsbildender Bäume. Verschiedene DNA-basierte Verfahren werden eingesetzt, um die Diversität und Ökologie sowie physiologische Anpassungen von Organismen auf Umwelteinflüsse zu analysieren.

- www.daneco.uni-bayreuth.de



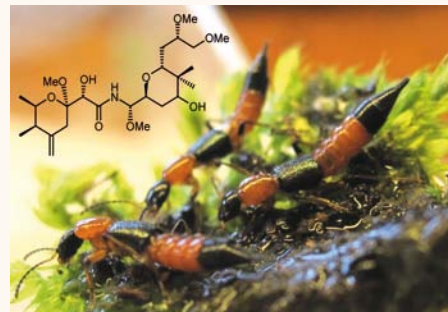
Tierökologie I

Prof. Dr. Klaus H. Hoffmann leitet den Lehrstuhl Tierökologie I. Geforscht wird hier zu Themen der physiologischen und molekularen Ökologie (Beispiel Insektenneuropeptide, Pflanzen-Insekten Interaktionen, Verdauungsphysiologie der Insekten), sowie zur Stoffwechsel- und Hormonphysiologie der Gliederfüßer (Arthropoden). Die Ergebnisse können beispielsweise in der biologischen Schädlingsbekämpfung verwendet werden. Die Professur für Populationsökologie am Lehrstuhl Tierökologie I (Nachfolge Prof. Steffan-Dewenter) wird voraussichtlich zum WS 2010/11 neu besetzt. Gleiches gilt für den Lehrstuhl selbst.



- www.bayceer.uni-bayreuth.de/toek1

Tierökologie II



Die *Paederus*-Kurzflügelkäfer enthalten das Polyketid Pederin und schützen sich damit vor Spinnenfraß. Die Substanz hat eine extreme Antitumorwirkung und wird von endosymbiotischen, im Käfer befindlichen Mikroorganismen der Gattung *Pseudomonas* produziert.

Der Schwerpunkt des Lehrstuhls Tierökologie II unter der Leitung von Prof. Dr. Konrad Dettner liegt in der Chemischen Ökologie, die sich mit Pheromonen, Abwehrstoffen und Giften aus Insekten und deren biologischer Bedeutung sowie mit symbiotischen Beziehungen zwischen Insekten und Mikroorganismen befasst. Biologisch aktive Naturstoffe aus Insekten werden unter anderem als Bakterizide, Fungizide und Tumoreremmer eingesetzt. Weitere Forschungsthemen sind molekulare und klassische Ökologie, Morphologie und Biodiversität von Wasserinsekten.

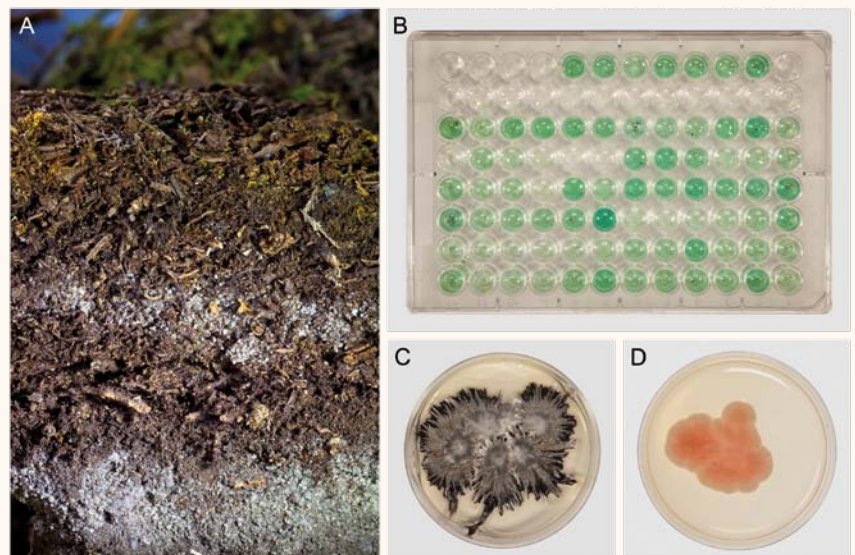
- www.bayceer.uni-bayreuth.de/toek2

Mykologie

In der Abteilung Mykologie wird unter der Leitung von Prof. Dr. Gerhard Rambold zur molekularen Diversität und Ökologie von Pilzen, Flechten und Pflanzengallen geforscht. Pilze sind allgegenwärtig: so werden u. a. Vergesellschaftungen und Funktionen der blattbewohnenden, streuabbauenden und bodenbesiedelnden Pilze von Buchenwäldern untersucht. Ein weiteres Aktivitätsfeld ist die Entwicklung von Datenbanken und Applikationen im Bereich der Biodiversitätsinformatik.

- www.mycology.uni-bayreuth.de

A: Bodenprofil mit Pilzhyphensträngen (gelb) aus Fichtenwald. B: Messung von Enzymaktivitäten. C, D: Isolate von Bodenpilzen.





■ GERHARD GEBAUER

Überleben im Dunkeln

WIE WALDBODENPFLANZEN MIT DER LICHTLIMITATION IN IHREM LEBENSRAUM UMGEHEN

■ Bei der mykoheterotrophen *Voyria aphylla* bilden die Pilzpartner (Glomeromycota) eine arbuskuläre Mykorrhiza aus. Diese chlorophyll- und blattlose Pflanze gehört zur Familie der Enziangewächse und lebt am Boden extrem dunkler tropischer Regenwälder in Südamerika. Foto: Vincent Merckx.

Wälder absorbieren mit ihrem Kronendach erhebliche Mengen an einstrahlendem Licht. In einem lichten Kiefernwald erreichen beispielsweise noch ca. 20 % der Einstrahlung den Waldboden. In einem Eichenwald sind es nur mehr ca. 10 %, und in einem sehr schattigen Buchenwald dringen im Sommer lediglich noch 1 - 5 % der Einstrahlung bis zum Waldboden vor. Pflanzen am Waldboden müssen mit der verbleibenden geringen Lichtverfügbarkeit leben. Viele Waldbodenpflanzen in sommergrünen Laubwäldern weichen der Lichtlimitation aus, indem sie bereits im Frühjahr vor dem Laubaustrieb der Bäume ihre Blätter ausbilden, blühen und dann den dunklen Sommer unterirdisch mit Speicherzwiebeln oder Rhizomen überdauern. Zu diesen Frühjahrsblüchern gehören in unserer Flora zum Beispiel das Schneeglöckchen und das Buschwindröschen.

Andere Pflanzen haben teilweise hoch spezialisierte Mechanismen entwickelt, um auch in der

AUTOR

Prof. Dr. Gerhard Gebauer

ist der Leiter des **Labors für Isotopen-Biogeochemie** im Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung (siehe Seite 48). Sein Forschungsprojekt über mykoheterotrophe Pflanzen wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.



Der Widerbart (*Epipogium aphyllum*) ist eine mykoheterotrophe Orchidee schattiger Wälder in Europa. Sein bevorzugter Pilzpartner ist ein Ektomykorrhizapilz, der Risspilz (*Inocybe spec.*). Foto: Heiko Liebel

Dunkelheit am Waldboden sommergrüner oder immergrüner Wälder zu überleben. Manche dieser Pflanzen haben sich sogar von einer für Pflanzen charakteristischen Eigenschaft völlig losgesagt, nämlich mit Hilfe von Licht und Chlorophyll Photosynthese zu betreiben und damit ihren Kohlenstoffbedarf zu decken. Diese Pflanzen bilden kein Chlorophyll und häufig auch gar keine Blätter mehr aus. Die Mehrzahl dieser sich nicht mehr autotroph (griech. autos „selbst“, trophe „Ernährung“), son-

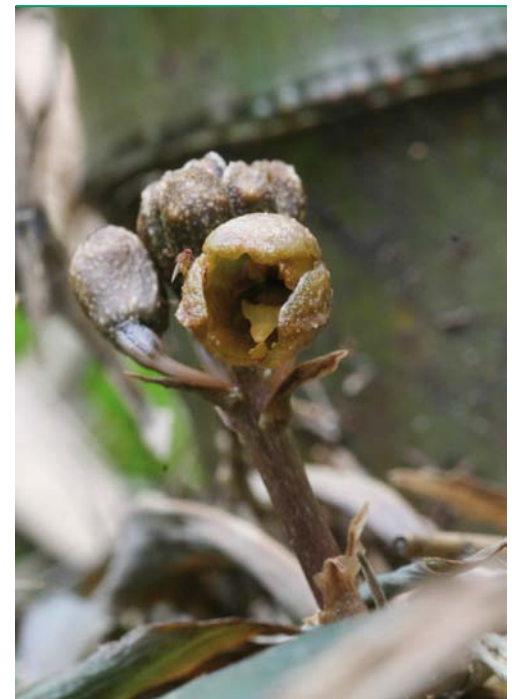


Die Korallenwurz (*Corallorhiza trifida*) gehört ebenfalls zur Familie der Orchideengewächse. Sie wächst circumboreal in schattigen Wäldern. Diese Pflanze besitzt zwar keine Blätter mehr, aber immerhin noch einen grünen Stängel. Dessen Photosyntheseleistung trägt mit ca. 20 % zur Deckung des Kohlenstoffbedarfs der Korallenwurz bei. Die restlichen ca. 80 % des Kohlenstoffs stammen vom Ektomykorrhizapilz *Tomentella spec.* Die Korallenwurz ernährt sich somit partiell mykoheterotroph. Foto: Marco Klüber

dem heterotroph (griech. heteros „fremd“, trophe „Ernährung“) ernährenden Pflanzen parasitiert direkt auf anderen Wirtspflanzen. Diese Parasiten ernähren sich über Haustorien, mit deren Hilfe sie die Wasser- und Nährstoffleitungsbahnen ihrer Wirtspflanzen „anzapfen“. Zu den parasitisch

lebenden Pflanzen gehört auch *Rafflesia arnoldii*, die in Bäumen tropischer Wälder Südostasiens lebt und nur mit ihrer bis zu ein Meter Durchmesser erreichenden Blüte aus ihrer Wirtspflanze hervorbricht. Der Lebensraum parasitischer Pflanzen ist aber nicht auf Wälder beschränkt.

Gerade in den letzten Jahren hat die Ernährungsweise einer weiteren Gruppe von ausschließlich am Waldboden lebenden heterotrophen Pflanzen besondere Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Man kennt heute weltweit etwa 400 Pflanzenarten, die sich vollständig von Pilzpartnern mit Kohlenstoffverbindungen und mineralischen Nährstoffen versorgen lassen. Diese Ernährungsweise wird als Mykoheterotrophie (griech. mykos „Pilz“, heteros „fremd“, trophe „Ernährung“) bezeichnet.



Die mykoheterotrophe Orchidee *Gastrodia confusa* lebt am Boden von Bambuswäldern in Japan. Sie ist auf holzzeretzende Pilze aus der Gattung Helmling (*Mycena spec.*) spezialisiert. Foto: Yuki Ogura-Tsujita

INFO

Die Kategorien von Pilzpartnern

Bisher konnten mit Hilfe molekular-ökologischer Methoden drei verschiedene Kategorien von Pilzpartnern in den häufig nur rudimentär ausgebildeten Wurzeln von mykoheterotropen Pflanzen nachgewiesen werden:

- In den Wurzeln mykoheterotropher Pflanzen der tropischen Regenwälder finden sich vorwiegend Pilzpartner, die gleichzeitig mit benachbarten Bäumen eine arbuskuläre Mykorrhiza eingehen (Glomeromycota). Diese Pilze versorgen ihren Baumpartner mit mineralischen Nährstoffen aus dem Boden und erhalten im Gegenzug vom Baum Kohlenhydrate aus der Photosynthese. Die mykoheterotrophe Pflanze „raubt“ sich vom gleichen Pilzpartner sowohl Kohlenhydrate als auch mineralische Nährstoffe.
- Eine ähnliche „Dreiecksbeziehung“ zwischen Baum, Pilz und mykoheterotropher Pflanze finden wir auch in unseren einheimischen Wäldern. Hier fungieren als Pilzpartner allerdings Ständer- und Schlauchpilze, die mit dem Baumpartner eine Ektomykorrhiza eingehen.
- Als dritte Gruppe von Partnerpilzen mykoheterotropher Pflanzen wurden in Ostasien und Australien holzzeretzende saprotrophe Pilze nachgewiesen. Diese Pilze gehen keine Mykorrhiza mit Waldbäumen ein.

Mykoheterotrophe Pflanzen sind mittlerweile aus zehn Pflanzenfamilien bekannt. Die meisten Arten mit dieser Ernährungsweise gehören zur Familie der Orchideengewächse. Daneben sind aber in unserer einheimischen Flora auch Beispiele my-

Der in Wäldern Europas und Nordamerikas beheimatete mykoheterotrophe Fichtenspargel (*Monotropa hypopitys*) gehört zur Familie der Heidekrautgewächse und ist auf Ektomykorrhizapilze aus der Gattung Ritterling (*Tricholoma spec.*) als Pilzpartner spezialisiert. Foto: Gerhard Gebauer



koheterotropher Pflanzen aus den Heidekrautgewächsen bekannt. In den Tropen wurden unter anderem auch mykoheterotrophe Enziangewächse gefunden.

Neben der vollständig mykoheterotrophen Ernährungsweise von chlorophyll- und blattlosen Waldbodenpflanzen wurde erst in den letzten Jahren bei einigen durchaus grün belaubten Orchideen und Heidekrautgewächsen unserer Wälder eine Mischernährung zwischen Autotrophie und Mykoheterotrophie nachgewiesen. Je nach Lichtverhältnissen an ihrem Wuchsort können diese Pflanzen zwischen dem Kohlenstoffgewinn aus der

Photosynthese oder auf Kosten ihres Pilzpartners wechseln. Auch diese partiell mykoheterotrophen Pflanzen haben Ektomykorrhizapilze als Partner und sind über deren Hyphen mit den Waldbäumen verbunden. Der Nachweis der partiell mykoheterotrophen Mischernährung gelang mit Hilfe von Häufigkeitsbestimmungen der stabilen Kohlenstoff- und Stickstoffisotope in der Biomasse von Pilzen, autotrophen Referenzpflanzen sowie vollständig und partiell mykoheterotrophen Pflanzen. Das BayCEER-Labor für Isotopen-Biogeochemie an der Universität Bayreuth war maßgeblich an der Entdeckung der partiell mykoheterotrophen Ernährungsweise von scheinbar autotrophen Waldbodenpflanzen beteiligt.



Die violette Stendelwurz (*Epipactis purpurata*) lebt in schattigen Wäldern Europas. Viele Stendelwurzen besitzen Ektomykorrhizapilze unter anderem der Gattung *Tuber* (Trüffelpilz) als Pilzpartner. Alle Arten dieser Orchideengattung haben noch grüne Blätter. Trotzdem ernähren sich viele Stendelwurzen teilweise auf Kosten des Pilzpartners und nur teilweise durch eigene Photosynthese (partiell mykoheterotroph). Foto: Heiko Liebel

WEBLINKS

- www.bayceer.uni-bayreuth.de/Gebauer
- www.bayceer.uni-bayreuth.de/ibg

■ ULRICH MEVE
SIGRID LIEDE-SCHUMANN

Den Wald vor lauter Bäumen sehen!

UNTERSCHÄTZTE BIODIVERSITÄT
IM UNTERWUCHS DER WÄLDER

■ *Scyphostelma pichinchensis* (Apocynaceae), eine Kletterpflanze aus N-Ecuador, die zu einer großen, weit verbreiteten Gattung gehört, von der erst ein Bruchteil der Arten wissenschaftlich beschrieben ist.

Die pflanzliche Vielfalt in Wäldern wird oft unterschätzt, weil sie nicht allein durch die Anzahl der Baumarten bestimmt wird, sondern durch die Kräuter, Sträucher und Kletterpflanzen im Unterwuchs des Waldes, oder auch von Epiphyten im Geäst der Bäume. In den Tropen ist nicht nur die Baumflora viel diverser als in den Wäldern der gemäßigten Breiten, sondern insbesondere der Unterwuchs und natürlich die Epiphytenflora. Die tropischen und subtropischen Bergwälder, ob altweltlich oder neuweltlich, gehören dabei zu den artenreichsten Formationen überhaupt. Schätzungen zufolge können jedoch nicht selten bis zu 30 % des Arteninventars in diesen Habitaten überhaupt bis auf Artniveau bestimmt werden. Die Gründe dafür sind vielfältig. Die Baumflora, die den ökonomischen Wert der Wälder bestimmt, ist in der Regel entsprechend gut erforscht, allerdings wird oft gar nicht erst versucht, die (kleinräumige) floristische Vielfalt im Unterwuchs komplett zu inventarisieren. Methodisch beschränkt man sich dann darauf, nur solche Pflanzengruppen zu erfassen, die ökologisch für einen bestimmten Waldtyp besonders wichtig sind, oder, ganz profan, für die vielleicht gerade ein Spezialist zu Verfügung steht. Entsprechend gibt es bei der Erfassung von

Gesamtinventaren vor allem im Unterwuchs große Defizite. Weitere Erschwernisse ergeben sich daraus, dass viele Unterwuchspflanzen unzuverlässig blühen. Komplette Inventarisierungen ziehen sich so über viele Jahre und viele Besuche im Wald hin, bis nach und nach die Mehrheit oder im besten Fall sämtliche Arten erkannt beziehungsweise als neu und noch unbeschrieben identifiziert werden. Pflanzentaxonomen haben unvermindert alle Hände voll zu tun, der Artenvielfalt beschreibend Herr zu werden. Weltweit sind es alljährlich tausende neuer Arten, vor allem in Südamerika und Asien, die trotz schmerzhafter Flächenverluste durch Rodungen neu beschrieben werden.

Neben Sträuchern und Jungbäumen spielen zwei Pflanzengruppen im Unterwuchs der Wälder eine herausragende Rolle, dies sind krautige Pflanzen und Farne sowie Kletterpflanzen inklusive Lianen (verholzte Kletterpflanzen). Letztere können bis zu 40 % der Gehölzarten in tropischen Wäldern ausmachen. Kletterpflanzen sind auch für den einzigen wirklichen Unterschied in der Physiognomie der Wälder der Tropen gegenüber denen der gemäßigten Breiten verantwortlich – oberhalb des 30. Breitengrades nimmt die Artenzahl der Lianen drastisch ab. In tropischen Tieflandwäldern wie in



Metastelma penicillatum (Apo-cynaceae), ein Endemit aus Ost-Cuba.



Derzeit wird noch geprüft, ob die abgebildete Pflanze aus S-Ecuador zu *Anthurium lingua* (Araceae) gestellt werden kann oder als neues Taxon beschrieben werden muss.

Westafrika oder dem Amazonasgebiet ist nicht selten jeder 3. Baum von Lianen bewachsen, und im Unterwuchs können bis 20 % der Pflanzendeckung aus jungen Kletterpflanzen bestehen. Kletterpflanzen treten also in bestimmten geographischen Regionen und Waldformationen gehäuft auf. Eine Häufung können wir auch in bestimmten Pflanzenfamilien beobachten, wo sie die dominante Wuchsform repräsentieren. „Weltmeister“ sind die Hundsgiftgewächse (Apocynaceae) mit über 3.000 Kletterpflanzenarten, gefolgt von den Schmetterlingsblütlern (Fabaceae).

In „reifen“ Wäldern ist der Lichtgenuss am Boden bedingt durch die starke Kronenentwicklung sehr eingeschränkt (oft erreichen kaum 2 % des Sonnenlichts den Waldboden), was vor allem schattentoleranten Samenpflanzen und Farnen zugute kommt. Besonders konkurrenzkräftig sind hier außerdem Spezialisten, die in Symbiosen mit Pilzen leben oder ganz ohne eigenes Blattgrün auskommen, wie mykotroph oder parasitisch lebende Pflanzen (vergleiche Artikel S. 32). Lianen (verholzte Kletterpflanzen) schließlich können dem Lichtmangel entkommen, in dem sie bis in die Kronen klettern. All diese Pflanzen sind dabei wichtige Nahrungsgrundlage für unzählige Insekten und Wirbellose Tiere und spielen eine große Rolle im Nahrungskreislauf der Wälder. Viele Unterwuchspflanzen sind aber auf Störungen wie Erdbeben oder Schneisen durch umgestürzte Bäume angewiesen, um sich reproduzieren zu können, weil sie nur bei erhöhtem Lichtgenuss und Nährstoffversorgung blühen – Umstände, die manchmal erst nach vielen Jahren eintreten. Einige photoautotrophe Pflanzenarten sind jedoch an die permanent lichtarmen Verhältnisse am Waldboden angepasst

und bringen somit eine hervorragende Eigenschaft für die (oft lichtarme) einheimische Zimmerpflanzenkultur mit sich. Man denke an das Usambaraveilchen (*Saintpaulia*), welches im Unterwuchs ostafrikanischer Bergwälder zuhause ist, oder an die Flamingoblume aus der in Mittel- und Südamerika weit verbreiteten Gattung *Anthurium*. Diese artenreiche Sippe ist auch ein gutes Beispiel für die lange unterschätzte Diversität krautiger Begleitflora in feuchten Wäldern Südamerikas: Allein aus Ecuador wurden in den letzten fünf Jahren 18 neue *Anthurium*-Arten beschrieben!

Einen Schwerpunkt der systematisch-taxonomischen Arbeit des Lehrstuhls für Pflanzensystematik in Bayreuth repräsentieren die Kletterpflanzen aus der Familie der Apocynaceae in der Neuen Welt. Viele ihrer Arten lassen sich nicht unmittelbar beim Sammeln am Standort bestimmen, sondern aufgrund ihrer zum Teil extrem kleinen Blütenstrukturen erst im Labor mit Hilfe von Mikroskopen. Ein Umstand, der leicht dazu führt, dass diese Pflanzen – weil eben wenig attraktiv für Botaniker und Ökologen – im Gelände übersehen oder ignoriert werden. Dabei lohnt es sich genauer hinzuschauen, die Diversität ist enorm, die blütenbiologischen Anpassungen von Apocynaceen sind faszinierend. Für die Ökologie der Lebensgemeinschaft Wald mögen diese unscheinbaren Pflanzen meist von geringerer Bedeutung sein, die Erforschung ihrer Stammes- und Ausbreitungsgeschichte kann aber viel über die Genese der Wälder verraten. Die taxonomische Aufarbeitung wie das Anfertigen von Revisionen und Publizieren von Artneubeschreibungen ist allerdings sehr zeitaufwendig und neben dem „regulären“ Lehr- und Forschungsbetrieb einer Universität leider kaum noch zu leisten.

AUTOREN



Prof. Dr. Sigrid Liede-Schumann

Prof. Dr. Sigrid Liede-Schumann, Inhaberin des Lehrstuhls für Pflanzensystematik, und PD Dr. Ulrich Meve, Akad. Oberrat am **Lehrstuhl für Pflanzensystematik** und Kurator des Herbariums der Universität Bayreuth, bearbeiten Fragestellungen zur Stammesgeschichte, Systematik und Taxonomie innerhalb verschiedener Pflanzenfamilien, vorrangig der Apocynaceae (Hundsgiftgewächse), Rubiaceae (Rötegewächse) und Aizoaceae (Mittagsblumengewächse). Außerdem stehen blütenökologische Themen im Fokus ihrer Forschung.

- www.pflanzensystematik.uni-bayreuth.de



PD Dr. Ulrich Meve

Wer braucht noch ein Herbarium?

DAS HERBARIUM DER UNIVERSITÄT BAYREUTH

Gepresste und montierte Pflanzen als Referenzbelege sind bereits im 15. Jahrhundert angefertigt und verwahrt worden, im 18. Jahrhundert wurde die Konservierung von Pflanzen(teilen) dann weltweit zum wissenschaftlichen Standard. Doch wozu soll das in Zeiten von Genbanken heute noch gut sein? „Das ist doch völlig veraltet und braucht kein Mensch mehr“ – so oder ähnlich klingt manche Einschätzung selbst von Biologen. „Veraltet“ oder „modern“ sind aber Adjektive, die für ein wissenschaftliches Herbarium inadäquat sind, denn seine Aufgaben für Systematik, Taxonomie und Biogeographie sind zeitlos und weder heute noch morgen verzichtbar: Jeder wissenschaftliche Pflanzenname ist untrennbar mit einem Referenzbeleg (=Typus) verknüpft, der in einem registrierten Herbarium hinterlegt sein muss. Pflanzennamen sind unsterblich, aber Pflanzen können aussterben – zunehmend sind Herbarbelege neben DNA-Quellen die letzten Zeugnisse ausgestorbener Arten. Die Benennung der Pflanzen (Taxonomie) ist aber in ständigem Fluss, denn die korrekte Anwendung von Namen folgt komplizierten Nomenklaturregeln und kann sich immer wieder ändern. Pflanzensippen werden normalerweise mit Hilfe ihrer auch im getrockneten Zustand gut konservierten morphologischen Merkmale klassifiziert - DNA-gestütztes „barcoding“ kann die Identifizierung von Pflanzen beschleunigen, aber systematische Forschung nicht ersetzen. Je mehr Belege einer Sippe zur Verfügung stehen, desto sicherer können Gattungen und Arten abgegrenzt beziehungsweise Unterarten und Varietäten erkannt werden. In vielen Regionen der Erde ist es nur mit Hilfe von ständig verfügbarem Vergleichsmaterial möglich, die botanische Vielfalt zu erfassen (siehe Artikel S. 36). Deshalb bemühen sich Herbarien möglichst viele Aufsammlungen unterschiedlicher geographischer Herkünfte zusammenzutragen und sicher zu identifizieren. Die Auswertung dieser Daten kann auch wichtige Beiträge zur Arealkunde der Sippen liefern. Im Zeichen von Klimawandel und Artenschwund durch direkte Umwelterstörung sind Vergleiche historischer und aktueller Aufsammlungen vorzüglich geeignet, um Arealverschiebungen wie beispielsweise die Ausbreitung wärmeliebender Arten gen Norden zu dokumentieren.

Das Herbarium der Universität Bayreuth als ein Teil des Ökologisch-Botanischen Gartens verwahrt und kuratiert über 35.000 gepresste, getrocknete und aufgezogene Pflanzenbelege. Die Abteilung **Kryptogamen** umfasst etwa 15.000 Belege und wird wissenschaftlich betreut von Prof. Dr. Eduard Hertel (ÖBG), die **Abteilung Gefäßpflanzen** mit über 20.000 Belegen von PD Dr. Ulrich Meve (Lehrstuhl Pflanzensystematik). Das Herbarium ist erst im Jahr 2001 gegründet worden und entstand aus einer Zusammenführung der Sammlungen der Lehrstühle für Biogeographie, Pflanzensystematik und Pflanzenphysiologie sowie des Ökologisch-Botanischen Gartens. Es trägt das offizielle Acronym „UBT“. Zusätzlich wurden verschiedene Schenkungen historischer Sammlungen aufgearbeitet und in den Bestand des Herbariums integriert (vgl. auch UBT aktuell, Sept. 2009). Aktuell konzentrieren sich die Arbeiten in unserem Herbarium auf lokale und regionale Projekte. Es werden die Erfassung und Publikation der „Flora von Nordostbayern“ und der „Flora von Bayreuth“ unterstützt.

In den letzten Jahrzehnten sind nicht wenige Herbarien geschlossen oder zusammen gelegt worden. Zum Glück konnte dieser Trend gestoppt werden. Es hat sich mittlerweile die Erkenntnis durchgesetzt, dass Biodiversitätsforschung ohne Herbarien schlicht undenkbar ist. An der unzureichenden materiellen und personellen Ausstattung vieler dieser Einrichtungen hat das aber bislang leider wenig geändert.



■ **Iris sibirica (Sibirische Schwertlilie), 1923 gesammelt vor Destuben und herbarisiert von J. Kaulfuß. Das Vorkommen ist heute erloschen.**

WEBLINKS

- Herbarium der Universität Bayreuth: www.obg.uni-bayreuth.de/de/Herbarium_UBT/
- Datenbank von Herbarien weltweit: <http://sciweb.nybg.org/science2/IndexHerbariorum.asp>
- Flora von Nordostbayern: www.flora.uni-bayreuth.de

WÄLDER WELTWEIT



■ MARIANNE LAUERER
GREGOR AAS

Wälder der Erde – an einem Tag im ÖBG

DER ÖKOLOGISCH-BOTANISCHE GARTEN DER UNIVERSITÄT BAYREUTH IST EINE REISE WERT

Die Vielfalt der Pflanzenwelt und ihre ökologische Bedeutung zu erleben und zu verstehen, das ist eines der Ziele des Ökologisch-Botanischen Gartens (ÖBG) der Universität Bayreuth. Hier werden Pflanzen und Vegetation der wichtigsten Lebensräume der Erde geographisch gegliedert auf knapp 20 ha Freigelände und 6.000 m² Gewächshausfläche naturnah gestaltet präsentiert. Ein Spaziergang durch den ÖBG ist immer auch eine Reise durch die Vegetationszonen der Erde mit charakteristischen Vertretern eines jeden Lebensraumes.

IMMERGRÜNER TROPISCHER TIEFLANDREGENWALD

Tropische Regenwälder sind das „Markenzeichen“ der Äquatorialgebiete. Sie bedecken potentiell eine Fläche von ca. 17 Millionen Quadratkilometern und damit etwa 11 % der gesamten Landoberfläche der Erde. Geographische Zentren sind das Amazonas- und Kongobecken sowie der indomalaiische Archipel.

Im Tropenwaldhaus des ÖBG kann man hautnah die Bedingungen dieses Lebensraumes erfahren und die Anpassungen der Pflanzenwelt erkunden. Feuchtigkeit und Temperatur sind im tropischen Tieflandregenwald für das Pflanzenwachstum optimal, begrenzend ist das Licht. Pflanzen haben verschiedene Strategien entwickelt, um den Lichtmangel auszugleichen: (1) Im Unterwuchs wachsen oft groß- und buntblättrige Stauden, (2) viele Pflanzen leben als Aufsitzer (Epiphyten) in den Kronen von Bäumen, z. B. Orchideen¹ oder Bromelien in den Tropen Amerikas (Neotropis) oder (3) sie klettern als Lianen an Bäumen empor und kommen so ans Licht, ohne in einen dicken Stamm investieren zu müssen. Zu den Lianen gehören wichtige Nutzpflanzen wie Maracuja (*Passiflora*-Arten) und Vanille aus Südamerika sowie Yams (*Dioscorea* spp.) aus den altweltlichen Tropen. Zahlreich sind im Unterwuchs tropischer Tieflandregenwälder auch kleinere Bäume. Oft sind sie kauliflor (Blüten und Früchte entwickeln sich am Stamm) wie *Ficus gilettii*, ein Gummibaum aus Westafrika oder der Kakaobaum (*Theobroma cacao*) und die *Goethea* (siehe Kasten) aus Südamerika.

Im ÖBG wächst *Goethea* im Tropenwald-Haus, wo sie fast das ganze Jahr über direkt am Stamm blüht.
Foto: Marianne Lauerer

¹ Alle hier genannten Arten oder taxonomische Gruppen (Familien) kann man im ÖBG finden

Dr. Marianne Lauerer

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am ÖBG. Ihre Schwerpunkte sind die Vegetation und Nutzpflanzen der Tropen, sowie Untersuchungen zu Neophyten und geschützten Arten.



Foto: Armin Schaller

PD Dr. Gregor Aas

ist Direktor des ÖBG. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der Biologie und Ökologie von Gehölzpflanzen, insbesondere bei Arbeiten zur Diversität von *Sorbus* (Mehlbeeren) und *Salix* (Weiden-Arten).



Foto: Marianne Lauerer

Goethea – Eine Brasilianerin nach Goethe benannt



Neben den vielen bekannten Beziehungen Goethes zur Botanik - man denke nur an sein berühmtes Gedicht über den Ginkgo – ist **Goethea** (*Goethea cauliflora*) eine der weniger bekannten „Goethe-Pflanzen“. Sie ist ein kleiner Baum, gehört zu den Malvengewächsen und ist in den Regenwäldern Brasiliens beheimatet.

Nees von Esenbeck, ein mit Goethe befreundeter Botaniker, beschrieb die in Brasilien neu entdeckte Pflanze und benannte sie nach dem großen deutschen Dichter. 1823 schreibt er in einem Brief an Goethe: „*Ich habe gewagt, den theuren Namen, ... an eine Pflanzengattung zu verleihen, weil es dem Botaniker wohl tut, die Häupter und Förderer seiner Wissenschaft unter frischen Pflanzen symbolisch anzudeuten und gleichsam grünend und blühend vor sich zu sehen.*“

Affenbrotbaum – der bekannteste Vertreter der Savannen



Affenbrotbaum in der Savanne
Tansanias. Foto: Gregor Aas

Der Affenbrotbaum (= Baobab, *Adansonia digitata*) gehört zu den bekanntesten und charakteristischen Bäumen der afrikanischen Savannen. In dem relativ kurzen, extrem dicken Stamm können ausgewachsene Bäume mehrere Tausend Liter Wasser speichern. In der Trockenzeit ist der Baum laublos, die Blätter erscheinen innerhalb von wenigen Wochen kurz vor der Regenzeit. Die weißen Blüten sind nur nachts geöffnet

und werden von Flughunden, Buschbabies (Feuchtnasaffen oder auch Galgaos) und Nachtfaltern besucht. Die Samen bleiben mehrere Jahre keimfähig und haben eine ausgeprägte Keimruhe, die nur durch Buschfeuer, lang anhaltende Regenfälle oder durch die Darmassage z.B. von Elefanten gebrochen wird.

Im ÖBG wächst ein (noch) junger Baobab im Trockenwaldhaus, der seine ertümlich anmutende Flaschengestalt erst noch erreichen muss.

Kork-Eiche – ein nachwachsender Rohstoff

Die Kork-Eiche (*Quercus suber*) stammt aus dem westlichen Mittelmeerraum und wird bis zu 20 m hoch. Namensgebend ist die mächtige Korkrinde des Stammes und starker Äste, die zur Korkgewinnung genutzt wird. Ein Baum kann während seines Lebens 100 bis 200 Kilogramm Kork bilden, ein gut isolierendes und Wasser abweisendes Gewebe, das aus abgestorbenen, mit Luft gefüllten, dünnwandigen Zellen besteht und wiederholt geerntet werden kann, ohne den Baum stark zu schädigen. Hauptanbaugebiete der Kork-Eiche sind der Süden Portugals und Spaniens. Im ÖBG wird die bei uns nicht winterharte Kork-eiche im Kübel kultiviert.



TROPISCHE TROCKENWÄLDER

Klimatisch wird in den Tropen mit zunehmender Entfernung vom Äquator das Wasser zum begrenzenden Lebensfaktor. Flächenmäßig zählen die trockenbeeinflussten Tropen zu den bedeutendsten Großlebensräumen der Erde und reichen von den halbimmergrünen Wäldern über die Dornbuschvegetation bis zu den Savannen. Um den Wasserverlust (Transpiration) einzuschränken, werfen die Bäume in der Trockenzeit ihre Blätter ab, manche können in flaschenartig ausgebildeten Stämmen Wasser speichern und prägen vielerorts als charakteristische Flaschenbäume das Bild der Landschaft. Zu ihnen gehören zahlreiche Vertreter der Wollbaumgewächse (Bombacoideae), wie Baobabs in Afrika, Madagaskar und Australien sowie viele *Ceiba*- und *Chorisia*-Arten in Südamerika. Im Unterwuchs dieser Wälder, wie auch im Trockenwaldhaus des ÖBG, wachsen xeromorphe, terrestrische Bromelien und Sukkulente, insbesondere Kakteen in Südamerika und Aloen in der Alten Welt.

MEDITERRANE HARTLAUBWÄLDER

Fünf geografische Gebiete auf der Erde gehören zur Mediterranregion. Die uns bekannteste und bei weitem größte ist das Mittelmeergebiet, während die anderen eher kleinflächig sind: die Kapregion in Südafrika, Südwestaustralien, das südliche Kalifornien und das mittlere Chile. Klimatisch sind diese Gebiete gekennzeichnet durch trockene, warme Sommer und kühle, feuchte Winter (Winterregengebiete). Die Bäume sind immergrün und als Anpassung an die Sommertrockenheit hartlaubig. Der ÖBG kultiviert einen umfangreichen und stattlichen Bestand von Pflanzen aus diesen Regionen, die frostfrei im Gewächshaus überwintern, den Sommer aber in Kübeln im Freien verbringen. Charakteristisch für den mediterranen Lebensraum sind u. a. Eichenarten, wie Stein- (*Quercus ilex*) und Kork-Eiche (*Qu. suber*) im Mittelmeergebiet oder die Life Oaks (*Quercus agrifolia*, *Qu. engelmannii* u. a.) in Kalifornien. Vertreter der Mediterranregion der Südhalbkugel sind in Australien Eukalyptus- und Akazien-Arten und die dekorativ blühenden Proteusgewächse in der Kapregion (z. B. Königsprotee, *Protea cynaroides*).

Frisch geschälte Kork-Eichen auf
Sizilien. Foto Hilke Steinecke.

NEMORALE LAUBWÄLDER

Vor allem in drei großen Gebieten der Erde mit einem winterkalten Klima dominieren Laub abwerfende Wälder (nemorale Laubwälder): in Mitteleuropa, im östlichen Nordamerika und in weiten Teilen Ostasiens. Auf der Südhalbkugel fehlen sie fast vollständig. Geprägt wird dieser Lebensraum von dem uns vertrauten deutlich ausgeprägten jahreszeitlichen Wechsel. In Mitteleuropa sind die nemoralen Laubwälder eher arm an Baumarten und werden von der Rot-Buche (*Fagus sylvatica*) dominiert, daneben prägen Eichen, Ahorne, Ulmen, Linden und andere das Waldbild. In Asien und Nordamerika sind sie deutlich artenreicher. Während in Mitteleuropa nur drei Eichen-Arten (*Quercus* spp.) heimisch sind, kommen in Nordamerika mehrere Dutzend Vertreter dieser Gattung vor, darunter die ausschließlich neuweltliche, artenreiche Gruppe der Roteichen (z. B. *Quercus rubra*), die durch ihre spektakuläre Herbstfärbung wesentlich zum Farbspektakel des Indian Summers beitragen. Eine ganze Reihe weiterer Baum-Gattungen, die ursprünglich in Mitteleuropa beheimatet waren, aber durch die Eiszeiten ausstarben, findet man heute noch in Asien und Nordamerika: Dazu gehören der Tulpenbaum (*Liriodendron tulipifera*, *L. chinense*), die Hickorynuss (*Carya*-Arten) und Magnolien.

BOREALE NADELWÄLDER

Der boreale Lebensraum nimmt nördlich des 50. bzw. 60. Breitengrades den Großteil der Landmassen Eurasiens (sog. Taiga) und Nordamerikas ein. Immergrüne Nadelwälder wechseln mit Seen, Flüssen und Mooren ab. Fichten, Kiefern, Tannen und Lärchen bilden Misch- oder Reinbestände. Ein Grund für das Vorherrschen der immergrünen Nadelbäume ist die sehr kurze Vegetationszeit von nur 3-6 Monaten, da sie im Frühjahr sofort und ohne vorherigen Laubaustrieb mit der Stoffproduktion (Photosynthese) beginnen können. In Eurasien bilden *Abies sibirica* (Sibirische Tanne) die sog. dunkle, *Larix dahurica* (Dahurische Lärche) und *Pinus sibirica* (Sibirische Zirbe) die helle Taiga. In Nordamerika dominieren vor allem zwei Fichtenarten: die Schwarz-Fichte (Black Spruce, *Picea mariana*) und die Schimmel-Fichte (White Spruce, *Picea glauca*). Den Unterwuchs borealer Nadelwälder prägen Zwergsträucher, vor allem aus der Familie der Heidekrautgewächse (Heidelbeer- und *Erica*-Arten), sowie Moose und Flechten.

Tulpenbaum – State Tree von Indiana

Der Tulpenbaum (Yellow Poplar, *Liriodendron tulipifera*) gehört zu den höchsten Laubbäumen der temperaten Zone. Er ist im Osten Nordamerikas zu Hause und hat unverwechselbare Blätter und ausgesprochen attraktive Blüten, die im Mai erscheinen, gelb-orange bis grünlich gefärbt und Tulpen artig geformt sind. Im Osten Nordamerikas war der Tulpenbaum eine der wichtigsten Laubbaumarten, ehe er durch Übernutzung stark dezimiert

wurde. Das leichte Stammholz wird vor allem zu Türen, Fenstern, Furnieren, Sperrholz, Verschalungen und Spielwaren verarbeitet und dient als Rohstoff für die Zellstoff- und Papierherstellung.

Aufgrund der großen, attraktiven Blüten und der Herbstfärbung wird der Tulpenbaum in Europa seit 1663 als Park- und Zierbaum angepflanzt. Die Exemplare im Freigelände des ÖBG blühen seit Jahren regelmäßig.

Tulpenartig geformte Blüte und – auf der Titelseite des Beitrages – herbstlich goldgelbes Blatt des Tulpenbaumes.
Fotos: Marianne Lauerer



INFO & KONTAKT

Ökologisch-Botanischer Garten
Universität Bayreuth
Inge Raps (Sekretariat)
www.obg.uni-bayreuth.de
E-Mail: obg@uni-bayreuth.de



Öffnungszeiten

Werktags (Freigelände): **8 – 17 Uhr**

Sonn- und Feiertags (Freigelände und Gewächshäuser): **10 – 16 Uhr**
(Juli und August bis 19 Uhr)

FORSCHUNG LOKAL

■ BIRGIT THIES

WLAN am Waldstein

FORSCHUNGSINFRASTRUKTUR
IM FICHELGEIRGE

■ Messturm am Weidenbrunnen im Fichtelgebirge – die hier seit 1996 ermittelten Daten sind Teil des internationalen Messprogramms FLUXNET (siehe Beitrag Seite 50).

Seit zwei Jahrzehnten schon wird auf knapp 800 Metern Höhe nordöstlich vom Großen Waldstein im Fichtelgebirge geforscht. 1992 begann das damalige Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK) am Waldstein die Ursachen der Waldschäden zu untersuchen, die besonders deutlich in den Höhenlagen der Mittelgebirge auftraten.

Die ersten Messflächen am „Coulissenhieb I“ werden heute im Rahmen eines waldökologischen Langzeitmessprogramms nur noch selten beprobt. Noch immer befindet sich hier der Knotenpunkt, an dem per WLAN die auf den umliegenden neueren Flächen gemessenen Daten gesammelt und zur Universität Bayreuth übermittelt werden. Dazu ist von der Telekom eine Business-DSL-Leitung angemietet worden. Über zwei Tunnelrechner sind die Forschungsrechner auf dem Waldstein direkt ins Universitätsnetz eingebunden. So können die Forscher von ihren Computern am Campus aus die Experimente im Fichtelgebirge überprüfen und steuern.

Ein Großteil der automatisch erhobenen Messdaten wird quasi in Echtzeit im Internet zur Verfügung gestellt. Stündlich aktualisiert werden die Angaben zur Konzentration von Ozon, Stickoxiden und Schwefeldioxid in der Luft, die der Messcontainer Luftchemie im „Pflanzgarten“ neben weiteren meteorologischen Basisdaten liefert. Die Messstation für Waldklima, Energie- und Stoffaustausch am „Weidenbrunnen“ ist auf und unter einem hohen Turm installiert: Alle zehn Minuten werden von hier die aktuellen Temperaturen aus 32 Metern Höhe bis hin zu zwei Metern unter der Erdoberfläche übermittelt. Die Station ist Teil des weltweiten Messnetzwerks FLUXNET für Kohlendioxidflüsse und wird von der Abteilung Mikrometeorologie betreut. Ein zweiter schlanker Turm wird bei zeitlich begrenzten Kampagnen für Turbulenzmessungen genutzt.

Spaziergänger werden durch Schilder über die wesentlichen Inhalte der verschiedenen Messstationen und Experimente informiert. Im „Coulissenhieb II“ erforscht die DFG-Forschergruppe 562 seit 2005 die Reaktion von Bodenprozessen auf veränderte Niederschläge, um mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Waldboden zu verstehen. Mit großformatigen Dachkonstruktionen wurde im Verlauf von drei Sommern sowohl natürlicher Regen abgeschirmt, als auch künstlicher Regen erzeugt. Alle zwei Stunden werden die von neun Loggern gesammelten Daten zur Bodenphysik über das WLAN weitergegeben.

Im „Pflanzgarten II“ wurde 2010 ein Langzeitexperiment zum Winter-Klimawandel aufgebaut. Um zu untersuchen, welche Effekte der Verlust der isolierenden Schneedecke auf Boden und Pflanzen haben könnte, wird hier der Schnee mittels Heizlampen künstlich abgeschmolzen. Eine Webcam gibt den Wissenschaftlern den Überblick über die aktuelle Schneelage – per Internet können nach Bedarf Heizdrähte und -lampen eingeschaltet werden.

Zwei Kilometer entfernt und 30 Meter tiefer liegt im Funkloch die letzte Messfläche, ein Niedermoor. Am „Schlößnerbrunnen“ manipuliert die DFG-Forschergruppe „Bodenprozesse“ den Wassergehalt von Moorböden und untersucht die Aus-



Beschilderung der Messflächen, hier vom Coulissenhieb II

AUTORIN



Dr. Birgit Thies

Birgit Thies hat in Bayreuth Geoökologie studiert und am Lehrstuhl Ökologische Modellbildung zum Thema Instationarität und räumliche Variabilität süddeutscher Abflusszeitreihen promoviert. Seit Ende 2007 arbeitet sie in leitender Funktion in der **Geschäftsstelle des BayCEER**, die sich unter anderem um die hier vorgestellten Messflächen am Waldstein kümmert (vgl. Seite 85).



Anemometer am Coulissenhieb II

wirkungen auf das Ökosystem. Hier bestand die größte Herausforderung darin, das Moor möglichst ohne Zerstörung begehbar zu machen, was durch hölzerne Stege gelungen ist.

Wie in der Forschung üblich, werden die Experimente mit Wiederholungen durchgeführt – so gibt es gleich drei Dächer zur Regenabschirmung und zehn Aufbauten zum Winter-Klimawandel. Durch Parallelmessungen wird die natürliche Variabilität der Messparameter statistisch abgeschätzt. Dem gleichen Zweck dienen „Kontrollflächen“, die nicht manipuliert werden, aber im Aufbau dem eigentlichen Experiment gleichen: So wurden sowohl Wärmelampen als auch leere Metallkegel installiert, die auf den Kontrollflächen für gleichen Lichteinfall und Lüftströmung sorgen.

Ein wichtiger Teil der Infrastruktur für die Forscher ist bei der Arbeit bei Wind und Wetter die Forsthütte, die gemeinsam mit den Waldarbeitern für Pausen genutzt wird. Das gegenseitige Interesse von Mitarbeitern der Bayerischen Forsten und Wissenschaftlern und der Austausch über die Vorhaben ist die Grundlage für eine gute Zusammenarbeit.

Im Rahmen der DFG-Forschergruppe „Dynamik von Bodenprozessen bei extremen meteorologischen Randbedingungen“ neu errichtete Dachkonstruktion



Gerhard Müller erklärt die Funktion eines Schaltkastens mit Datenloggern am Coulissenhieb II (Exkursion im Februar 2011)

VON DATEN ZU ERKENNTNISSEN

Die am Waldstein automatisch gemessenen Daten werden am BayCEER in einer Datenbank gespeichert, die Mitte der 90er Jahre entstand und von der BayCEER-Arbeitsgruppe EDV und Datenbanken stetig weiterentwickelt wird. Über verschiedene Schnittstellen können Wissenschaftler die Daten abrufen und analysieren.

Wasser- und Bodenproben von den Messflächen werden großteils im BayCEER-Labor für Chemische Analytik ausgewertet. Die Proben werden mittels Optischer Emissionsspektrometrie (ICP-OES) und Ionenchromatographie auf ein gutes Dutzend chemischer Elemente analysiert, die für die Stoffkreisläufe des Ökosystems Wald bedeutsam sind. Während im Winter routinemäßig in zwei Wochen vier bis acht Einzelproben zu bearbeiten sind, waren es während „heißer“ sommerlicher Messphasen auch schon 120 Proben im Monat. Die im Labor ermittelten Ergebnisse werden auf analytische Plausibilität geprüft und ebenfalls in der Messdatenbank gespeichert.

Nun gilt es, die zeitliche Entwicklung der gemessenen Parameter in Verbindung zu setzen. Mit den experimentell erzeugten Randbedingungen und weiteren externen Einflüssen können so neue Erkenntnisse über die Prozesse im Ökosystem Wald erlangt werden.

SCHICKSALSSCHLÄGE IN DER FORSCHUNG

Die wegen des einheitlichen Fichtenbewuchses ausgewählte Messfläche „Coulissenhieb II“ wurde im Januar 2007 vom Sturm Kyrill erfasst. Dieser riss viele Bäume um und schlug im weiteren Umfeld der Messflächen eine Tornadoschneise in den Forst. Tagelang war das Gebiet aus Sicherheitsgründen komplett gesperrt. Die Webcam zeigte den Forschern ein Mikado aus Baumstämmen, die Aufräumarbeiten dauerten mehrere Wochen. Auf den Sturm folgte der Borkenkäfer, für den das Totholz ein gefundenes Fressen war.

Inzwischen werden die durch den Windwurf entstandenen Gegebenheiten positiv genutzt: Im

des Klimawandels von den Forstbehörden verfolgt wird. Eine der Windwurfflächen wurde dazu auf Initiative des BayCEER mit Buchen bepflanzt und steht für zukünftige Experimente zur Verfügung. Vorausschauend Forschen steht in Zeiten sich än-

Auswirkungen des Sturmtiefs „Kyrill“ am Waldstein im Frühjahr 2007



Beschädigung der Dachkonstruktion nach Kyrill (Foto: Werner Borken)

Fokus eines zweiwöchigen Großexperiments des Forschungsprojekts EGER stehen in diesem Juni die sogenannten „Waldkanteneffekte“, bei denen Luftströmungen und Energieaustausch zwischen der neuen Schneise und dem verbliebenen Wald aufgezeichnet werden. Als Basis für intensive Messkampagnen wurde im Vorfeld die Stromleitung zum Weidenbrunnen verstärkt.

Weitere geplante Forschungsvorhaben nehmen bereits den Waldumbau in den Blick, der im Zuge

der klimatischer Rahmenbedingungen auf der Tagesordnung. Damit dies „vor der Haustür“ im Fichtelgebirge auch in Zukunft möglich sein wird, hat die Pflege der BayCEER-Messflächen und ihrer Infrastruktur einen hohen Stellenwert.

WEBLINKS

- DFG-Forschergruppe „Bodenprozesse“: www.bayceer.uni-bayreuth.de/fg_bp/
- Online-Daten vom Waldstein im Internet: www.bayceer.uni-bayreuth.de/bayceer/klimadaten



■ KLAUS-HOLGER KNORR

Auswirkungen des Klimawandels auf den Austrag gelöster organischer Substanz und Nitrat

IDENTIFIKATION DER QUELLEN UND MÖGLICHKEITEN DER VORHERSAGE

In einem gemeinsamen Forschungsvorhaben des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) und des Bayreuther Zentrums für Ökologie und Umweltforschung (BayCEER) wird den offenen Fragen zum Export gelöster organischer Substanz (DOC) und Nitrat aus dem Lehstenbach-Einzugsgebiet (Fichtelgebirge) auf den Grund gegangen. DOC und Nitrat stellen eine mögliche Gefährdung für Oberflächen- und Grundwasser bezüglich der Trinkwasserqualität dar, und sind ferner für die Ökologie von Oberflächengewässern von großer Bedeutung. In vielen bewaldeten Einzugsgebieten in Europa und Nordamerika wurde in den letzten Jahren ein Anstieg der DOC-Konzentrationen verzeichnet, dessen Ursachen nicht hinreichend verstanden sind. Im Rahmen des Projekts soll daher versucht werden, folgende ökologisch bedeutsame Fragestellungen zu klären:

1. Gibt es langfristige Veränderungen der Exporte von DOC und Nitrat?
2. Welche hydrologischen Parameter sind die wichtigsten Steuerungsfaktoren für den Export von DOC und Nitrat?
3. Welche Fließwege sind für den Export von DOC und Nitrat verantwortlich?
4. Wie werden sich die Exporte bei veränderten hydrologischen Randbedingungen in der Zukunft entwickeln?

Zur Klärung dieser Fragen wurden sowohl langzeitliche gewässerchemische Datenreihen als auch zeitlich hoch aufgelöste Messungen herangezogen. Die langzeitlichen Messungen (1989 bis heute) des Abflusses und einer Vielzahl von gewässerchemischen Parametern erfolgten durch das LfU, die kurzzeitlichen, hoch aufgelösten Messungen wurden und werden durch BayCEER-Mitarbeiter in den Jahren 2010 und 2011 durchgeführt. Aus den so erhobenen Daten soll ein verbessertes Verständnis über die Fließwege und Steuerungsfaktoren des DOC- und Nitratexports aus dem Lehstenbach-Einzugsgebiet gewonnen werden. Weiterhin sollen die Erkenntnisse eine Vorhersage des Exports von DOC und Nitrat in der Zukunft, insbesondere bei einer veränderten Niederschlagsverteilung, ermöglichen.

Bisher konnten anhand der Auswertung der Langzeitdaten Trends für DOC und Nitrat ermittelt werden. Auffällig ist der starke Anstieg von

DOC, der im Mittel ca. 0,3 Milligramm DOC pro Liter und Jahr betrug. Der Anstieg der DOC-Konzentrationen fand vor allem im Bereich der geringen und mittleren Abflüsse statt und weniger bei den extremen Abflussereignissen. Die Nitratkonzentrationen nahmen in den letzten Jahren ab und weisen nur einen sehr schwachen Zusammenhang zu den Abflusshöhen auf. Erste Ergebnisse zeitlich hoch aufgelöster Messungen zeigen, dass neben Niederschlag und Abflusshöhe vor allem die hydrologischen Vorbedingungen (z. B. die Höhe des Grundwasserspiegels) eine entscheidende Rolle bei der Mobilisierung und dem Transport von gelösten organischen Komponenten einnehmen.

Modellrechnungen weisen darauf hin, dass wesentliche Prozesse der Abflussbildung innerhalb vorfluternaher Feuchtgebiete stattfinden, und dass aus diesen gesättigten Flächen während Niederschlagsereignissen sehr schnell Abfluss oberflächlich bzw. oberflächennah entsteht. Von besonderer Bedeutung für den DOC-Export sind Moorstandorte, die in den oberflächennahen Schichten über ein hohes DOC-Mobilisierungspotenzial verfügen. Das Nitrat im Vorfluter stammt dagegen nicht aus den Feuchtgebieten, sondern aus vorfluterfernen Waldstandorten im Einzugsgebiet. Der primäre Transportweg des Nitrats erfolgt dabei über tiefere Grundwässer und wird erst mit hoher Zeitverzögerung abflusswirksam. Die Ergebnisse der aktuellen Untersuchungen bilden im weiteren Projektverlauf die Grundlage für Modellrechnungen und Szenarien der zukünftigen Entwicklung der DOC- und Nitratexporte bei veränderten hydrologischen Bedingungen.

Zukünftig werden vor allem zeitlich hochaufgelöste Messungen fortgeführt, um im Hinblick auf die Prozessidentifikation und die Modellierung, sowie die steuernden hydrologischen Prozesse eine verlässliche Datenbank zu schaffen. Besonderes Augenmerk liegt auch auf der Beprobung der Wintermonate, da sich die zeitliche Dynamik, bedingt durch tiefere Temperaturen und Ausbildung einer Schneedecke mit Schneeschmelze im Frühjahr, von der sommerlichen Dynamik unterscheidet. Nach Abschluss der Feldmessungen erfolgen schließlich Prognoserechnungen der DOC- und Nitratexporte unter veränderten hydrologischen und klimatischen Randbedingungen.

AUTOREN

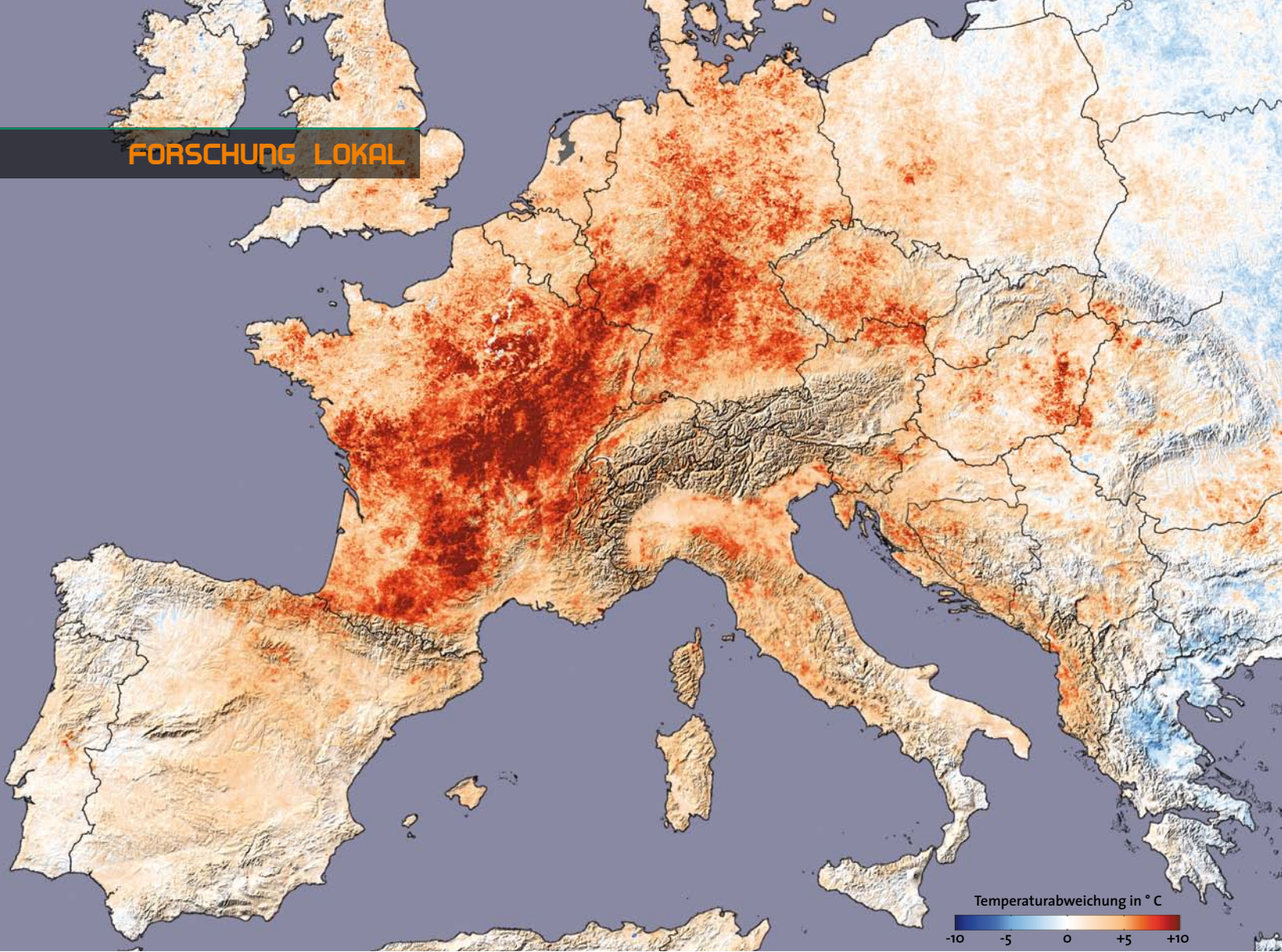
Dr. Klaus-Holger Knorr

leitet die **Limnologische Station** des **Lehrstuhls Hydrologie** an der Universität Bayreuth. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen in der biogeochemischen Prozessforschung und Untersuchung von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) in aquatischen Ökosystemen, wie Seen und Mooren.

Dr. Klaus-Holger Knorr hat den vorliegenden Artikel aus einem von nachfolgenden Autoren gemeinsam verfassten Bericht zusammen gestellt:
Sven Frei (wiss. Mitarbeiter, Lehrstuhl Hydrologie), Martin Reichert (wiss. Mitarbeiter, Lehrstuhl Bodenökologie), Prof. Egbert Matzner (Leiter des Lehrstuhls Bodenökologie).

- www.hydro.uni-bayreuth.de
- www.limno.uni-bayreuth.de





■ THOMAS FOKEN

Der Wald im Fichtelgebirge im Extremjahr 2003

ÖKOSYSTEM IST WIDERSTANDSFÄHIGER ALS MODELLE ZEIGEN

■ Differenz der Landoberflächentemperaturen in Kelvin aus wolkenfreien Tagen der Jahre 2000 - 2002 und 2004 im Vergleich zum Jahr 2003 für den Zeitraum 20. Juli bis 20. August, ermittelt aus MODIS Satellitendaten (Quelle: NASA, ETH Zürich).

Der Begriff des Extremas im Klimasystem ist relativ, da er immer auf einen bestimmten Zeitraum bezogen wird. Mit der anthropogenen Einflussnahme auf das Klimasystem, durch die Emission von Treibhausgasen und großflächiger Veränderung der Landnutzung, nehmen Forschungen zu Ökosystemen unter extremen Bedingungen einen breiten Raum ein. Die zusätzlichen Treibhausgase in der Atmosphäre bewirken einen schon 1896 durch Svante Arrhenius beschriebenen physikalischen Prozess, der sich durch die Zunahme der langwelligeren (atmosphärischen) Gegenstrahlung und der daraus folgenden Verringerung der Abkühlung an der Erdoberfläche durch langwellige (terrestrische) Ausstrahlung ausdrückt. Dieser Energiegewinn und die Transformation dieser Energie in andere Formen verursachen neue Fragenstellungen, welche die Klimaforschung beantworten muss. Als anthropogener Klimateffekt wird zumeist die Erhöhung des fühlbaren Wärmestroms, verbunden mit einer Temperaturerhöhung, wahrgenommen.

Jedoch ebenso wichtig ist die Erhöhung des latenten Wärmestroms und damit der Verdunstung, die zu zusätzlichen Niederschlägen und im Winter zu Schneefällen führen kann. Von einem Extrem wird dann gesprochen, wenn derartige Vorgänge über längerer Zeit anhalten oder kurzzeitig besonders intensiv sind. Somit wird klar, dass extreme Bedingungen sehr eng mit Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation in Verbindung stehen.

Für die Westwindzone der mittleren Breiten ist der ständige Wechsel von Hoch- und Tiefdruckgebieten im Abstand von vier bis sechs Tagen typisch – bekannt als Rossby-Wellen. Wenn diese Wellen stationär werden, sind bestimmte Gebiete längere Zeit einerseits durch warm-trockene und andererseits die benachbarten Gebiete (in zum Teil nur 1.000 bis 3.000 Kilometer Entfernung) zur selben Zeit durch kühl-feuchte Witterung beeinflusst.

Die Intensivierung dieser Effekte kann durch Klimaphänomene erfolgen, die in deutlich längeren Zeitskalen (Jahre und Jahrzehnte) wirken und durch Fernwirkungseffekte (Tele-Connection) auch entfernte Erdgebiete beeinflussen können. Diese außerordentlich komplexen und in hohem Maße nichtlinearen Vorgänge lassen sich am besten durch das Spektrum der atmosphärischen Turbulenz erklären (Abb. 1).

Der unmittelbare Austausch von Energie und Stoffen zwischen dem Ökosystem und der Atmosphäre findet in Zeitskalen von Sekunden bis mehrere 10 Minuten durch turbulente Wirbel mit einer Ausdehnung von Zentimetern bis mehreren Dekametern statt (siehe Betrag Foken et al., Seite 54). Die Intensität dieses Austausches wird durch die jeweilige Witterung (Hoch- und Tiefdruckgebiete) bestimmt und diese wiederum von einer Wirkung längerfristiger Klimafluktuationen (Sonnenaktivität, El Niño u. ä.) und damit verbundenen Fernwirkungseffekten.

AUTOREN

Prof. Dr. Thomas Foken



leitet die **Abteilung Mikrometeorologie** des BayCEER. Seit seiner Berufung vor fast 15 Jahren nach Bayreuth befasst sich Prof. Foken mit Fragen des Klimawandels und seinen Folgen speziell in Nordbayern. Lokalklima und Auswirkungen des Klimawandels auf Waldökosysteme sind sowohl Bestandteil der Lehre als auch ein Schwerpunkt der Forschungen.

Der Artikel wurde unter Mitwirkung folgender Co-Autoren erarbeitet:

- **Dipl. Geoökol. Andreas Buck**
- **Dr. Katharina Staudt**
- **Dr. Johannes Lüers**

Die Untersuchungen wurden im Forschungsprojekt EGER, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (FO 226 16-1 und 21-1, PAK 446), und im Rahmen von FLUXNET durchgeführt.

BESONDERS EXTREM WURDE IN MITTELEUROPA DAS JAHR 2003 EMPFUNDEN,

bei dem von März bis August übernormale Temperaturen vorherrschten und der Juni und August extrem heiß und trocken waren. Extreme sind somit in der Witterung von Wochen und Monaten zu finden. Jahresmittel und vor allem globale Mittelwerte, wie das bisher wärmste Jahr 2010, sind für ein spezifisches Ökosystem wenig aussagekräftig.

Wie sich solche extremen Perioden auf das Ökosystem auswirken, wird auch an der Universität Bayreuth intensiv untersucht, vorwiegend durch Manipulation einzelner Einflussgrößen wie längere Trockenheit oder Starkniederschläge. Dabei werden einzelne Wirkungspfade wie die chemische Umsetzung im Boden oder die Biodiversität erforscht (siehe Beiträge auf den Seiten 62 und 74). Um die Stoffumsetzungen im Ökosystem als Ganzes zu erfassen, d. h. vorrangig die Evapotranspiration und den Kohlendioxid-austausch durch Assimilation und Atmung zu bestimmen, wurde Anfang der 1990er Jahre mit dem Aufbau entsprechender Messstationen begonnen. Durch Messungen seit 1996 besitzt die Messsta-

tion das Jahr 2003 in Mitteleuropa für alle Ökosysteme ein extremes Ereignis war und beispielsweise nahezu flächendeckend deutlich niedrigere Netto-Kohlendioxidaufnahmen gemessen wurden (Ciais et al., 2005). Die Ursachen für einen solchen Effekt können dabei sehr vielfältig sein: von einer geringeren Wasserverfügbarkeit im Boden bis hin zu

geringerer Respiration und Assimilation bei erhöhten Temperaturen.

Von besonderer Bedeutung ist dabei die Untersuchung, ab wann das Puffervermögen des Ökosystems nicht mehr ausreicht, um die volle Funk-

tionsfähigkeit auch unter extremen Bedingungen zu gewährleisten. Dazu wurde in einer Diplomarbeit folgende Hypothese untersucht: Solange die gemessenen Ökosystemfunktionen (Wasser- und Kohlenstoffaustausch mit der Atmosphäre) der FLUXNET-Station mit einem umfassend parametrisierten Modell übereinstimmen, laufen die ökosystemaren Prozesse entsprechend den bekannten Schemata ab. Tritt jedoch eine Nichtübereinstimmung auf, so dominieren im Ökosystem Prozesse, die bislang noch nicht bekannt sind und somit im Modell auch nicht parametrisiert werden konnten. Daraus lässt sich postulieren, dass das Pufferverhalten des Ökosystems in seiner Gesamtheit aus pflanzenphysiologischen, mikrobiologischen und bodenphysikalischen Prozessen erheblich gestört ist. Zum Einsatz kam das sehr komplexe Atmosphären-Biosphären-Boden-Wechselwirkungsmodell ACASA (Abb. 3, Staudt et al., 2010), welches speziell für den Standort Waldstein-Weidenbrunnen auf der Grundlage von Messungen des Lehrstuhls für Pflanzenökologie angepasst wurde. Auch die komplizierten Austauschstrukturen im Wald sind umfassend durch die Abteilung Mikrometeorologie erfasst und überprüft worden.

Das Ergebnis der Untersuchung in Bezug auf die Netto-Kohlenstoffaufnahme (NEE: Net Ecosystem Exchange) ist in Abb. 4 dargestellt. Es zeigt sich, dass in allen Monaten eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und in-situ Messungen für die Kohlenstoffaufnahme vorhanden ist. Der sehr warme Monat Juni (Monatsmitteltemperatur: 17,5 °C) zeigt ebenfalls keine Abweichungen, so dass angenommen werden kann, dass das Puffervermögen des Ökosystems Fichtenwald in seiner Gesamtheit nicht beeinflusst war und auch die ökosystemaren Funktionen durch das Modell im Mittel gut wiedergegeben werden. Der kühlere

JAHRESMITTEL UND VOR ALLEM GLOBALE MITTELWERTE SIND FÜR EIN SPEZIFISCHES ÖKOSYSTEM WENIG AUSSAGEKRÄFTIG.

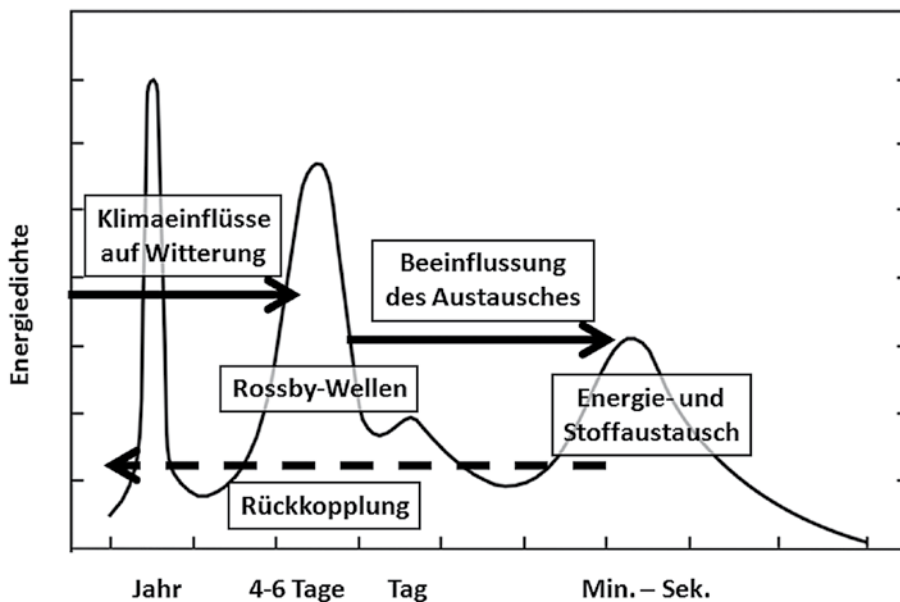


Abb. 1: Spektrum der Energiedichteverteilung atmosphärischer Vorgänge mit dem Energie- und Stoffaustausch in Zeitskalen von Sekunden bis unter einer Stunde, dem Wechsel der Zirkulationssysteme (Rossby-Wellen) und längeren klimatischen Prozessen sowie deren Einflussnahme auf die Austauschprozesse, wobei aber auch die hier nicht dargestellte Rückkopplung auf längeren Zeitskalen erfolgt.

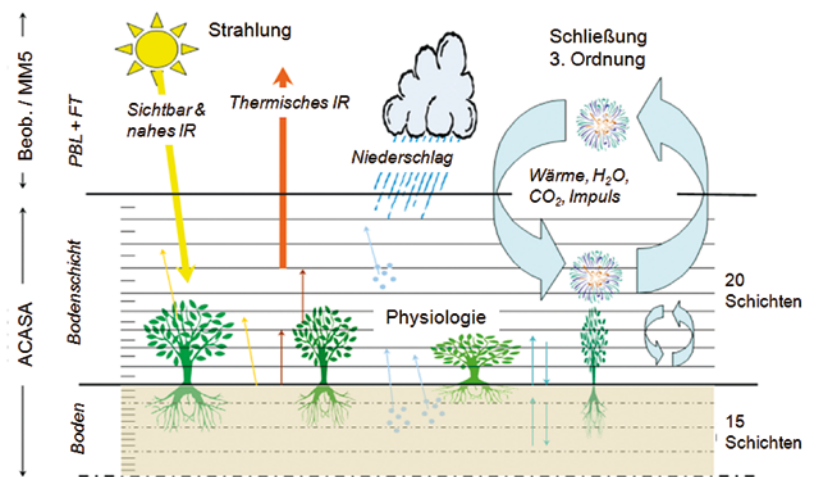
tion der Universität Bayreuth an der BayCEER-Messfläche am Waldstein-Weidenbrunnen im Fichtelgebirge (Abb. 2) eine der längsten Messreihen. Gemeinsam mit weltweit etwa 500 vergleichbaren Stationen wird die hiesige Messstation im internationalen Messprogramm FLUXNET zusammengefasst (Baldocchi et al., 2001). Die kontinuierliche Überwachung des Energie- und Stoffaustausches ermöglicht es, neben den üblichen Fluktuationen der Wechselwirkungsprozesse zwischen Atmosphäre und Ökosystem auch extreme Witterungsperioden zu überwachen. Somit war sehr schnell klar,



Abb.2: Messturm der FLUXNET-Station DE-Bay (Waldstein-Weidenbrunnen)

biet nach heutigem Wissensstand nicht zu erwarten. Dementsprechend kann das Aufeinanderfolgen bestimmter extremer Ereignisse durchaus zu extremen Funktionen im Ökosystem führen. Für die zukünftige Forschung wird eine Kombination aus Langzeitbeobachtungen des Ökosystems als Ganzes und Einzeluntersuchungen (vorwiegend durch Manipulation von Einflussgrößen) sowie entsprechenden Modellierungen eine wichtige Rolle spielen. Bei der Manipulation sollten gezielt bestimmte Transportpfade des Energie- und Stoffaustausches untersucht werden.

Abb. 3: Schematischer Aufbau des Modells ACASA. Der atmosphärische Antrieb erfolgt durch Messdaten oder meso-skalige Modelle (u.a. MM5)



und feuchtere Monat Juli (Monatsmitteltemperatur: 16,0 °C) brachte aber für das Ökosystem nicht die gewünschte Erholung. Im Monat August (Monatsmitteltemperatur: 19,1 °C) nahm die Netto-Kohlenstoffaufnahme insbesondere im Modell weiterhin ab. Modell und Messungen stimmten folglich nicht mehr überein. Die Analyse zeigte im Detail, dass das Modell insbesondere die Bodenrespiration bei den erneut hohen Temperaturen und trockenen Bedingungen im August nicht richtig wiedergeben kann und die sich dabei im Boden abspielenden Prozesse nicht richtig parametrisiert sind.

Es wurde deutlich, dass Untersuchungen zum ökosystemaren Verhalten unter extremen Bedingungen sehr komplex sind und einzelne Trockenperioden (Juni 2003) vom Ökosystem durchaus kompensiert werden können. Deutlich über vier Wochen hinausgehende Trockenperioden sind auch in zukünftigen Klimaszenarien für unser Ge-

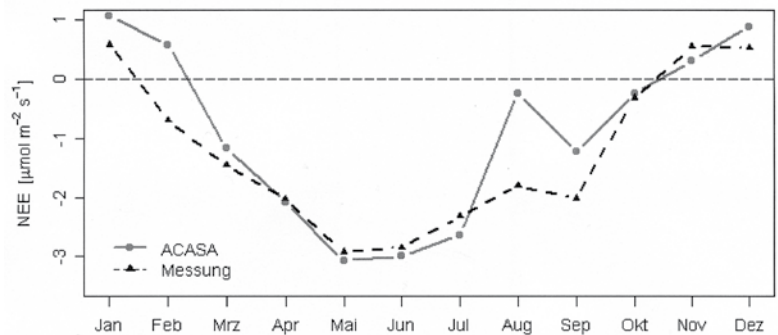


Abb. 4: Verlauf der Gesamtkohlenstoffaufnahme (NEE: Net Ecosystem Exchange, negativ dargestellt) im Jahr 2003. Im Monat August weichen die Ergebnisse mit dem Modell ACASA deutlich von den Messergebnissen ab.

LITERATUR

- Baldocchi, D. et al.: 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 (2001)
- Ciais, P. et al.: Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. Nature, 437: 529-533 (2005)
- Staudt, K; Falge, E; Pyles, RD; Paw U, KT; Foken, T: Sensitivity and predictive uncertainty of the ACASA model at a spruce forest site, Biogeosciences, 7, 3685-3705 (2010)

WEBLINKS

- www.bayceer.uni-bayreuth.de/mm
- www.bayceer.uni-bayreuth.de/eger
- www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet



■ THOMAS FOKEN

Komplizierte Austauschbedingungen in einem hohen Waldbestand

KOHLSTOFFSENKE „WALD“ NUR MIT ERHEBLICHEM AUFWAND QUANTIFIZIERBAR

■ Abb. 4: Schlanker 36 m hoher Messturm am Messfeld Waldstein-Weidenbrunnen zur Ermittlung der Kopplungszustände zwischen Atmosphäre und Ökosystem

Wälder stellen eine Senke im Kohlenstoffkreislauf auf der Erde dar. Damit ermöglichen sie es, dass ein beachtlicher Teil des anthropogen in die Atmosphäre emittierten Kohlenstoffes nicht in der Atmosphäre bleibt und somit auch nicht zur Klimaerwärmung beiträgt. Es besteht daher ein erhebliches politisches Interesse, diese Kohlendioxidmengen mit der gleichen Genauigkeit ermitteln zu können, wie die anthropogenen Emissionen bekannt sind. Dies ist aber eine erhebliche wissenschaftliche Herausforderung, da sich die Bestimmung des Kohlendioxidtransportes als außerordentlich kompliziert erweist. Die Abteilung Mikrometeorologie hat sich in den letzten mehr als 10 Jahren nicht nur um die Verbesserung der Messungen sondern auch um das genauere Verstehen des Transportprozesses bemüht. Um die komplizierten Bedingungen für den Austausch (Flüsse) von Energie und Stoffen – dies schließt auch Wasserdampf (Verdunstung) und Kohlendioxid (Assimilation, Atmung) ein – darstellen zu können, sind einige einführende Bemerkungen zum Transportprozess in der Atmosphäre nötig. Wie in anderen Medien gilt die generelle Gleichung:

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Flussdichte} \\ \text{(Fluss pro Flächen-} \\ \text{und Zeiteinheit)} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{Diffusions-} \\ \text{koeffizient} \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|} \hline \text{Vertikaler} \\ \text{Konzentrations-} \\ \text{gradient} \\ \hline \end{array}$$

Dabei kommt beispielsweise im Boden ein molekularer Diffusionskoeffizient zur Anwendung, der sehr klein ist. Im Gegensatz dazu sind die vertikalen Gradienten sehr groß. Beispielsweise ist die Kohlendioxidkonzentration in den Bodenporen erheblich größer als in der Atmosphäre. Derartige Bedingungen herrschen in der Atmosphäre nur im untersten Millimeter unmittelbar am Boden und an den Pflanzenteilen. Darüber findet der Austausch in turbulenten Wirbeln mit räumlichen Ausdehnungen von Zentimetern bis Dekametern statt. Dieser Austausch ist etwa 100.000fach effektiver als der molekulare Austausch. Somit ist es beispielsweise möglich, dass sich die Atmosphäre durch den fühlbaren Wärmestrom im Tagesgang bis zu einer Höhe von mehreren 100 m erwärmen kann, während der Jahresgang der Temperatur im Boden in 10-15 m Tiefe kaum noch feststellbar ist. Treibende Kräfte für diesen turbulenten Austausch sind der vertikale Windgradient, der den turbulenten Diffusionskoeffizienten bestimmt, und der vertikale Dichtegradient. Dieser wird nur unwesentlich durch die vertikale Verteilung von Spu-

renstoffen (Kohlendioxid) modifiziert sondern im Wesentlichen durch die Temperatur- und Feuchteverteilung bestimmt, wodurch jeder Stofftransport unmittelbar an den Wärme- und Feuchtetransport (fühlbarer und latenter Wärmestrom) gekoppelt ist. Die typischen Temperaturverteilungen im Wald sind in Abb. 1 dargestellt. Für den Austausch besonders effektiv ist labile (unten wärmer als oben) Schichtung am Tag über dem Waldbestand und in der Nacht schwach ausgeprägt im Stammraum. Bei stabiler Schichtung (unten kühler, oben wärmer) tritt hingegen kaum Austausch auf, und die emittierten Gase (z. B. Kohlendioxid aus Bodenatmung) können sich bodennah sehr hoch aufkonzentrieren. Dies hat zur Folge, dass der Gradient in der molekularen Schicht der Atmosphäre und im Boden abgeschwächt wird und somit der Austausch zum Erliegen kommt.

Ein weiteres Phänomen intensiviert den Austausch über hoher Vegetation. Durch die hohe Rauigkeit der Wälder nimmt oberhalb der Kronenoberkante die Windgeschwindigkeit sehr stark zu, was zur Ausbildung einer Verwirbelungsschicht (Kelvin-Helmholtz-Instabilität) führt. Verwirbelungsschicht und labile Schichtung führen zu einer Abnahme aller Gradienten über dem Wald, obwohl der Stofffluss zunimmt. Somit muss obige Gleichung durch zwei Korrekturfunktionen, die kleiner 1 sind, modifiziert werden:

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Flussdichte} \\ \text{(Fluss pro Flächen-} \\ \text{und Zeiteinheit)} \\ \hline \end{array} = \frac{\begin{array}{|c|} \hline \text{Diffusions-} \\ \text{koeffizient} \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|} \hline \text{Vertikaler} \\ \text{Konzentrations-} \\ \text{gradient} \\ \hline \end{array}}{\begin{array}{|c|} \hline \text{Korrektur-} \\ \text{funktion} \\ \text{Schichtung} \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|} \hline \text{Korrektur-} \\ \text{funktion} \\ \text{Verwirbelung} \\ \hline \end{array}}$$

Im Gegensatz zu niedriger Vegetation ist die Energieumsatzfläche zwischen Atmosphäre und Ökosystem beim Wald nicht mehr als ebene Fläche approximierbar. Es muss vielmehr ein Volumenelement betrachtet werden. Die Mikrometeorologie ist mittels der sogenannten Eddy-Kovarianz-Methode in der Lage, Energie- und Stoffflüsse oberhalb des Bestandes zu messen. Dabei wird über alle Wirbel („eddies“) gemittelt, die innerhalb einer bestimmten Zeiteinheit (in der Regel 30 Minuten) das Messsystem passieren (siehe Beitrag Foken et al. im gleichen Heft). Somit wird ein größeres Gebiet (z.T. mehrere Quadratkilometer) erfasst, und man spricht hierbei vom sogenannten Footprintbereich, der ebenfalls von Windgeschwindigkeit und Stabilität abhängt und zur Lokalisierung der Messun-

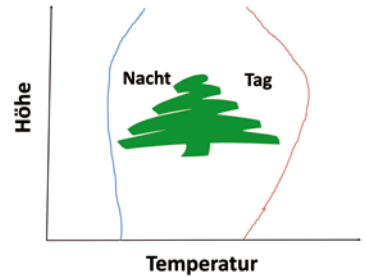


Abb. 1: Typische Temperaturverteilung in einem Wald am Tag und in der Nacht

AUTOREN

Der Artikel wurde unter Mitwirkung folgender Co-Autoren erarbeitet:

- Dr. Andrei Serafimovich
- Dipl.-Geoökol. Lukas Siebicke
- Prof. Dr. Cornelius Zetzsch
- Prof. Dr. Franz X. Meixner

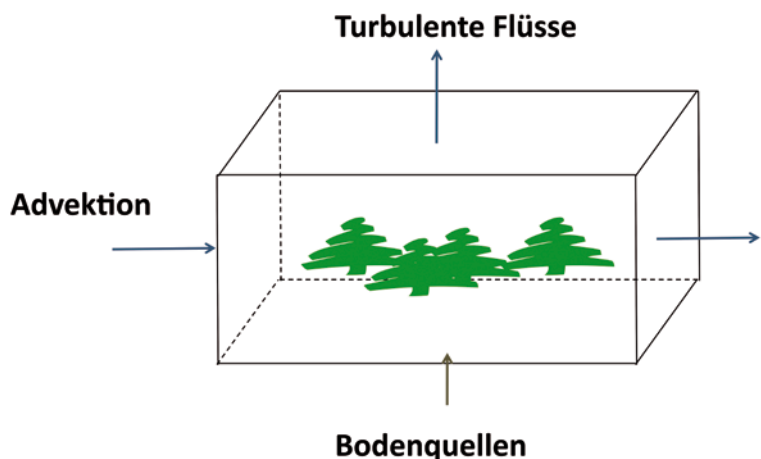


Abb. 2: Schematische Darstellung des Volumenelementes Wald, an dessen Oberkante die Assimilations- und Respirationen als Summe gemessen werden können

gen exakt bestimmt werden muss. Da im Wald und insbesondere im Stammraum keine Windstille herrscht, werden mit diesem Windfeld in das Volumenelement (Abb. 2) Gaskonzentrationen hinein oder heraus transportiert (Advektion). Ob dies zu einer Stoffanreicherung oder -abreicherung führt, hängt von der Konvergenz oder Divergenz des Windfeldes ab. Advektive Vorgänge konnten aus horizontalen Gradienten trotz umfangreicher Experimente nicht eindeutig bestimmt werden (Aubinet et al., 2008).

Nach diesen Betrachtungen wird offensichtlich, dass es am Tage wegen der vorhandenen stabilen Schichtung keinen Stofftransport im Stammraum und in der Nacht über der Krone geben müsste. Das ist allerdings nicht der Fall. Verantwortlich dafür sind die durch die Verwirbelungsschicht entstehenden kohärenten Strukturen. Dies sind ebenfalls turbulente Wirbel, die den Bestand recht schnell durchdringen können und mit einer gewissen Regelmäßigkeit auftreten - im Gegensatz zu den sonst zufällig verteilten Wirbeln. Der Austausch über kohärente Strukturen kann in der Nacht bis 100 % und am Tage etwa 20 % Anteil am Gesamtaustausch haben (Thomas und Foken, 2007). Im Jahre 2008 wurde an der BayCEER-Messfläche Waldstein-Weidenbrunnen der Versuch unternommen, kohärente Strukturen in die Betrachtung von advektiven Vorgängen einzubeziehen (Siebicke, 2011). Abbildung 3a zeigt für das unmittelbare Messfeld die Zusammensetzung der Bodenvegetation und Abb. 3b die dazugehörige Verteilung des Plant-Area-Index (Pflanzenoberfläche pro horizontales Flächenelement). Es zeigt sich eine starke Heterogenität in der Bestandesdichte, die sich an den lichten Stellen wiederum durch eine stärkere Bodenbedeckung ausdrückt. In diesem Bestand wurden an verschiedenen Stellen Turbulenzmessungen durchgeführt, sowohl auf gleicher

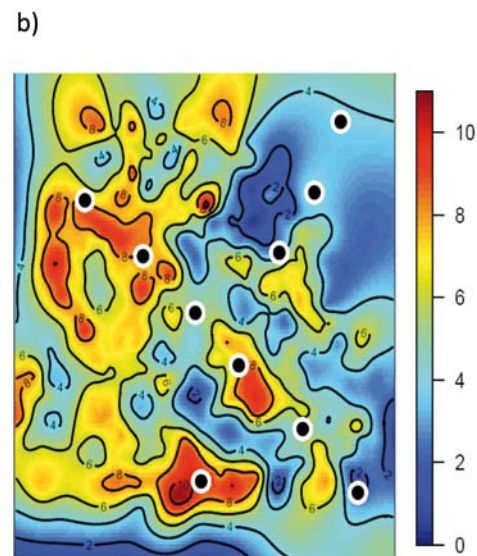
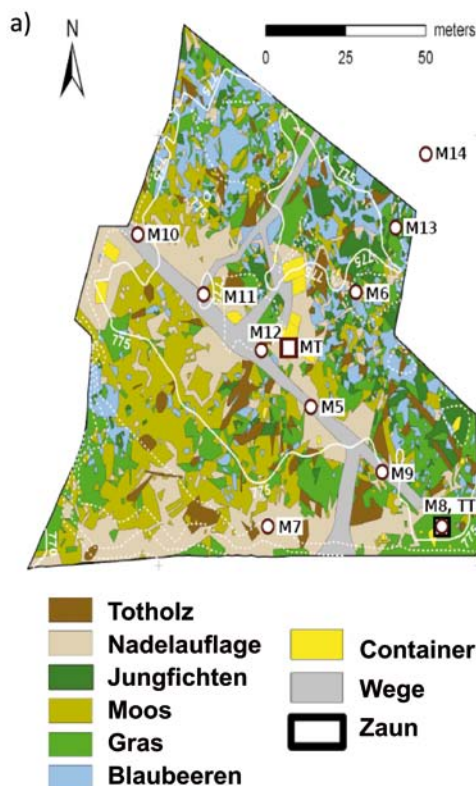


Abb. 3: a) Bodenbewuchs an der Messfläche Waldstein-Weidenbrunnen mit eingezeichneten Höhenlinien und Messpunkten (Darstellung von T. Behrendt, MPI Mainz), b) Pflanzenbedeckungsindex (Pflanzenoberfläche pro Bodenoberfläche) an der Messfläche Waldstein-Weidenbrunnen mit eingezeichneten Messpunkten im gleichen Maßstab wie a)

Höhenlinie als auch in einem geneigten Profil, um katabatische Luftmassenbewegungen (Abfließen kalter Luft auf Grund der Schwerkraft) erfassen zu können. Im Ergebnis einer hier nicht näher erläuterten Analyse (Wavelet-Methode) konnte gezeigt werden, dass an den lichten Waldstellen kohärente Strukturen nicht nur kräftiger sind und tiefer in den Bestand eindringen sondern auch länger anhalten. An diesen Stellen wird Kohlendioxid in den Wald transportiert bzw. veratmetes Kohlendioxid wieder heraus transportiert. In den dichteren Waldbeständen sind dagegen durch die Atmung höhere Konzentrationen typisch. Die dadurch entstehenden horizontalen Gradienten sind also nicht advektiven Prozessen zuzuordnen sondern vertikalen Austauschprozessen durch kohärente Strukturen.

Wesentlich für diese Betrachtungsweise war eine in den letzten 10 Jahren in der Abteilung Mikrometeorologie entwickelte Klassifizierung der Kopplung zwischen Atmosphäre und Biosphäre (Thomas und Foken 2007). Es bedarf dazu Messungen über und innerhalb des Waldbestandes (Abb. 4). In der Nacht herrscht weitgehend keine Kopplung vor und nur wellenartige Zustände sind über dem Wald zu beobachten. Am Tage treten zunehmend kohärente Strukturen in den Bestand ein. Die Zeit mit völliger Kopplung zwischen allen Bestandesschichten und der Atmosphäre beträgt in der Regel jedoch nur wenige Stunden. Mit diesem Kopplungsschema war es in den letzten Jahren möglich, im Rahmen des EGER-Projektes (ExchanGE processes in mountainous Regions) auch den Transport von reaktiven Spurenstoffen im Wald zu untersuchen. Dadurch wurde es machbar, Perioden mit starker Entkopplung (chemische Reaktionen dominieren vor turbulentem Stoffaustausch) von gut durchmischten Perioden (turbulenter Transport erfolgt schneller als Reaktionschemie) eindeutig zu trennen.

Um den Prozess der turbulenten Transporte in einem Wald komplett zu verstehen, muss auch die etwa 1 km starke atmosphärische Grenzschicht oberhalb des Waldes untersucht werden. Abbildung 5 zeigt gegen 23 Uhr eine Konzentrationszunahme von Ozon, die auf Schwerewellen zurückzuführen ist, welche an einem nahe gelegenen Berg entstanden sind. Eine weitere Konzentrationszunahme ist auf die Verstärkung des Windgradienten und damit des turbulenten Diffusionskoeffizienten nach Mitternacht zurück zu führen. Dieser ist mit einem Low-Level-Jet (LLJ, Starkwindband) in etwa 200 - 400 m Höhe gekoppelt. In etwa 20 - 30 %

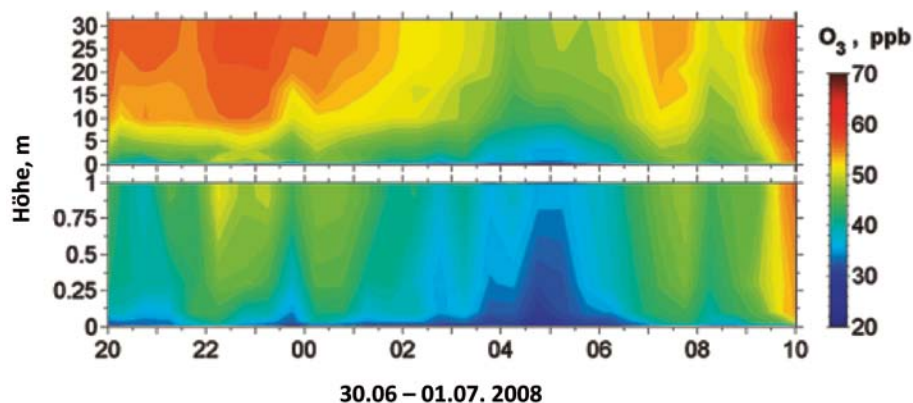


Abb. 5: Verteilung der Ozonkonzentration in und über dem Wald (Höhe 25 m, Höhenachse im unteren Meter gestreckt) am Messpunkt Waldstein-Weidenbrunnen. Ozon wird aus der Atmosphäre in den Wald eingemischt durch brechende Schwerewellen (22 - 23 Uhr) und einen Low-Level-Jet (nach Mitternacht)

aller Nächte dreht am Waldstein nach Mitternacht der Wind nach Osten (aus dem Weißenstädter Becken). In Folge kommt es in der stabil geschichteten Luftmasse zur Ausbildung dieses LLJ, der auch den bodennahen turbulenten Austausch maßgeblich beeinflusst. Ozon eignet sich als Tracer besonders gut, da es im Gegensatz zu Kohlendioxid keine Bodenquelle besitzt. Die Ozonzunahme ist jedoch eng gekoppelt mit einer Kohlendioxidkonzentrationsabnahme durch Einmischen von oberhalb des Bestandes befindender Luft.

Dieser Beitrag konnte nur einen ersten Eindruck über die sehr komplexen Austauschbedingungen in einem Waldökosystem bringen. Detailliertere Ausführungen können den zahlreichen Fachpublikationen und einer zweistündigen Vorlesung, welche zu dieser Thematik jeweils im Sommersemester im Masterstudiengang Geoökologie angeboten wird, entnommen werden. Da der Energie- und Stoffaustausch zwischen Atmosphäre und Biosphäre ein außerordentlich komplexes Problem ist und andererseits die Biosphäre eine wesentliche Rolle im Klimasystem im Hinblick auf eine mögliche Senkenfunktion für Treibhausgase spielt, setzen hier weltweit umfangreiche Forschungsprogramme an, die sehr gute Perspektiven für junge Wissenschaftler bieten.

INFO

Die Untersuchungen wurden im Forschungsprojekt EGER (www.bayceer.uni-bayreuth.de/eger/), gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (FO 226 16-1 und 21-1, ME 2100/4-1 und 5-1, ZE 792/4-1; PAK 446), durchgeführt.

LITERATUR

- Aubinet, M., 2008. Eddy covariance CO₂ flux measurements in nocturnal conditions: An analysis of the problem. *Ecological Application*, 18: 1368-1378.
- Siebicke, L., 2011: Advection at a forest site - an updated approach, PhD-Thesis, Universität Bayreuth.
- Thomas, C. and Foken, T., 2007. Flux contribution of coherent structures and its implications for the exchange of energy and matter in a tall spruce canopy. *Boundary-Layer Meteorology*, 123: 317-337.



■ ANDREAS HELD

Bananen im Fichtelgebirge

WÄLDER ALS QUELLE UND SENKE FÜR FEINSTAUB

■ Abb. 1: „Blauer Dunst“ über den Great Smoky Mountains, USA. Foto: privat

Seit im Jahre 2005 mit der sogenannten Feinstaub-Richtlinie europaweit verschärfte Grenzwerte zur Überwachung der Luftqualität eingeführt wurden, wird immer wieder auch in der breiten Öffentlichkeit über die Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit durch erhöhte Feinstaubbelastungen diskutiert. Unter Feinstaub versteht man dabei luftgetragene Aerosolpartikel mit einem Durchmesser von weniger als 10 Mikrometern (PM10). Diese kleinen Tröpfchen und festen Teilchen schweben in der Luft und sind so klein, dass sie mehrere Tage in der Atmosphäre verbleiben können, bevor sie typischerweise durch Regen ausgewaschen werden. In der Vergangenheit sind in epidemiologischen Studien tatsächlich Zusammenhänge zwischen einer erhöhten Feinstaubbelastung und einer erhöhten Zahl an Atemwegserkrankungen oder Herz- und Kreislaufbeschwerden festgestellt worden. Aerosolpartikel belasten jedoch nicht nur die menschliche Gesundheit, sondern spielen auch eine wichtige Rolle für viele chemische Reaktionen in der Atmosphäre und sind von entscheidender Bedeutung für unser Klima. Im Gegensatz zu den Treibhausgasen, die zur globalen Klimaerwärmung beitragen, kühlen Aerosolpartikel tendenziell die Atmosphäre und wirken so dem globalen Erwärmungstrend entgegen. Allerdings sind die genauen Prozesse und Rückkopplungsmechanismen bisher nur unvollständig verstanden, so dass sich die tatsächliche abkühlende Wirkung nicht exakt beziffern lässt.

WAS HABEN NUN WÄLDER MIT DER FEINSTAUBBELASTUNG UNSERER ATMOSPHERE ZU TUN?

Entgegen der landläufigen Meinung, dass Feinstaub in erster Linie durch den Menschen verursacht wird, stammen grob geschätzt mehr als 85 % der weltweit in die Atmosphäre eingetragenen Feinstaubmasse aus natürlichen Quellen. Neben den Ozeanen und Wüsten sind auch Wälder regional wichtige Quellen für Feinstaub.

Jedem ist der typische Nadelwaldduft während eines Waldspaziergangs vertraut. Dieser Duft ist eine komplexe Mischung verschiedenster chemischer Verbindungen, die von den Bäumen und anderen Pflanzen in die Luft abgegeben werden.

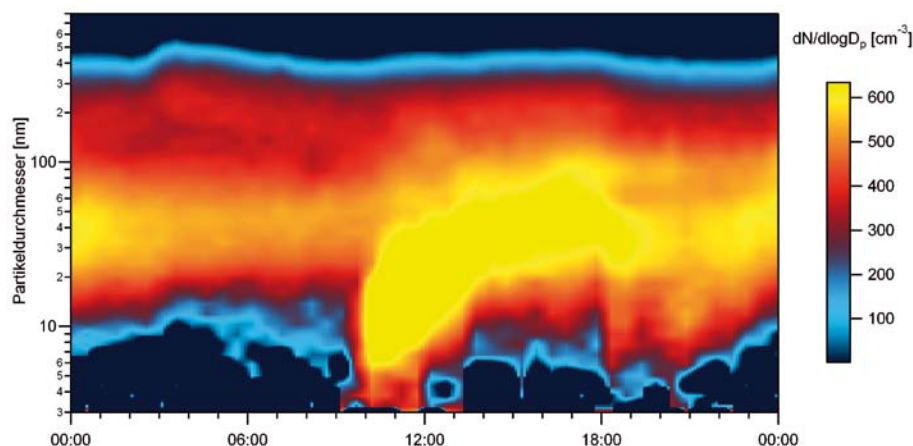


Abb. 2: „Nukleationsbanane“: Entwicklung der Partikelgrößenverteilung während eines Partikelneubildungsereignisses am 03. Juli 2002 im Fichtelgebirge.

Die sogenannten leichtflüchtigen organischen Verbindungen, beispielsweise Terpene, werden in der Atmosphäre rasch oxidiert und reagieren zu Verbindungen, die unter geeigneten Bedingungen neue Aerosolpartikel bilden können. Dieser Prozess der Partikelneubildung aus natürlich freigesetzten organischen Verbindungen wurde schon vor Jahrhunderten beobachtet und beschrieben. So gaben zum Beispiel die Cherokee-Indianer den dicht bewaldeten Great Smoky Mountains den Namen Shalona, Ort des blauen Nebels. Auch die Namen anderer Landschaften wie der Blue Ridge Mountains oder der Blue Mountains lassen darauf schließen, dass hier häufig bläulicher Dunst über den Wäldern liegt (Abb. 1). Vor etwa 50 Jahren wurde dieses Phänomen zum ersten Mal wissenschaftlich beschrieben. Nach der Oxidation leichtflüchtiger organischer Verbindungen, die von den Bäumen abgegeben werden, bildet sich ein bläu-

AUTOR

Prof. Dr. Andreas Held

Seit 2009 betreibt Andreas Held als **Junior-professor für Atmosphärische Chemie** an der Universität Bayreuth experimentelle Aerosolforschung. Zentrale Fragestellungen der aktuellen Forschungsarbeiten sind die Quantifizierung des partikelgebundenen Stoffaustausches zwischen der Biosphäre und der Atmosphäre sowie die Identifizierung und Aufklärung von Prozessen, die zur sekundären Aerosolbildung in der Atmosphäre beitragen.



WEBLINK

- www.bayceer.uni-bayreuth.de/atmos

lich schimmernder Nebel aus winzigen Aerosolpartikeln, an denen ganz besonders der blaue Anteil des Sonnenlichts gestreut wird.

In den letzten Jahrzehnten wurden einige wichtige Prozesse und chemische Reaktionen der Partikelneubildung in der Atmosphäre intensiv erforscht. Jedoch sind die sogenannten Nukleationsereignisse bis heute noch nicht vollständig verstanden und erklärt. Nahezu überall auf der Welt konnten Nukleationsereignisse über Wäldern beobachtet werden, bei denen natürliche Emissionen leichtflüchtiger organischer Verbindungen eine entscheidende Rolle spielen. Die neu gebildeten Partikel besitzen Durchmesser von wenigen Nanometern und wachsen im Laufe weniger Stunden rasch zu größeren Partikeln an. Das Partikelwachstum während eines typischen Neubildungsereignisses (Abb. 2) wird aufgrund seiner charakteristischen Entwicklung auch als „Nukleationsbanane“ bezeichnet. Im Fichtelgebirge konnten bei ersten Messungen im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes BEWA2000 an etwa jedem fünften Sommertag typische „Nukleationsbananen“ beobachtet werden. Die ausgedehnten Nadelwaldflächen der Ostbayerischen und Thüringisch-Fränkischen Mittelgebirge setzen besonders bei Sonnenschein und warmen Temperaturen große Mengen leichtflüchtiger organischer Verbindungen frei, die zum Wachstum neu gebildeter Partikel beitragen. In einer Untersuchung der Universität Bayreuth wurde gezeigt, dass das beobachtete Partikelwachstum über dem Fichtelgebirge nur erklärt werden kann, wenn man einen beträchtlichen Beitrag von bis zu 90 % durch natürlich freigesetzte organische Verbindungen annimmt.

Allerdings spielen Wälder neben ihrem Beitrag zur natürlichen Partikelneubildung und zum raschen Partikelwachstum auch eine wichtige Rolle bei der Entfernung von Feinstaub aus der Atmosphäre. So können in Nadelwäldern mit einem dichten Kronenraum und großer Nadeloberfläche luftgetragene Aerosolpartikel sehr effektiv aus der Atmosphä-

re ausgekämmt werden. Zudem ist der Austausch zwischen der Atmosphäre und der Boden- oder Pflanzenoberfläche über Wäldern im Allgemeinen stärker als über freien ebenen Flächen. Tatsächlich wurde auch im Fichtelgebirge häufig eine starke Deposition von Aerosolpartikeln, also eine Entfernung von Feinstaub aus der Atmosphäre, beobachtet und gemessen. Da diese Depositionsprozesse jedoch recht komplex sind und sehr stark von der Größe der einzelnen Partikel abhängen, sind aufwendige Messverfahren notwendig, um den partikulären Eintrag von Spurenstoffen in Wälder zuverlässig abschätzen zu können.

AUCH IM FICHELGEBIRGE WURDE HÄUFIG EINE ENTFERNUNG VON FEINSTAUB AUS DER ATMOSPHERE BEOBACHTET.

Die Untersuchungen der letzten Jahre deuten darauf hin, dass Wälder in den meisten Fällen eine Senke hinsichtlich der Partikelmasse sind, aber häufig eine regional bedeutende

Quelle hinsichtlich der Partikelzahl. Da wir jedoch bis heute nicht vorhersagen können, wann wie viele neue Partikel durch natürliche Emissionen aus Wäldern gebildet werden, ist eine Abschätzung des Einflusses dieser Partikelquelle auf das Klima sehr schwierig. Um die bestehenden Wissenslücken zu schließen, bearbeiten wir an der Universität Bayreuth momentan eine Reihe von Projekten. So werden in verschiedenen Master- und Doktorarbeiten einzelne Aspekte der Partikelneubildung in Smogkammer-Simulationen (Abb. 3) detailliert im Labor untersucht. Mit einem neu angeschafften Partikelgrößen-Spektrometer sollen ab diesem Frühjahr im Fichtelgebirge regelmäßig natürliche Partikelneubildungsereignisse identifiziert und charakterisiert werden. Und schließlich wird aktuell im Rahmen einer Doktorarbeit eines der weltweit ersten Messinstrumente entwickelt, das in der Lage sein wird, die chemische Zusammensetzung der neugebildeten Aerosolpartikel direkt vor Ort zu analysieren. Von der direkten Bestimmung der beteiligten chemischen Verbindungen erhoffen wir uns weitreichende Einblicke in die Partikelneubildungsprozesse über Wäldern und einen großen Schritt in Richtung einer Vorhersagbarkeit dieser Ereignisse.



Abb. 3: Partikelneubildung im Labor: Durch Oxidation natürlicher organischer Verbindungen entsteht unter kontrollierten Bedingungen eine Feinstaubwolke.
Foto: Johannes Ofner

Arbeitsgruppe EDV und Datenbanken

Die Arbeitsgruppe im Gebäude des ehemaligen BITÖK in der Dr.-Hans-Frisch-Straße unterstützt – neben der klassischen Betreuung mehrerer Linux-Server – die Forschung im BayCEER in folgenden Bereichen:

MANAGEMENT DER FREILANDDATEN

In der Umweltforschung sind über lange Zeiträume erfasste Daten wichtig, um die langfristige Entwicklung von Ökosystemen zu erforschen. Am BayCEER werden deshalb sämtliche Sensordaten aus den Versuchflächen in einer zentralen **Messreihendatenbank** gespeichert. Diese bietet einen unschätzbaren Mehrwert für Wissenschaftler. Statt der sonst oftmals heterogenen Dateisammlungen ermöglicht die Datenbank eine einheitliche Sicht auf alle Messwerte inklusive ihrer Metainformationen wie Standort, Einheit und Messgröße. Die Reproduzierbarkeit von Forschungsergebnissen ist damit sichergestellt.

Analysen über mehrere Jahrzehnte sind mit Hilfe der beiden Programme **GOAT** oder BayEOS-R jederzeit möglich. Der „GOAT Messdaten-Browser“ wurde von Oliver Archner (links im Bild) vollständig mit frei erhältlichen Komponenten in Java realisiert. Die Wissenschaftler visualisieren und editieren mit der Software über das Internet Messdatenreihen und die zugehörigen Metainformationen – auch große Datenmengen lassen sich so bearbeiten. Aufgrund der steigenden Popularität der Statistik Software R an der Universität entschied sich die Arbeitsgruppe 2011 einen eigenen Client für R zu entwickeln. Das R-Paket gibt Wissenschaftlern die komfortable Möglichkeit, alle Daten, die auch mit GOAT einsehbar sind, direkt in R einzulesen. Umwege über Export- und Import Dateien können so entfallen.

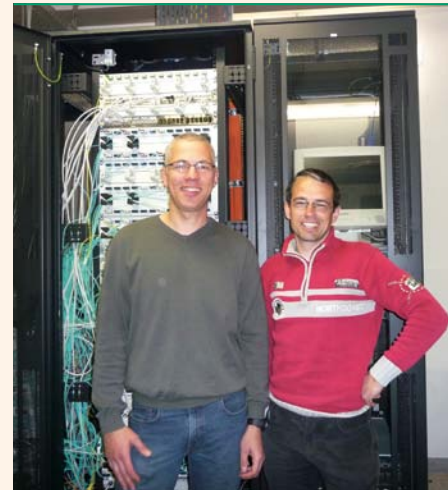
WEBSEITEN IM BAYCEER

Die Anfänge des datenbankgestützten Content Managementsystems für Lehrstühle und Institutionen reichen bis 2002 zurück. Das **BayCMS** wird von Dr. Stefan Holzheu (rechts im Bild) seitdem ständig

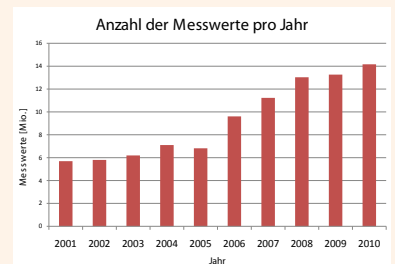
weiterentwickelt. Der Schwerpunkt des Systems liegt in der datenbanktechnischen Erfassung von typischen Lehrstuhldaten wie Mitarbeitern, Publikationen, Projekten und Lehrveranstaltungen. Hierdurch grenzt es sich gegen andere CMS-Systeme ab, die meist primär auf die Darstellung und Verwaltung von freien Inhalten optimiert sind. Als Datenbank kommt die OpenSource-Datenbank PostgreSQL zum Einsatz, die verwendete Skriptsprache ist PHP. Das BayCMS besitzt eine Synchronisationsfunktion zum UniCMS. BayCMS-Inhalte stehen damit auch im UniCMS zur Verfügung.

SOFTWARE FÜR DAS TAGUNGSMANAGEMENT

Aufbauend auf dem BayCMS bietet das **BayCONF** ein flexibles Tool für die Abwicklung von Tagungen. Teilnehmer können sich mit oder ohne Beitrag online anmelden, im internen Bereich Zusatzveranstaltungen buchen sowie ihr persönliches Tagungsprogramm zusammenstellen. Symposiumsleiter werden beim Review und der Ordnung der eingegangenen Beiträge unterstützt. Administratoren gestalten die Inhalte der Webseite, verwalten die Finanzen und verfassen Rundmails an ausgewählte Teilgruppen, sie generieren aus der Datenbank das Online-Programm und den Tagungsband. Bisher wurden mehr als 50 Tagungen und Workshops mit BayCONF-Unterstützung durchgeführt, darunter etwa die Hälfte an externen Institutionen.



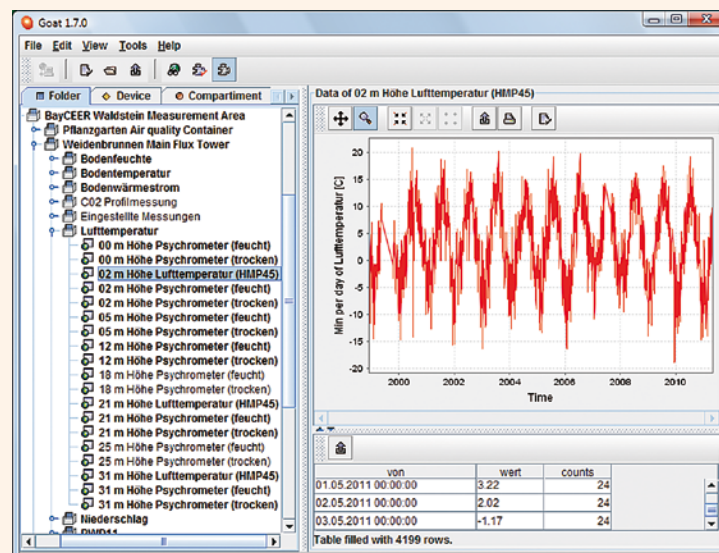
Die „Herren der Serverschränke“:
Oliver Archner und Dr. Stefan Holzheu



Entwicklung des Datenvolumens

WEBLINK

- www.bayceer.uni-bayreuth.de/edv



Screenshot
des Messda-
tenbrowsers GOAT



■ GERHARD GEBAUER

Lachgasproduktion und -konsumption in Fichtenwäldern bei Bodenfrost und Trockenheit

NICHT NUR KOHLENDIOXID TRÄGT ZUM GLOBALEN KLIMAWANDEL BEI

■ Dachkonstruktion auf den Versuchsflächen im Fichtelgebirge. Durch Verschließen der Dächer mit transparenten Polycarbonat-Platten wurde der Waldboden verlängerten Trockenperioden ausgesetzt. Foto: Egbert Matzner.

Die steigende Konzentration von Treibhausgasen in der Erdatmosphäre ist die primäre Ursache für den derzeit zu beobachtenden Klimawandel. Treibhausgase absorbieren von der Erdoberfläche abgegebene Wärmestrahlung und reflektieren einen Teil auf die Erdoberfläche zurück. Sie bewirken damit einen Temperaturanstieg. Zu diesen Treibhausgasen gehört insbesondere auch das als Lachgas bekannte Distickstoffmonoxid (N_2O). Die Lachgaskonzentration in der Erdatmosphäre ist in den letzten 200 Jahren um 18 % gestiegen. Ursachen für diesen Anstieg sind in erster Linie der weltweit kontinuierlich steigende Einsatz von Kunstdünger in der Landwirtschaft, der atmosphärische Eintrag reaktiver Stickstoffverbindungen auch in naturnahe Ökosysteme – wie etwa Wälder – und eine lange Verweildauer von Lachgas in der Atmosphäre. Lachgasmoleküle verbleiben im Durchschnitt 114 Jahre in der Erdatmosphäre, bis sie letztendlich in der Stratosphäre weiter umgesetzt werden.

Nitrat (NO_3^-) ist die Ausgangssubstanz für die Entstehung von Lachgas in Böden. Unter Sauerstoffmangel benutzen Mikroorganismen das Nitrat im Boden, um es zu Lachgas zu reduzieren. Lachgas kann aber auch von Mikroorganismen als Substrat für einen weiteren Reduktionsschritt zu Distickstoff (N_2) benutzt werden. Somit wird Lachgas in einer komplexen Abfolge von mikrobiellen Prozessen in Böden sowohl produziert als auch konsumiert.



Das Laborteam für Isotopen-Biogeochemie: Gudrun Elias-Mertel (inzwischen ausgeschieden), Gerhard Gebauer, Iris Schmiedinger, Isolde Baumann und Christine Tiroch.

Haubensystem zur Bestimmung des Lachgasaustausches zwischen Bodenoberfläche und Atmosphäre. Foto: Stefanie Goldberg.

AUTOR & INFO

Prof. Dr. Gerhard Gebauer

leitet im BayCEER das **Labor für Isotopen-Biogeochemie**. Zusammen mit dem Team dieser zentralen Einrichtung führt er für die Mitglieder des BayCEER Isotopenhäufigkeitsanalysen durch, berät die BayCEER-Mitglieder bei den verschiedensten Anwendungen stabiler Isotope in der Ökologie und Umweltforschung und setzt die Laborausstattung für Lehrveranstaltungen, Methodenentwicklung und eigene Forschungstätigkeit ein.



Das Laborteam für Isotopen-Biogeochemie: Gudrun Elias-Mertel (inzwischen ausgeschieden), Gerhard Gebauer, Iris Schmiedinger, Isolde Baumann und Christine Tiroch.

Als Folge des globalen Klimawandels werden für die Mittelgebirgsregionen in Mitteleuropa häufigere Frostwechselperioden im Winter und längere Trockenperioden im Sommer mit nachfolgenden Starkregenereignissen erwartet. Im Rahmen der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschergruppe 562 „Dynamik von Bodenprozessen bei extremen meteorologischen Randbedingungen“ wurden diese prognostizierten Witterungsextremereignisse während der letzten Jahre in einem Fichtenwald im Fichtelgebirge wie-

WEBLINKS

- www.bayceer.uni-bayreuth.de/Gebauer
- www.bayceer.uni-bayreuth.de/ibg

Schneeräumaktion auf den Versuchsflächen im Fichtelgebirge. Durch Entfernen der isolierenden Schneedecke wurde im Waldboden Bodenrost induziert. Foto: Egbert Matzner.



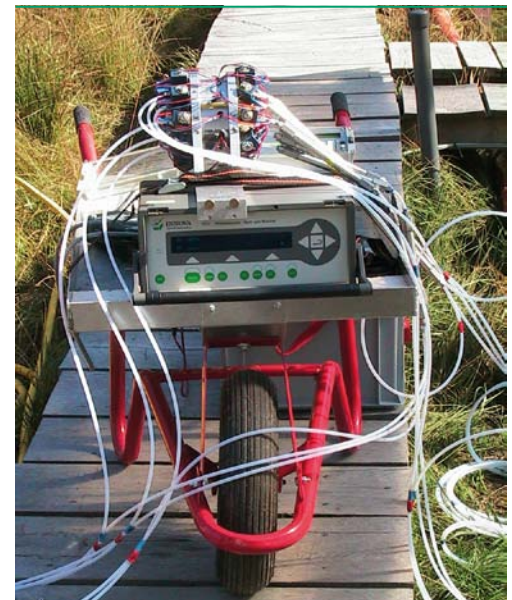
derholt experimentell simuliert. Durch Entfernen der Schneedecke konnte im Winter Bodenrost bis in 15 Zentimeter Tiefe des Waldbodens induziert werden. Mit Hilfe von Dachkonstruktionen wurden im Sommer Trockenperioden im Waldboden verlängert. Anschließend wurde der Boden Starkregenereignissen ausgesetzt. In einem Teilprojekt der Forschergruppe wurde der Austausch von Lachgas zwischen der Waldbodenoberfläche und der Atmosphäre während der meteorologischen Extremereignisse untersucht. Mit Hilfe verschließbarer Haubensysteme wurde der Lachgasaustausch in regelmäßigen Zeitintervallen gemessen. Weiterhin wurde die Lachgaskonzentration in der Bodenluft sowie die Häufigkeit schwerer und leichter Stickstoffisotope (^{15}N und ^{14}N) in den Lachgasmolekülen entlang von Tiefenprofilen bestimmt. Die bei der mikrobiellen Umsetzung von Lachgas beteiligten Enzyme bevorzugen das leichte Isotop ^{14}N . Als Folge treten Verschiebungen in der Isotopenhäufigkeit bei Lachgasproduktion und -konsumption auf. Mit Hilfe dieser Messdaten konnte somit im Bodenprofil unterschieden werden, an welchen Orten Lachgasproduktion oder Lachgaskonsumption überwogen. Die Bodenluft aus definierten Bodentiefen wurde mit Hilfe selbst entwickelter und in Zusammenarbeit mit den Technischen Werkstätten der Universität Bayreuth gefertigter Bodenluftsonden gesammelt.

EPISODISCHE LACHGASEMISSIONEN BEI BODENFROST TRUGEN ÜBER 80 % ZUR JÄHRLICHEN SUMME DER LACHGASEMISSION AUS DEM WALDBODEN BEI.

Bodenfrostergebnisse im Winter führten zu einem sprunghaften Anstieg der Lachgasemission aus dem Waldboden in die Atmosphäre. Als Ursache für den sprunghaften Anstieg der Lachgasemission bei Bodenfrostergebnissen wurde eine auch im Winter fortlaufende mikrobielle Lachgasproduktion in dem vom Bodenrost nicht erfassten Unterboden und eine fehlende mikrobielle Lachgaskonsumption im gefrorenen Oberboden identifiziert. Bei einem für die Zukunft prognostizierten häufigeren Auftreten von Bodenfrostergebnissen ist daher ein Anstieg der jährlichen Lachgasemission aus unseren Waldböden zu erwarten.

Bei experimentell verlängerten Trockenperioden im Sommer wurde ein unerwartetes Phänomen beobachtet. Zunehmende Trockenheit wandelte den Waldboden von einer Lachgasquelle zu einer Lachgassenke, das heißt vom Waldboden wurde aus der Atmosphäre sogar Lachgas aufgenommen. Diese an der Bodenoberfläche gemessenen Ergebnisse konnten wiederum mit Hilfe von Profilanalysen der Bodenluft bestätigt und mechanistisch erklärt werden. Durch eine größere mikrobielle Lachgaskonsumption als -produktion bei Trockenheit im Oberboden wurde in der Bodenluft die Lachgaskonzentration der freien Atmosphäre unterschritten. Lachgas musste folglich entlang eines Konzentrationsgradienten aus der Atmosphäre in den Boden diffundieren. Erst beim Einsetzen von Regen wandelte sich der Waldboden wieder von einer Senke zu einer Quelle von Lachgas um. Die Beobachtung einer vorübergehenden Lachgas-Senkenfunktion von Waldböden bei Trockenheit trägt zu einer Vervollständigung der bisher noch immer lückenhaften globalen Lachgasbilanz bei.

Messgerät zur Bestimmung der Lachgaskonzentration in der Luft der Haubensysteme. Foto: Stefanie Goldberg



Chemische Analytik

Das Team der Chemischen Analytik

Die Chemische Analytik ist eine wissenschaftlich-technische Einrichtung des Bayreuther Zentrums für Ökologie und Umweltforschung (BayCEER). Unter der Leitung von Dr. Gunter Ilgen werden hier seit vielen Jahren quantitative chemischen Analysen für die Lehrstühle des BayCEER und anderer wissenschaftlicher Einrichtungen der Universität Bayreuth nach validierten Verfahren durchgeführt (vgl. Artikel S. 44). Das Laborteam (Barbara Scheitler, Tanja Gonter, Christine Stöcker und Simone Ott) arbeitet in der UBT Außenstelle Dr.-Hans-Frisch-Straße.

Die Lehrstühle werden bei der Auswahl und Anwendung geeigneter Methoden beraten, bei Bedarf werden die notwendigen chemischen Analyseverfahren gemeinsam entwickelt. Das Team unterrichtet und unterstützt Studierende in Abschluss- und Promotionsarbeiten bei der Durchführung von Messungen an Geräten der Chemischen Analytik.

DIE KOMPETENZEN DER CHEMISCHEN ANALYTIK:

- **Elementanalyse:** Quantitative Bestimmung anorganischer Inhaltsstoffe im Haupt-, Neben-, Spuren- und Ultraspurenbereich in festen und wässrigen Proben. Hierzu stehen die Optische Emissionsspektrometrie (ICP-OES), die anorganische Massenspektrometrie (ICP-MS) jeweils mit induktiv gekoppeltem Plasma und die Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) zur Verfügung.
- **Isotopenanalyse:** Bestimmung von Isotopen und Isotopenverhältnissen in wässrigen Proben mittels ICP-MS
- **Nichtmetallanalyse:** Konzentrationsbestimmung anorganischer (in Ausnahmefällen orga-



Abb. rechts: Ionenchromatographie: Ionare Spezies wie Fluorid, Bromid, Chlorid, Nitrit, Nitrat, ortho-Phosphat und Sulfat werden in wässrigen Proben mittels Ionenaustauschchromatographie und anschließender Leitfähigkeitsdetektion mit Suppressionstechnik oder UV-Detektion analysiert.

nischer) Anionen und anorganischer Kationen in wässrigen Lösungen mittels Ionenchromatographie (IC) und Fließinjektionsanalyse (FIA), Bestimmung des Gesamtkohlenstoffgehaltes und/oder des Gesamtstickstoffgehaltes in wässrigen Proben (TC/TN-Analyse) sowie Elementaranalyse von Kohlenstoff, Stickstoff, Wasserstoff und Schwefel in Feststoffen

- **Speziierungsanalyse:** Bestimmungen organometallischer Verbindungen von Quecksilber und Arsen in Wasser- und Bodenproben, Lebensmitteln sowie Gasen mittels Gaschromatographie-ICP-MS-Kopplung, Gaschromatographie-Atomfluoreszenz-Kopplung und HPLC-ICP-MS-Kopplung



ICP-OES: In wässrigen Lösungen können ca. 70 Elemente vom unteren Prozentbereich bis in den $\mu\text{g/l}$ -Bereich quantitativ bestimmt werden.

KONTAKT

Universität Bayreuth, BayCEER, Chemische Analytik
Dr.-Hans-Frisch-Straße 1-3
D 95440 Bayreuth

Telefon: +49(0)921/55-5711
Internet: www.bayceer.uni-bayreuth.de/zan
E-Mail: chemische.analytik@bayceer.uni-bayreuth.de



GLOBALER WANDEL

■ STEFFEN KOLB

Warum verschwindet das Treibhausgas Methan im Waldboden?

BEDEUTUNG VON BAKTERIEN
FÜR DAS KLIMA

■ Mitteleuropäische Wälder sind global bedeutsame Methansenken (Höglwald, Bayern. Foto: S. Kolb)

Methan ist nach Kohlendioxid das wichtigste Treibhausgas. Jedes Jahr werden 600 Millionen Tonnen in die Atmosphäre abgegeben³. Dabei stammt das meiste Methan aus Quellen, die durch den Menschen bedingt werden (z. B. Reisfelder, Viehhaltung, Moore). In all diesen Systemen entsteht Methan beim letzten Schritt des sauerstofffreien Abbaus toter Organismen oder anderen organischen Materials (Methanogenese)³. Der Großteil des jährlich freigesetzten Methans wird photochemisch in der Atmosphäre und durch methan-fressende (wissenschaftlich: „methanotrophe“) Bakterien in Böden wieder abgebaut, was zur Folge hat, dass die Konzentration in der Atmosphäre nur langsam ansteigt^{3,4}. Derzeit liegt sie bei 0,0002 %³. Diese scheinbar geringe Konzentration hat dennoch einen großen Effekt. Methan trägt mit 20 % zur globalen Erderwärmung bei³, weshalb ein quantitatives und umfassendes Verständnis des natürlichen Methanverbrauchs und seiner Ursachen essentiell ist, um in Zukunft besser auf die menschenverursachte Erderwärmung reagieren zu können.

Methanotrophe Bakterien erfüllen zwei wichtige Funktionen in der Regulation des globalen Methankreislaufs: Sie reduzieren die Freisetzung des Methans aus vorwiegend sauerstofffreien (anoxischen) Ökosystemen wie Meeressedimente, Moore und Reisfelder, indem sie dort entstehendes Methan an der Grenzfläche zur Atmosphäre gleich wieder umsetzen (Abbildung 1). Außerdem sind methanotrophe Bakterien in belüfteten (oxischen) Wald-, Grünland- und Wüstenböden Senken für Methan aus der Atmosphäre. Weil in belüfteten Böden in der Regel aufgrund des hohen Sauerstoffgehaltes kein Methan entstehen kann, sind methanotrophe Bakterien in diesen Böden auf Methan aus der Atmosphäre angewiesen. Gemeinschaften methanotropher Bakterien in Waldböden unserer gemäßigten Klimate stellen die mit Abstand größten Senken weltweit dar (Abbildung 1).

LEBENSWEISE DER METHANOTROPHEN BAKTERIEN IN WALDBÖDEN

Schon zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts wurden Bakterien entdeckt, die hauptsächlich



PD Dr. Steffen Kolb

Jahrgang 1974. 1994-2000 Studium der Biologie (Universität Göttingen); Diplomarbeit (MPI für marine Mikrobiologie, Bremen). 2000-2003 Promotion an der Universität Marburg (Mitarbeiter am MPI für terrestrische Mikrobiologie). 2005-2010 Habilitation im Fach Mikrobiologie (Universität Bayreuth, UBT). Seit 2010 Dozent am **Lehrstuhl Ökologische Mikrobiologie** (UBT).

Methan als Nahrung nutzen⁷. Ähnlich wie wir Menschen brauchen sie Luftsauerstoff für ihren Energiestoffwechsel. Dagegen können komplexere Organismen, wie Pflanzen und Tiere, Methan nicht als Nahrung nutzen, weil ihnen die entsprechenden Enzyme fehlen. Dies gilt auch für die in Waldböden sehr häufig vorkommenden Pilze⁷. Für die durchlüfteten Böden in Wäldern kann aus heutiger Sicht davon ausgegangen werden, dass anaerobe, methanotrophe Mikroorganismen dort nicht vorkommen und deswegen keine Rolle für die Aufnahme von Methan aus der Atmosphäre spielen.

In Waldböden findet in der Regel keine Methanogenese statt, das heißt das Methan, auf das die aeroben, methanotrophen Bakterien in diesen Böden angewiesen sind, stammt ausschließlich aus der Atmosphäre, ebenso wie der notwendige Sauerstoff⁴. Methanotrophe wachsen nur langsam, da die Energiemenge aus Methan verglichen mit der Energiemenge aus energiereicheren Verbindungen (wie zum Beispiel Zucker) gering ist. In Waldböden werden diese Hungerkünstler auch noch mit einem weiteren Problem konfrontiert. Die Methankonzentration in der Atmosphäre ist so gering, dass ein Überleben aus Sicht der zellulären Energiebereitstellung unwahrscheinlich scheint. Es wird derzeit diskutiert, ob Methanotrophe in Waldböden neben Methan doch andere im Boden auftretende Kohlenstoffverbindungen (z. B. Essigsäure) nutzen können, also eventuell doch

DER GROSSTEIL DES JÄHRLICH FREI-GESETZTEN METHANS WIRD DURCH METHAN-FRESSENDE BAKTERIEN IN BÖDEN WIEDER ABGEBAUT

WEBLINK

- www.bayceer.uni-bayreuth.de/mik

INFO

Aerobe methanotrophe Bakterien (z. B. *Methylocyctis parvus*) sind mikroskopisch kleine Einzeller (Größe: zwei- bis dreitausendstel Millimeter), die festhaftend an Bodenpartikeln leben. Sie sind auf Methan als Kohlenstoff- und Energiequelle spezialisiert⁷.



Physiologisch gehören Methanotrophe zu den Methylotrophen: Mikroorganismen, die auf Ein-Kohlenstoff(C₁)-Verbindungen wachsen. Dazu zählen Methan, Methanol, Formaldehyd, Halomethane und schwefel- und stickstoffhaltige Verbindungen mit Methylgruppen. Das Enzym Methan-Monooxygenase oxidiert das bei natürlichen Temperaturen reaktionsträge Methan zu dem reaktionsfreudigeren Methanol und ermöglicht durch weitere Verstoffwechslung sowohl die Bereitstellung von Stoffwechsel-Energie und als auch die Aufnahme von Kohlenstoff in die Zelle zum Wachstum.

Die meisten Methanotrophen können nur C₁-Verbindungen nutzen – sie sind monocarbotroph. Nur wenige Arten verwerten außer einigen C₁-Verbindungen auch Ethanol, Essigsäure und andere Karbonsäuren – sie sind polycarbotroph. Polycarbotrophe methanotrophe Bakterien kommen zwar auch in Waldböden vor, können aber keine atmosphärischen Methankonzentrationen nutzen⁴ und spielen daher keine Rolle für die Aufnahme von Methan aus der Atmosphäre.

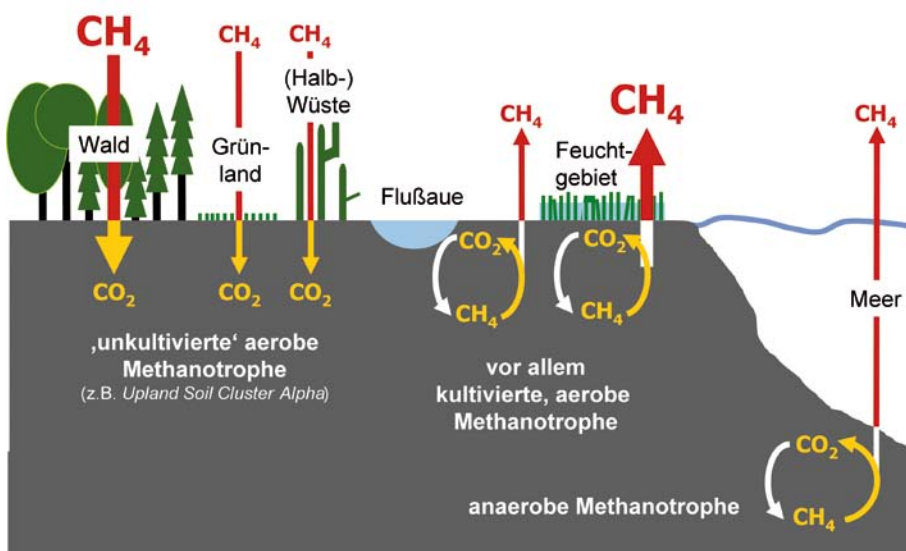


Abb. 1: Rolle der Methanotrophen in Ökosystemen, die Senken oder Quellen von atmosphärischem Methan sind. CH₄, Methan; CO₂, Kohlendioxid; gelbe Pfeile, Methanotrophie; weiße Pfeile, Methanogenese. Rote Pfeile, Methanaustausch mit der Atmosphäre. Die Abbildung ist verändert und basiert auf einer bereits veröffentlichten Grafik (Abbildung 3 in⁵; Genehmigung des Autors liegt vor).

polycarbotroph sind. Allerdings sind alle bisherigen Studien uneindeutig^{1,4}. Aufgrund ihrer Physiologie findet man methanotrophe Bakterien in Waldböden in einer nur wenige Zentimeter dicken Bodenschicht direkt unter dem Laub. In dieser Schicht sind sie vor Austrocknung geschützt und die lebensnotwendigen Substrate (Methan, Sauerstoff) dringen in ihren Lebensraum vor, was in tieferen Bodenschichten nicht mehr ausreichend der Fall ist (Abbildung 2).

UMWELTEINFLÜSSE, DIE DIE AKTIVITÄT VON METHANOTROPHEN IN WALDBÖDEN STEuern

Lebensgemeinschaften methanotropher Bodenbakterien haben einen entscheidenden Einfluss auf die Fähigkeit eines Ökosystems, Methan aus der Atmosphäre aufzunehmen oder abzugeben. Um ihre Reaktionen auf komplexe Umweltveränderungen (z.B. Rodung eines Waldes) vorherzusagen zu können, ist es nötig, die physiologischen Anforderungen einzelner Arten an ihre Umwelt zu kennen. Bislang ist es noch nicht gelungen, methanotrophe Bakterien aus Waldböden zum Wachstum im Labor anzuregen, so dass sie auch noch nicht durch selektive Anreicherung in Reinkulturen überführt werden konnten. Reinkultur-basierte Untersuchungen sind in der klassischen Mikrobiologie jedoch die Grundlage zur Bestimmung der Anforderungen, die ein Bakterium an seine Umwelt hat. Trotz wiederholter Versuche in verschiedenen Labors weltweit konnten bisher keine methanotrophen Reinkulturen aus Waldböden gewonnen werden, die die atmosphärische Methankonzentrationen nutzen können. Deswegen stützen sich alle bisherigen Forschungsarbeiten zu diesem Thema auf Analysemethoden, die von einer Kultivierung im Labor unabhängig sind⁴. Wie auch in den Arbeiten zu diesem Thema am Lehrstuhl für Ökologische Mikrobiologie der Universität Bayreuth, werden dazu vor allem molekularbiologische Methoden (DNA- und RNA-Analytik) eingesetzt, die es ermöglichen, etwas über die Anzahl, Diversität und Aktivität dieser Organismen in Bodenproben zu erfahren. Diese Daten können dann mit Informationen zur Methanumsetzung in denselben Proben in Beziehung gesetzt werden. So ist es möglich, etwas über die Physiologie der bislang 'unkultivierbaren' Bodenbakterien zu lernen. In den vergangenen zehn Jahren wurden Gemeinschaften methanotropher Bakterien anhand ihrer Gene für die Methan-Monooxygenase untersucht. Die häufigsten Gensequenz-Typen in Böden, die

atmosphärisches Methan aufnehmen, gehören zu ‚unkultivierbaren‘ Arten. In Waldböden ist die Sequenz-Gruppe **Upland Soil Cluster Alpha** vorherrschend⁴. Es handelt sich dabei vermutlich um Arten, die stammesgeschichtlich nah mit den *Beijerinckiaceae* (*Alphaproteobacteria*) verwandt sind. Die Menge Methan, die eine methanotrophe Mikrobengemeinschaft im Boden aufnimmt, ist von der Sauerstoffverfügbarkeit abhängig. Diese wird primär vom Wassergehalt bestimmt. Deswegen kommt es nach einem Regenfall schnell zu einer Sauerstofflimitierung des methanotrophen Stoffwechsels. Das bedeutet, dass Boden-Wassergehalte einen entscheidenden Einfluss auf die Aktivität der methanotrophen Bakterien und damit darauf, wie viel Methan im Waldboden umgesetzt wird⁴. Massive Eingriffe in die Bodenstruktur (z. B. Baumfällarbeiten) durch den Menschen können die Methanaufnahme nachhaltig reduzieren. Die Feinstruktur der oberflächennahen Bodenschicht (Abbildung 2), in der die Methanotrophen leben, wird gestört und viele methanotrophe Zellen sterben ab. Die Wiederherstellung der Zellzahlen und als Folge davon ihrer Aktivität dauert aufgrund des langsamen Wachstums der methanotrophen Bakterien Jahre. Welche Arten in belüfteten Böden vorkommen, ist zumindest teilweise vom pH-Wert bestimmt⁴. Wie andere abiotische Faktoren (z. B. Stickstoffverfügbarkeit) auf die Zusammensetzung der methanotrophen Mikrobengemeinschaften in belüfteten Böden wirken, konnte bisher nicht abschließend geklärt werden. Neben abiotischen können auch biologische Faktoren methanotrophe Bakterien beeinflussen. Im Zuge der Wiederaufforstung im 19. Jahrhundert wurden in Zentraleuropa meist Fichten (*Picea abies*) angepflanzt. Fichten produzieren stark riechende ätherische Öle (Monoterpene), die für viele Boden-Mikroorganismen toxisch sind. Monoterpene kommen in Laubbäumen in deutlich geringerer Konzentration vor⁶. Die Bildung von α -, β -Pinen und Limonen durch Fichten in Nadelwäldern können den Stoffwechsel von Methanotrophen im Boden hemmen und so nachhaltig die Methanaufnahme und die Zellzahl der Methanotrophen im Ver-

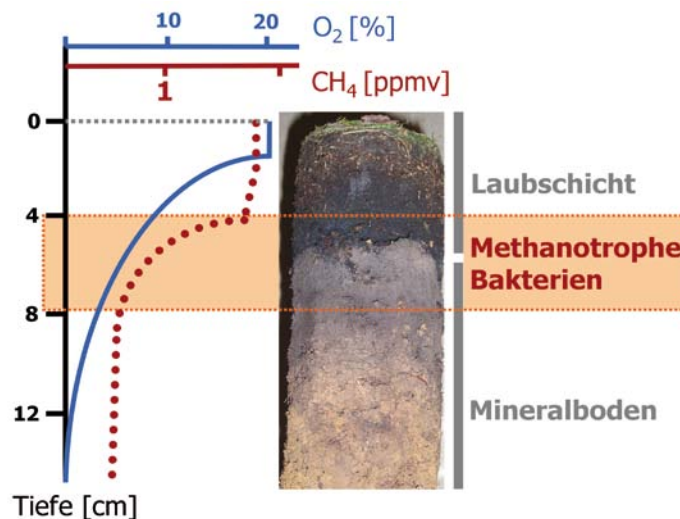


Abb. 2: Lokalisation Methanotropher Bakterien im Waldboden. Orange-markierter Bereich, Großteil der methanotrophen Bakterien und höchste Aktivität (mehr Details dazu in ⁴). O₂, Luftsauerstoff; CH₄, Methan; ppmv, parts per million (1 ppmv = 0,0001 %). Dargestellter Bodenkern stammt aus einem Fichtenwald (Höglwald, Bayern, Foto aus der Diplomarbeit von S. Gutmann 2008).

gleich zu Laub- oder Mischwäldern reduzieren^{1,6}. Grundsätzlich ist mittlerweile ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten von bestimmten ‚unkultivierbaren‘ Methanotrophen-Arten und Bäumen nachgewiesen worden. Dies dürfte erklären, warum Waldrodungen und -umwandlung in Agrarland letztlich zur starken Reduzierung oder sogar Verschwinden einer ehemaligen Methansenke führen. Es wird nachwievor diskutiert, wie schnell sich die verschwundenen Methanotrophen als Folge von Aufforstung ehemaliger Waldgebiete sich wieder anreichern lassen (Zeithorizont: von Jahren bis zu einem Jahrhundert). Dennoch gilt es als unbestrittene Tatsache, dass eine Bepflanzung von Agrarland mit Bäumen die Eigenschaft des Bodens als Methansenke wiederherstellt und sich offensichtlich auch wieder ‚unkultivierbare‘, methanotrophe Bakterien anreichern. Um quantitativ bedeutsame und mathematisch modellierbare Vorhersagen zur Reaktion von methanotrophen Gemeinschaften auf komplexe Umweltveränderungen treffen zu können, muss die Physiologie dieser weitestgehend noch nicht kultivierten Mikroorganismen tiefgehend aufgeklärt werden – das heißt es ist noch ein langer Weg bis zum vollständigen Verständnis von terrestrischen Senken für atmosphärisches Methan.

- 1 Degelmann DM, Borken W, Drake HL, Kolb S (2010) Different atmospheric methane-oxidizing communities in European beech and Norway spruce soils. *Appl Environ Microbiol* 76: 3228-3235
- 2 Degelmann DM, Kolb S, Borken W (2010) Methane oxidation kinetics differ in European beech and Norway spruce soils. *Eur J Soil Sciences* 60: 499-506
- 3 Denman KL, Brasseur G, Chidthaisong A, Ciais P, Cox PM, Dickinson RE, et al. (2007) Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., et al. (Hrsg.). Cambridge University Press Cambridge, UK, 499-587.
- 4 Kolb S (2009) The quest for atmospheric methane oxidizers in forest soils. *Environ Microbiol Rep* 1(5): 336-346
- 5 Kolb S (2011) Treibhausgas-vernichtende Mikroben. *BioSpektrum* 2: 146-149
- 6 Maurer D, Kolb S, Haumaier L, Borken W (2008) Inhibition of atmospheric methane oxidation by monoterpenes in Norway spruce and European beech soils. *Soil Biol Biochem* 40:3014-3020.
- 7 Trotsenko YA, Murrell JC (2008) Metabolic aspects of aerobic obligate methanotrophy. *Adv Appl Microbiol* 63:183-229.



GLOBALER WANDEL

■ INKEN KRÜGER
WERNER BORKEN
CHRISTOPH SCHULZ

Totholz – ein Kohlen- stoffspeicher?

EINE STUDIE ÜBER DEN
BEITRAG VON TOTHOLZ ZUR
KOHLENSTOFFSPEICHERUNG
IN BAYERISCHEN WÄLDERN

■ Anders als in Wirtschaftswäldern werden im Naturschutzgebiet Rohrberg alte Bäume nicht gefällt. Als stehendes Totholz sind sie ein Lebensraum für Insekten, Vögel und Pilze.

Zu einem natürlichen Wald gehören nicht nur alte Bäume mit großen Kronen, sondern auch jene Bäume, die schon lange kein Grün mehr tragen. Das so genannte Totholz erfüllt viele ökologische Funktionen. Es ist Lebensraum für Vögel, Insekten und Pilze, Wasserspeicher, ein Keimbett für Jungwuchs und Bestandteil des Nährstoffkreislaufs. Als Teil des Kohlenstoffkreislaufs wird Totholz im Kyoto-Protokoll berücksichtigt. Dennoch liegen wenig Zahlen über die Rolle von Totholz im Kohlenstoffkreislauf vor: wie viel Totholz kommt in den heimischen Wäldern vor und wie lange verbleibt es im Wald? Was passiert nach der Holzzerersetzung mit dem Kohlenstoff? Reichert sich Kohlenstoff aus Totholz im Boden an oder wird dieser vollständig zu CO_2 mineralisiert?

Um den Einfluss von Totholz auf Kohlenstoffvorräte beschreiben zu können, werden in drei bayerischen Wäldern mit den hier typischen Baumarten Fichte, Buche und Eiche Untersuchungen zur Funktion von Totholz durchgeführt. Dabei werden je ein unbewirtschafteter Wald und ein nahe gelegener bewirtschafteter Wald betrachtet. Zur Ermittlung der Totholzmenge kann man bei oberirdischem Totholz auf zwar aufwendige, aber relativ einfache Art und Weise vorgehen: mit Maßband und Zollstock werden alle toten Stämme, Stümpfe und Äste mit einem Durchmesser größer als 7 cm abgemessen und erfasst. Anhand äußerer Merkmale wird ein Zersetzungsgrad zugewiesen und durch das Anbohren von Stämmen die Holzdicke bestimmt. Die Erfassung von unterirdischem Totholz gestaltet sich schwieriger. So müssen zu dessen Erfassung abgestorbene Wurzelstöcke mithilfe eines Baggers ausgegraben werden. In den für alte Eichen bekannten Naturschutzgebieten Rohrberg im Spessart und Ludwigshain bei Kelheim finden sich mit bis zu $165 \text{ m}^3/\text{ha}$ (30 t Kohlenstoff) rund fünfmal mehr oberirdisches Totholz als in den angrenzenden Wirtschaftswäldern. Im Naturwaldreservat Grübel im Bayerischen Wald, einem Fichtenbestand, kommen rund $65 \text{ m}^3/\text{ha}$ Totholz (11 t Kohlenstoff) vor. Sowohl in seiner Funktion als Lebensraum als auch in Hinblick auf die Zersetzungsrate ist nicht nur die Menge an Totholz, sondern auch die Totholzform von Bedeutung. So findet man im unbewirtschafteten Wald abgestorbene Eichenstämme mit Volumen von bis zu 10 m^3 und hohe Anteile an stehendem Totholz.

Um einzuschätzen, ob Totholz eine Kohlenstoffsene ist, genügt eine Momentaufnahme der Totholz-



Inken Krüger bei der Aufnahme von Totholz. Die Geoökologin schreibt seit Oktober 2009 am **Lehrstuhl für Bodenökologie** bei Werner Borken an ihrer Doktorarbeit mit dem Titel „Potential von ober- und unterirdischen Totholz als Kohlenstoffsene in Natur- und Wirtschaftswäldern“.

vorräte nicht. Angaben über die Verweilzeit von Totholz im Wald sind ebenfalls notwendig. Zur Bestimmung dieses Zeitraums werden zwei verschiedene Methoden eingesetzt. Bei der dendrochronologischen Kreuzdatierung werden die Jahrringsequenzen von Totholzstämmen digitalisiert und mit Sequenzen von Bäumen, deren Absterbejahr bekannt ist, verglichen. Da die Jahrringbreiten von ökologischen Faktoren wie dem Wetter abhängen, ist die Abfolge von breiten und schmalen Ringen für die Bäume eines Bestands sehr ähnlich und ermöglicht eine präzise Datierung. Mit der Radiokarbonmethode kann das Alter des jüngsten

Jahrrings bestimmt werden. Durch oberirdische Atombombentests wurden in den 1950er und 60er Jahren große Mengen des radioaktiven Kohlenstoffisotops ^{14}C in die Atmosphäre freigesetzt. Seit dem Moratorium 1963 nimmt die ^{14}C Konzentration in der Atmosphäre kontinuierlich ab. Durch diesen Effekt kann die Radiokarbonmethode nicht nur für archäologische Zwecke, sondern auch für rezente Altersbestimmungen genutzt werden. Zur Altersbestimmung von Totholz ist sie deshalb anwendbar, da die ^{14}C Konzentration jedes Jahrrings jener der Atmosphäre im entsprechenden Jahr entspricht. Beide Methoden setzen jedoch voraus, dass die Waldkante, der letzte gebildete Jahrring, noch vorhanden ist. Stark zersetztes Totholz kann deshalb nicht datiert werden.

Der Zersetzungsprozess ist von vielen Parametern abhängig, wie vom Pilzbefall, der Exposition, der Dicke des Stammes oder mechanischen Schäden des Holzes. So korreliert der Todeszeitpunkt nicht zwingend mit Zersetzungsgrad und der Holzdicke. Das maximale Alter von Totholz ist stark abhängig von der Baumart. So kann Eichentotholz Verweilzeiten von über 60 Jahren aufweisen. Das gefundene und datierte Fichten- und Buchentotholz geht hingegen nach etwa 30 Jahre in einen stark zersetzten Zustand über, in dem es nicht mehr datiert werden kann.

Stark zersetztes Totholz, das teils übereinandergestapelt ist, stellt eine Herausforderung für die vollständige Kartierung dar. Die Aufnahme aus dem Naturschutzgebiet Ludwigshain zeigt, wie viel Totholz sich auf kleinem Raum sammeln kann.



INFO

Projekt KLIP 23

Das Projekt KLIP 23 wird am **Lehrstuhl für Bodenökologie** durch Inken Krüger, Helga Hertel-Kolb, Uwe Hell und Werner Borken in Kooperation mit Christoph Schulz von der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) in Freising bearbeitet. Das Projekt läuft von Oktober 2009 bis September 2012 und wird im Rahmen des Klimaprogrammes 2020 vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten finanziert.

- www.bayceer.uni-bayreuth.de/bod

Doch was passiert nach der Holzzersetzung mit dem Kohlenstoff? Der überwiegende Teil gelangt durch den mikrobiellen Abbau als CO_2 in die Atmosphäre, ein geringerer Teil in den Boden. Der Boden enthält in unseren Breiten einen beträchtlichen Vorrat an organischem Kohlenstoff. In den untersuchten Wäldern konnten Mengen von bis zu 14 t/ha in der Humusaufgabe und bis zu 82 t/ha Kohlenstoff in den obersten 10 cm des Bodens berechnet werden. Doch wie viel Kohlenstoff sich durch Totholz im Boden anreichern kann, ist bislang kaum untersucht. Auf den Versuchsflächen soll durch den Vergleich von bewirtschaftetem und unbewirtschaftetem Wald dieser Einfluss bestimmt werden. Für die Analyse wurden in jedem der untersuchten unbewirtschafteten sowie bewirtschafteten Wäldern 30 Bodenproben bis in 1 Meter Tiefe entnommen und deren Kohlenstoffgehalt untersucht. Um Aussagen über die Umsatzzeiten von organischem Kohlenstoff im Boden treffen zu können, wird die ^{14}C -Signatur von verschiedenen Fraktionen des Bodens bestimmt. Die Auswertung der bisherigen Resultate zeigt, dass die Bewirtschaftungsform keinen Einfluss auf den Gesamtkohlenstoffgehalt des Bodens hat. Allerdings ändert sich der Gesamtkohlenstoffgehalt nur langsam im Vergleich zu den Zeiträumen, seit denen die Wälder nicht mehr wirtschaftlich genutzt werden. Die ^{14}C -Signatur ermöglicht eine detaillierte Analyse der Veränderungen durch Totholz. Mit diesem Ansatz soll die Funktion des Totholzes für die Kohlenstoffspeicherung in Waldböden untersucht werden und die Frage beantwortet werden, wie viel Kohlenstoff sich durch Totholz im Wald anreichert.

Im Blitzlicht II

WEITERE ARBEITSGRUPPEN AUS GEOWISSENSCHAFTEN UND SPORT



Ausschnitt aus einem Wolkenradar mosaik vom Unwetter über Bayreuth am 19. Juli 2007
(Quelle: Deutscher Wetterdienst)

Klimatologie

Die Abteilung Klimatologie wird zurzeit neu besetzt, nachdem Professor Dr. Thomas Nauß an die Universität Marburg wechselt, und derzeit durch Dr. Johannes Lüers vertreten wird. Auch in Zukunft wird die Fernerkundung eine wichtige Rolle spielen: Klimatologen leiten aus Radar- und Satellitenbildern Informationen über Prozesse sowohl in der Luft als auch an Land ab und können so eine Brücke zwischen Forschungsergebnissen auf kleiner Skala und den Auswirkungen auf Landschaftsebene schlagen.

- www.klimatologie.uni-bayreuth.de/

Sportökologie



Mit der Gründung der Arbeitsgruppe Sportökologie und Outdoorsport im Jahr 2009 wurde das Profifeld Ökologie und Umweltwissenschaften der Universität Bayreuth in die Sportwissenschaften ausgedehnt. In der von Dr. Volker Audorff geleiteten Gruppe stehen die Wechselwirkungen zwischen Sport und Umwelt im Mittelpunkt des Forschungsinteresses. Untersuchungen zum Raumnutzungsverhalten von Outdoorsportlern und zu den durch sie entstehenden Auswirkungen auf Natur und Landschaft werden von Studien zur Akzeptanz von Maßnahmen zur naturverträglichen Lenkung von Sportlern ergänzt.

- www.sport.uni-bayreuth.de/spo_wiss_1/de

Störungsökologie

Seit März 2011 wird die neue Professur für Störungsökologie von Prof. Dr. Anke Jentsch geführt. Die Gruppe untersucht in verschiedenen Biomen die Bedeutung von Störungen für die Entstehung, Aufrechterhaltung oder den Verlust von Biodiversität; sie beschäftigt sich mit Naturrisiken, Landnutzungsdynamiken und Resilienz. Im Rahmen der EVENT Experimente werden die Auswirkungen extremer Wetterereignisse auf Pflanzengemeinschaften und Ökosystemfunktionen analysiert.

- www.bayceer.uni-bayreuth.de/stoerungsoekologie

Erwärmung der EVENT 2-Versuchsflächen im Ökologisch-Botanischen Garten



Umweltgeochemie

Prof. Dr. Britta Planer-Friedrich leitet seit 2008 die Juniorprofessur Umweltgeochemie. Der Forschungsfokus liegt auf der methodischen Entwicklung und Anwendung moderner Elementspeziesanalytik und sensitiver Vor-Ort-Messtechnik für anorganische und metallorganische, wässrige oder gasförmige Verbindungen. Bestimmt werden abiotische und mikrobiell katalysierte Umwandlungen in biogeochemischen Stoffkreisläufen sowie die Spezies-Mobilität, -Aufnahme in die Biosphäre, -Human- und Ökotoxizität. Ein thematischer Fokus liegt auf Geothermalsystemen und den darin vorherrschenden Extremophilen.

- www.umweltgeochemie.uni-bayreuth.de

Probenahme an Ojo Caliente, einer heißen Quelle im Yellowstone National Park



■ CARL BEIERKUHNEIN
JÜRGEN KREYLING
DANIEL THIEL

Anpassungsoptionen für unsere Wälder

INNERARTLICHE UNTERSCHIEDE BEI BÄUMEN
BEZÜGLICH DER REAKTION AUF DEN KLIMAWANDEL

■ Abb. 5: Spätfrostschäden bei der
Rot-Buche (*Fagus sylvatica*).

Klimaveränderungen werden die mitteleuropäischen Wuchsbedingungen in diesem Jahrhundert nachhaltig verändern. Vor allem für unsere langlebigen und ausdauernden Ökosysteme (wie z. B. Wälder) und ihre Schlüsselarten muss deshalb frühzeitig abgeschätzt werden, wie diese sich unter sich ändernden Bedingungen verhalten werden.

Besonders in der Forstwirtschaft müssen bei „Umtriebszeiten“ (optimale Zeiten für die Nutzung von Bäumen) von ca. 100 Jahren schon jetzt die Weichen für stabile und ertragreiche Waldökosysteme der Zukunft gestellt werden.

Bäume, die heute gepflanzt werden, werden auf Grund ihrer Langlebigkeit den veränderten Klimabedingungen bis weit in die zweite Hälfte des Jahrhunderts ausgesetzt sein. Betrachtet man zum Beispiel die Ansprüche der heimischen Fichte im Bezug auf Jahresniederschlag und Jahresmitteltemperatur, muss man befürchten, dass selbst bei einer moderaten Erwärmung große Teile Oberfrankens für die derzeitige „Brotbaumart“ der Forstwirtschaft nicht mehr geeignet sein werden (Abb.1).

In dem Experiment „Plastizität und Anpassung verschiedener Herkünfte langlebiger Schlüsselpflanzenarten bezüglich klimatischer Extremereignisse“ (EVENT 3), welches Teil des Forschungsverbundes FORKAST („Auswirkungen des Klimas auf Ökosysteme und klimatische Anpassungsstrategien“) ist, arbeitet der Lehrstuhl für Biogeografie mit dem Bayerischen Landesamt für forstliche Saat und Pflanzenzucht ASP (Teisendorf) zusammen. Der Forschungsverbund beschäftigt sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme und mit klimatischen Anpassungsstrategien und

besteht aus insgesamt 16 Teilprojekten, an denen mehrere bayerische Hochschulen und Landesämter beteiligt sind.

Ziel von EVENT 3 ist es, die Variabilität und genetische Vielfalt innerhalb von Baumarten zu beleuchten. Hier konzentriert man sich im Wesentlichen auf Hauptbaumarten wie die Buche (*Fagus sylvatica*).

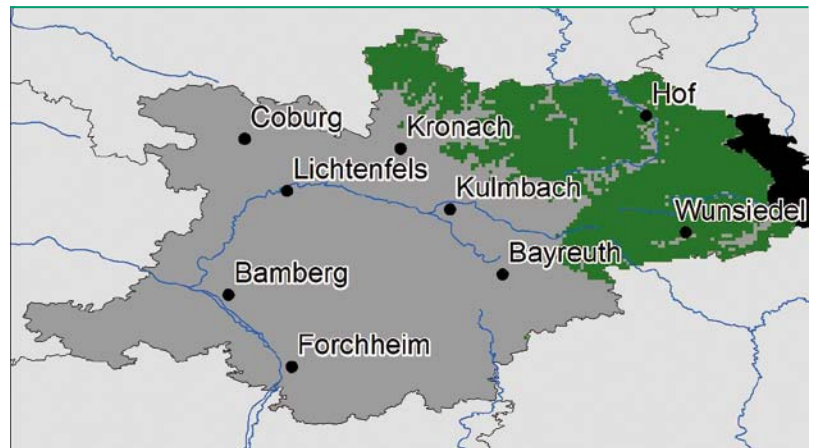


Abb.1: Klimaeignung Oberfrankens für die Fichte (*Picea abies*). Geeignete Räume sind in grün hervorgehoben. Oben: Aktuell geeignete Gebiete (ganz Oberfranken mit Ausnahme des Schneeberggipfels). Unten: Erwärmung um 2 Grad. Die Fichte fällt bei dieser moderaten und sehr optimistischen Erwartung bereits im gesamten westlichen Oberfranken aus. Nur in den östlichen Gebieten (Frankenwald, Fichtelgebirge) kann die Fichte dann noch geeignete Bedingungen vorfinden.

AUTOREN

Prof. Dr. Carl Beierkuhnlein

leitet den **Lehrstuhl für Biogeografie** an der Universität Bayreuth, mit langjähriger Erfahrung mit experimenteller Forschung in Grünlandbeständen, z. B. in EVENT oder BIODEPTH. Unter anderem ist er der Herausgeber der Studie „Klimawandel in Bayern - Auswirkungen und Anpassungsstrategien“ im Auftrag des Landesamtes für Umwelt Bayern. Zusätzlich ist er der Sprecher des Forschungsverbundes FORKAST und Leiter des Teilprojektes 1 (Event 3), in dem parallel Versuche mit verschiedenen Herkünften der Rot-Buche der Schwarzkiefer und der Flaumeiche durchgeführt werden.

Dr. Jürgen Kreyling

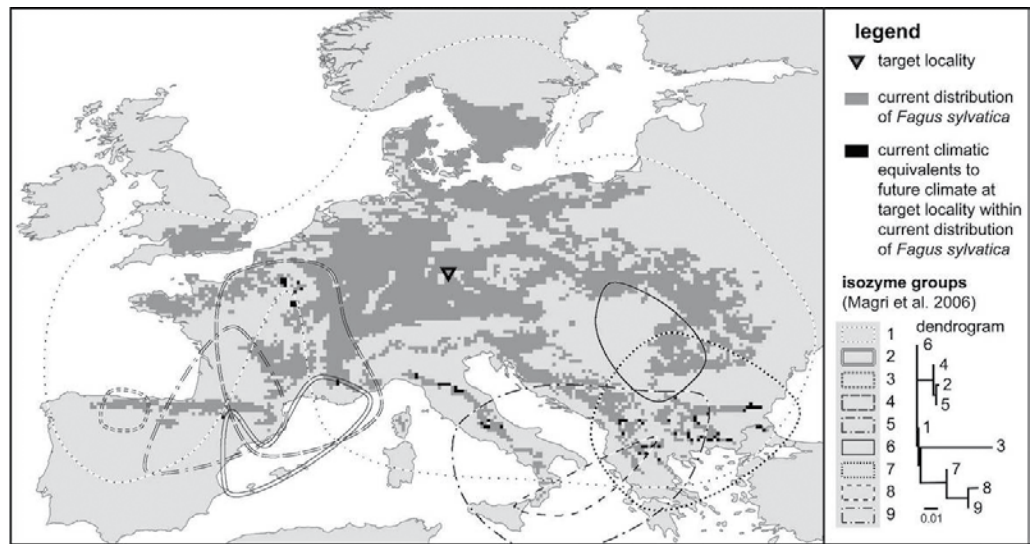
ist Akademischer Rat am Lehrstuhl für Biogeografie in Bayreuth. Er hat seine Dissertation im Rahmen des EVENT-Experiments abgeschlossen. Hierbei konnte er Erfahrungen in der Anlage und Durchführung experimenteller Forschung und in Herkunftsversuchen mit Grünlandarten sammeln. Er ist ebenfalls in das Teilprojekt 1 des Forschungsverbundes FORKAST eingebunden.

Daniel Thiel

ist Absolvent des Graduierten-Programms Global Change Ecology (M.Sc.) im Elitenetzwerk Bayern. Er ist Doktorand im Teilprojekt 1 des Forschungsverbundes FORKAST und ist für die Pflege, Datenaufnahme und -auswertung im EVENT 3-Experiment verantwortlich.



Abb. 2: Rezente Verbreitung der Rot-Buche (dunkelgrau) und durch Linien hervorgehobene genetisch unterschiedliche Regionen aufgrund von Isoenzymen (nach Magri et al. 2006). Durch schwarze Pixel verdeutlicht sind Regionen innerhalb dieser Verbreitung, in denen schon heute ähnliche Klimaverhältnisse herrschen, wie sie für Bayreuth für die Periode 2071 - 2100 prognostiziert werden (REMO A1B).



Das Teilprojekt zu Schwarz-Kiefern (*Pinus nigra*) im Rahmen von EVENT 3 wird von der Oberfrankens-tiftung gefördert. 2011 werden auch vier Provenienzen der Flaum-Eiche (*Quercus pubescens*) ins EVENT 3 Experiment integriert.

Die Annahme, dass die Toleranz von Waldbäumen gegenüber den künftig erwarteten Klimabedingungen aufgrund ihrer rezente Verbreitung beurteilt werden könnte, ignoriert die genetischen Unterschiede innerhalb ihrer Verbreitungsgebiete (also Genotypen bzw. Ökotypen). Herkunftsversuche in der Forstwirtschaft haben zwar eine lange Tradition und konnten zeigen, dass Populationen bzw. geographische „Herkünfte“ an das lokale Klima angepasst sind und sich somit voneinander unterscheiden. Allerdings ist künftig verstärkt das Auftreten von Witterungsextremen (z. B. Trockenheit) bei gleichzeitig kaum verändertem Auftreten von Spätfrostereignissen zu beachten. Es muss heute bekannt sein, welche Arten, beziehungsweise welche Herkünfte dieser Arten, den künftigen Bedingungen gewachsen sein werden, um gegen Ende des 21. Jahrhunderts funktionsfähige Ökosysteme zu formen.

Auf der Suche nach potentiell geeigneten Herkünften fällt der Blick auf Gebiete, die bereits heute Klimabedingungen aufweisen, wie sie für Bayern am Ende dieses Jahrhunderts erwartet werden. Die Nutzungsmöglichkeiten solcher Herkünfte muss nun im Hinblick auf häufigere und extremere Wetterereignisse getestet werden. Hier wurde die Rotbuche (*Fagus sylvatica*) ausgewählt, welche die heimischen Laubmischwälder

WEBLINK

- www.biogeo.uni-bayreuth.de

INFO

Am **Lehrstuhl für Biogeografie** werden – in Zusammenarbeit mit dem **Lehrstuhl für Störungs-ökologie** – die Auswirkungen von Klimaveränderungen und in besonderer Weise von klimatischen Extremereignissen auf Ökosysteme und deren Funktionen experimentell erforscht. Die Wechselwirkungen von Extremereignissen und Biodiversität (EVENT 1) bzw. Extremereignissen und verschiedenen Managementregimen (EVENT 2) standen dabei bisher im Mittelpunkt. Im Jahre 2009 wurde das EVENT 3 etabliert.



natürlicherweise dominiert und dort auch für die Gewährleistung von Ökosystemfunktionen wie Biomasseertrag maßgeblich verantwortlich ist. Mit Hilfe regionaler Klimamodelle (z. B. REMO, UBA 2006) wurden künftig erwartete Klimabedingungen für Nordostbayern ermittelt und europäische Regionen identifiziert, welche schon heute solche Bedingungen aufweisen. Aus diesen Regionen (siehe Abb. 2) wurden anschließend Rotbuchen akquiriert und innerhalb des Experiments künftig erwarteten klimatischen Bedingungen ausgesetzt: Sowohl veränderten Mittelwerten (Erwärmung) als auch Extrembedingungen wie Trockenheit und Spätfrost (siehe Abb. 3 und 4). Durch den Vergleich verschiedener geographischer Herkünfte sollen jene identifiziert werden, welche diesen Bedingungen am besten gewachsen sind.

Erste Ergebnisse zeigen, dass die Herkünfte der Rot-Buche individuell auf Extremereignisse wie Dürre reagieren, d.h. sich in ihrer Dürre-resistenz unterscheiden. Weiterhin variieren die Herkünfte auch in ihrer Spätfrostresistenz. Trotz eines allgemeinen Erwärmungstrends wird es in unseren Breiten auch in Zukunft immer wieder zu Spätfrostereignissen kommen. Dies ist zu bedenken, wenn man Herkünfte aus Regionen einführt, in denen eine Anpassung an solche Ereignisse nicht gefor-



Abb. 4: Überblick über das EVENT 3 Experiment im Ökologisch-Botanischen Garten. Es besteht aus insgesamt 12 Folientunnels, in denen jede der vier Klimabehandlungen (Kontrolle; Dürre; Erwärmung; Dürre kombiniert mit Erwärmung) dreimal wiederholt wird.

dert ist. Die Ergebnisse legen jetzt nahe, dass ein Frostereignis im Mai den Zuwachs von Buchen aus südlicheren Regionen, wie zum Beispiel Bulgarien stärker negativ beeinflusst, als den heimischer Provenienzen. Besonders interessant dabei ist, dass eine vorausgehende Wärmebehandlung die Spätfrostschäden verringert. Durch die künstliche Erwärmung treiben die Pflanzen schneller aus und erreichen bis zum Zeitpunkt des Frostereignisses schon die Blattréife, was vermutlich die höhere Resistenz der wärmebehandelten Gruppe erklärt.

Dies zeigt die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen Organismen, Ökosystemen und Klimaparametern (siehe Abb.5). Im EVENT 3 Experiment werden des Weiteren Provenienzen der Schwarzkiefer (*Pinus nigra*) untersucht, die vor allem auf Trockenstandorten als mögliche Alternative zu Fichte und Waldkiefer gilt. Auch hier unterscheiden sich die Herkünfte zum Teil deutlich in ihrer Wachstumsreaktion auf klimatische Extremereignisse.

Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass die gezielte Nutzung innerartlicher Vielfalt ein potentielles Werkzeug der Klimaanpassung sein kann. Allerdings ist die Übertragung von Klimaeigenschaften nicht trivial. Arten und Herkünfte reagieren teils sehr individuell. Mitunter treten Effekte erst verzögert ein Jahr nach der Behandlung auf. Für konkrete Handlungsanweisungen für die Forstwirtschaft werden weitere Herkunftsversuche benötigt.



Abb. 3: Rot-Buchen unterschiedlicher Herkünfte in einem der Gewächshäuser des EVENT 3 Experiments, hier mit aktiver (Infrarot-Strahler) und passiver Wärmebehandlung (Windschutz).



■ BJÖRN REINEKING
MIRJANA BEVANDA
KLARA DOLOS
CLAUDIA DUPKE

Dynamischer Lebensraum Wald

THEMA DER ARBEITSGRUPPE DER JUNIORPROFESSUR „BIOGEOGRAPHISCHE MODELLIERUNG“

■ Abb. 3: Rothirsch (*Cervus elaphus*).
Foto: Mirjana Bevanda

Wälder sind dynamische Ökosysteme von großer wirtschaftlicher, kultureller und ökologischer Bedeutung. Wichtige ökologische Dienstleistungen von Wäldern sind beispielsweise die Produktion von Holz, die Regulation des Wasserhaushalts, Schutz vor Steinschlag und Lawinen, oder die Bindung von Kohlenstoff. Zudem bieten Wälder den Menschen vielfältige Möglichkeiten zur Erholung. Darüber hinaus ist der Wald Lebensraum für viele Tiere, von denen wiederum Rückkopplungen auf die Waldentwicklung ausgehen können, wie zum Beispiel von Borkenkäfern oder von großen Pflanzenfressern wie Rehen und Hirschen. Die Funktionen des Waldes hängen wesentlich von seiner Dynamik und seiner Struktur, beispielsweise der Baumartenzusammensetzung und der Altersstruktur, ab. Veränderungen in der Waldstruktur vollziehen sich in der Regel sehr langsam, da die Lebensdauer von Bäumen mehrere hundert Jahre betragen kann. Durch Störungsereignisse können aber auch plötzliche Veränderungen möglicherweise großräumig angestoßen werden. Um angesichts von zu erwartenden Umweltveränderungen die möglichen Auswirkungen auf die Waldfunktionen abzuschätzen, ist ein Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse der Walddynamik notwendig.

WALDDYNAMIK: STÖRUNGEN UND IHRE WECHSELWIRKUNGEN

Die Struktur von Wäldern wird wesentlich von Faktoren wie Klima und Boden bestimmt. Darüber hinaus prägen insbesondere Störungen wie Feuer, Windwurf, Dürre und Insektenkalamitäten die Dynamik temperater Wälder. Das Eintreten eines Störungsereignisses verändert einen Lebensraum tiefgreifend und in kurzer Zeit. Um den Lebensraum Wald und seine Dynamik verstehen zu können, müssen daher neben Gleichgewichtszuständen und Reaktionen auf Mittelwerte auch Extremereignisse berücksichtigt werden.

Von sozioökonomischer und ökologischer Bedeutung sind großflächige Ausbrüche von Borkenkäfern, sogenannten Kalamitäten (Abbildung 1). Der Lebenszyklus von Borkenkäfern ist temperaturabhängig. Daher sind im Zuge des Klimawandels Veränderungen in den Störungen durch den Borkenkäfer zu erwarten. Der zu erwartende Temperaturanstieg erhöht die Geschwindigkeit der Entwicklung der Borkenkäferlarven und ermöglicht somit die Ausbildung mehrerer Käfergenerationen pro Jahr.

Zusätzlich zur Witterung wird die Populationsdynamik von Borkenkäfern von Störungen wie Windwurf, Dürre und Feuer beeinflusst. Diese haben ihrerseits bereits bedeutende Auswirkungen auf die Waldentwicklung, und deren Häufigkeit und Intensität verstärkt sich voraussichtlich ebenso im Zuge des prognostizierten Klimawandels. Die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Störungsregimen, insbesondere mögliche positive Rückkopplungen, erschweren die Abschätzung von Risiken für Wälder unter zukünftig zu erwartendem Klima. Im Rahmen des Bayerischen Forschungsverbundes „Auswirkungen des Klimas auf Ökosysteme und klimatische Anpassungsstrategien“ (FORCAST) wird diese Thematik bearbeitet. Um eine quantitative Abschätzung der Bedeutung von Interaktionen zwischen Störungsereignissen, wie zum Beispiel einer Erhöhung des Risikos eines Borkenkäferausbruchs durch Windwurf, zu ermöglichen, wird in einem ersten Schritt ein konzeptionelles Modell entwickelt, das die qualitativen Ergebnisse vorhandener empirischer Arbeiten zusammenträgt (Abbildung 2). Dieses konzeptionelle Modell bildet die Grundlage für Simulationsstudien mit dem Waldlandschaftsmodell LandClim. LandClim simuliert die Waldentwicklung von ganzen Landschaften auf der Ebene von einzelnen Bäumen. Es berücksichtigt sowohl klimatische Einflüsse als auch Störungen und Managementeingriffe. LandClim wurde unter der Leitung von Prof. Dr. Harald Bugmann an der ETH Zürich entwickelt und wird heute in verschiedenen Arbeitsgruppen eingesetzt.

LANGFRISTIGE WALDDYNAMIK

Um die zukünftige Waldentwicklung besser abschätzen zu können, ist es lehrreich, vergangene Waldentwicklungen zu untersuchen. Unter der Leitung von Dr. Paul Henne (Universität Bern) wurde mit LandClim die Ausbreitung der Fichte im Alpenraum während des Holozäns simuliert (ab etwa 12.000 Jahren vor heute), um die Faktoren welche die Ausbreitung der Fichte nach der Eiszeit begrenzten besser zu verstehen. Der langsame Prozess der Bodenbildung schien demnach eine Erklärung für die verzögerte Ausbreitung der düreempfindlichen Fichte zu sein, was konsistent mit den paläoökologischen Befunden ist.

In einer gerade begonnenen Studie werden die langfristige Perspektive der Waldentwicklung über tausende von Jahren und die Bedeutung von Störungsereignissen miteinander verbunden,



Abb. 1: Von Borkenkäfern befallene Fläche im Nationalpark Bayerischer Wald.
Foto: Mirjana Bevanda

um die Artenzusammensetzung und Waldstruktur in Neuseeländischen Wäldern zu verstehen. Ausgangspunkt des vom BMBF geförderten Projekts in Zusammenarbeit mit Dr. George Perry von der University of Auckland und Dr. Jürgen Groeneveld vom UFZ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung ist die Beobachtung, dass in Wäldern Neuseelands langlebige Baumarten, deren Individuen weit über 1.000 Jahre alt werden können, sich aber nur selten erfolgreich etablieren können, mit kürzer lebenden Arten, die sich regelmäßig verjüngen, gemeinsam vorkommen. Untersucht werden soll die Hypothese, dass seltene großflächige Störungen durch Vulkanausbrüche einen wesentlichen Anteil an der Koexistenz der verschiedenen Arten haben.

WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN TIEREN UND WALD

Rehe und Hirsche können die Waldentwicklung wesentlich beeinflussen, indem sie die Triebe jun-

ger Bäume abfressen und dadurch die Dichte und Artenzusammensetzung etablierter Bäume verändern. In einer von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Studie zum Wildtiermanagement in Schutzgebieten, durchgeführt in Kooperation mit Dr. Marco Heurich (Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald) und Dr. Lorenz Fahse (ETH Zürich), wird unter anderem der Einfluss von Rehen und Hirschen auf die Waldentwicklung im Nationalpark Bayerischer Wald untersucht (Abbildung 3). Ziel der Forschung ist es unter anderem, die Managementstrategien des Nationalparks zu verbessern.

Zum einen wird anhand von Waldinventuren untersucht, welche Faktoren, wie zum Beispiel die Waldstruktur, die Intensität des Verbisses auf verschiedenen räumlichen Skalen bestimmen. Die Grundlage hierfür bildet GPS-Telemetrie, die es ermöglicht, Tiere über einen langen Zeitraum zu verfolgen und dabei den zurückgelegten Weg der Tiere sehr detailgetreu nachzuvollziehen (Abbildung 4). Diese Daten erlauben es, tageszeitliche

Präferenzen der Tiere für bestimmte Lebensräume aufzuzeigen und ihre Aktivitätsrhythmen zu dokumentieren. Zudem wird mittels statistischer Methoden die Größe und Lage von Streifgebieten sowie deren zeitliche Variabilität untersucht. In einem ergänzenden Ansatz wird ein individuuenbasiertes Modell entwickelt, das anhand einfacher Regeln das Verhalten der Tiere räumlich und zeitlich hoch aufgelöst simulieren kann. Das regelbasierte Modell soll dazu beitragen, die Mechanismen zu identifizieren und zu beschreiben, welche zu den gemessenen Bewegungsmustern führen. In das Modell fließen abiotische (zum Beispiel Steigung) und biotische (wie das Nahrungsangebot) Umweltfaktoren ein, auf die das Individuum reagiert. Durch moderne rechenintensive Methoden können diese individuenbasierten Modelle an die beobachteten GPS-Daten angepasst werden.

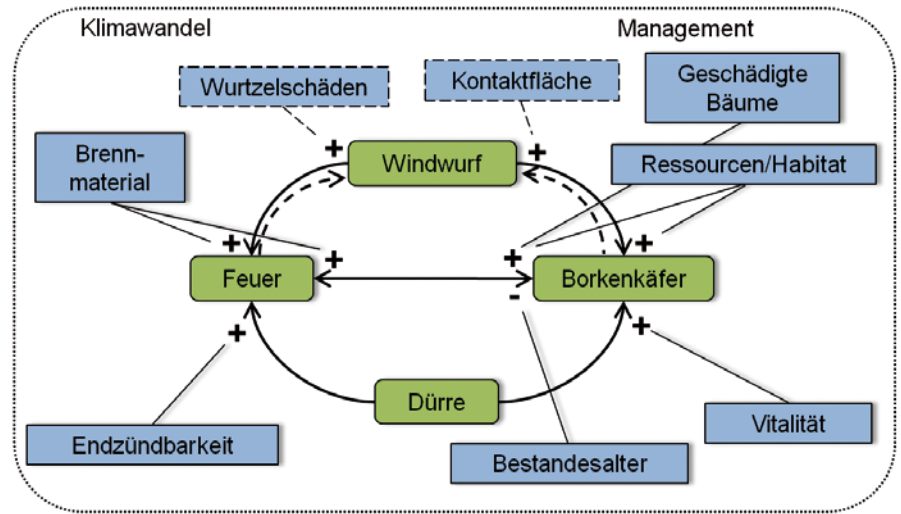
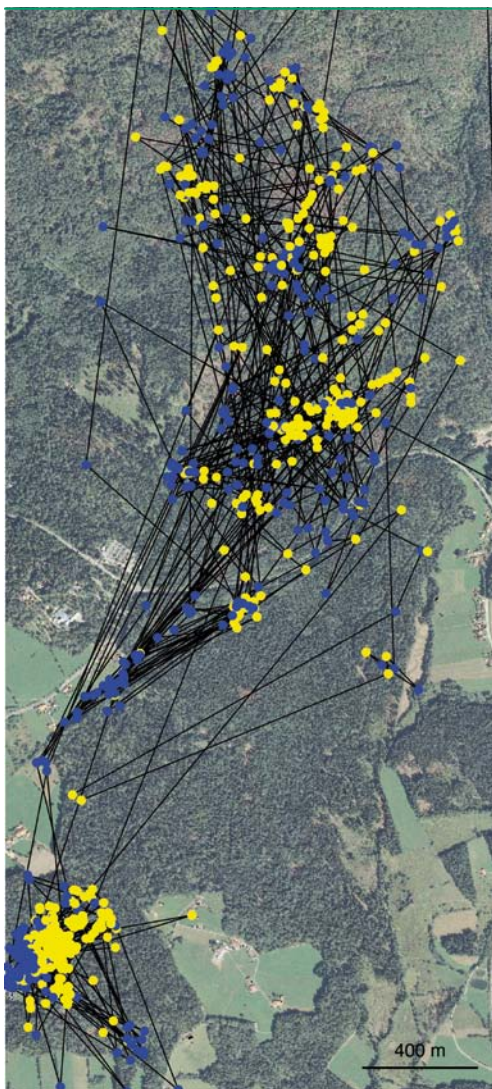


Abb. 2: Konzeptionelles Modell zur Interaktion von Störungen im Wald.



Wälder sind vielfältige und dynamische Lebensräume. Die Erhaltung ihrer Funktionalität angesichts des globalen Wandels ist eine zentrale gesellschaftliche Herausforderung. Ein besseres Verständnis der Dynamik von Wäldern kann hierzu einen wichtigen Beitrag leisten. Dabei sind sowohl kurzfristige Ereignisse als auch langfristige Trends zu berücksichtigen. Die enge Verbindung moderner empirischer Methoden mit Simulationsmodellen stellt hierbei einen Erfolg versprechenden Forschungsansatz dar.

Abb. 4 (links): Laufweg eines Rehs im Bayerischen Wald. Gelbe Punkte bezeichnen Positionen während des Tages, blaue Punkte Positionen in der Nacht.

Fotos im Kasten: Mitarbeiter der Arbeitsgruppe, von links: Björn Reineking, Claudia Dupke, Klara Dolos, Mirjana Bevanda

INFO & AUTOREN

In der Arbeitsgruppe der **Juniorprofessur „Biogeographische Modellierung“** von Prof. Dr. Björn Reineking beschäftigen wir uns mit den Mechanismen, welche die Verbreitung und Häufigkeit von Organismen auf verschiedenen räumlichen Maßstäben bestimmen. Besonderes Augenmerk gilt dem Wechselspiel von Arteneigenschaften, dynamischen Prozessen und Umweltbedingungen. Wir verwenden ein breites Spektrum von Modellierungsansätzen, von prozessorientierten, individuenbasierten Modellen bis zu traditionelleren statistischen Methoden. Dabei sind wir besonders an der Verbindung der Stärken von prozessbasierten Simulationsmodellen und statistischer Datenanalyse mittels Bayes'scher Methoden interessiert. Die Modellierung ist ein geeignetes Werkzeug, um vorhandenes Wissen über Systeme zu strukturieren, ihre Prozesse besser zu verstehen, und das zukünftige Verhalten abzuschätzen.

Die Autoren des Artikels (von links nach rechts): Prof. Dr. Björn Reineking, Dipl. Biologin Mirjana Bevanda, Dipl. Geoökologin Klara Dolos und Dipl. Biomathematikerin Claudia Dupke.





■ PATRICK POPPENBORG
THOMAS KOELLNER

Dienstleister Wald

BEWERTEN UND ENTSCHEIDEN IN MENSCH-UMWELT SYSTEMEN

■ Abb. 1: Kartoffelanbau in Costa Rica,
Reventazón (Foto: Thomas Koellner)

Das Ökosystem Wald bietet dem Menschen eine Vielzahl an Dienstleistungen, die je nach Perspektive unterschiedlich nützlich sein können. Für rein wirtschaftlich orientierte Entscheidungsträger ist der Wald in erster Linie Rohstofflieferant für Holz- und Papierindustrie. Nachhaltige Waldwirtschaft und Umweltpolitik hingegen sehen den Wald auch als Ökosystem mit erheblichem Einfluss auf globale Stoff- und Energieflüsse. Er dient als Wasserspeicher und -filter, bindet Kohlenstoff, schützt Böden vor Erosion, puffert Temperaturschwankungen, nimmt Stürmen die Kraft und bietet vielen Tier- und Pflanzenarten Lebensraum. Nicht zuletzt sind Wälder ein Ort der Erholung und Entspannung, den jedermann in seiner Freizeit aufsuchen kann. Jüngster Ausdruck einer engen Verzahnung von gesellschaftlichen Interessen an Ökosystemdienstleistungen ist die Gründung der *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES)* im Jahr 2010, einer Plattform zur Verbesserung der internationalen Vernetzung zwischen Wissenschaft und Politik mit dem Ziel, wissenschaftliche Ergebnisse und aktuelles Fachwissen in politische Maßnahmen und Lösungsvorschläge zu integrieren.

Auch wenn sich die Liste positiver Ökosystemdienstleistungen noch um einiges weiterführen ließe, ist nur ein kleiner Bruchteil davon Bestandteil

konventioneller Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Die meisten Dienstleistungen sind entweder gar nicht oder nur unzureichend monetär bewertet, was dazu führt, dass anderen Bewirtschaftungsarten bei Landnutzungsentscheidungen meist Vorrang gegeben wird. Resultat dieser Fehlanreize sind beispielsweise großflächige Umwandlungen von tropischen Wald- in Landwirtschaftsflächen, welche über alle Dienstleistungen hinweg betrachtet zu einem Nutzenverlust an Ökosystemdienstleistungen führen (siehe Abbildung 1 und 3).

Die Professur für Ökologische Dienstleistungen widmet sich derartigen Problemstellungen. Typische Fragestellungen sind: Wie lassen sich Angebot und Nachfrage von Ökosystemdienstleistungen und funktionaler Biodiversität sinnvoll messen und modellieren, um so Entscheidungen über Ressourcennutzung zu optimieren? Auf regionaler Ebene steht der einzelne Entscheidungsträger im Fokus. Hier stellt

sich die Frage, inwiefern seine Landnutzungsentscheidung von Faktoren wie Klimawandel, Politikprogrammen oder Wirtschaftsmärkten abhängt und wie sich dieses Zusammenspiel letztendlich auf Ökosystemdienstleistungen und Biodiversität auswirkt (Abbildung 2). Konkret werden diese Zusammenhänge in Forschungsarbeiten in Südkorea, Äthiopien, Costa Rica und der Schweiz mit Hilfe von räumlicher Modellierung, Fernerkundung und Umfragen bei Landnutzern untersucht.

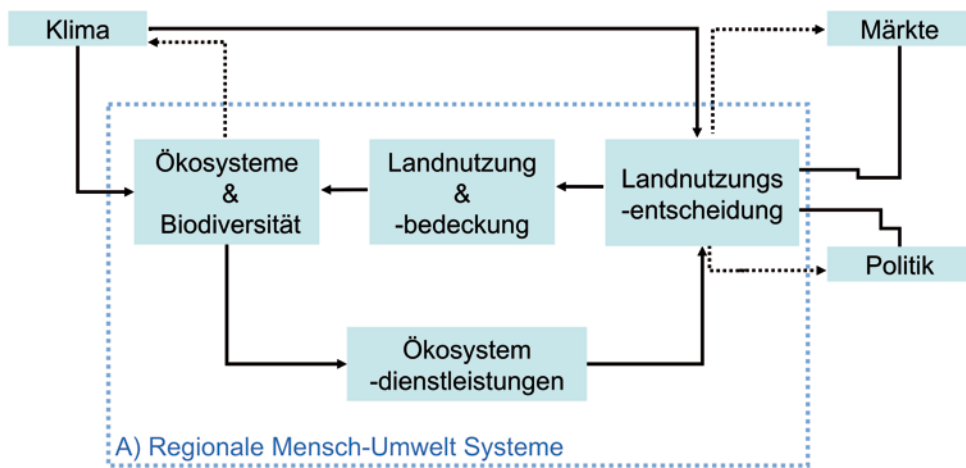
DIENTLEISTUNGEN DER WÄLDER SIND UNZUREICHEND MONETÄR BEWERTET.



Prof. Dr. Thomas Koellner, **Professur für Ökologische Dienstleistungen** an der Fakultät für Biologie, Chemie und Geowissenschaften der Universität Bayreuth. Professorship of Ecological Services (PES), University of Bayreuth, www.pes.uni-bayreuth.de



Patrick Poppenborg, MSc, Tropical and International Forestry, Doktorand an der **Professur für Ökologische Dienstleistungen**.



B) Klima als globaler Treiber

C) Märkte und Politik als globale Treiber

Abb. 2: Ökosystemdienstleistungen in Mensch-Umwelt Systemen.

1 Koellner, T., Sell, J. and Navarro, G., 2010. Why and how much are firms willing to invest in ecosystem services from tropical forests? A comparison of international and Costa Rican firms. *Ecological Economics* 69: 2127-2139.

	Internationale Firmen (n=21)		Costa Ricanische Firmen (n=25)	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
Biodiversität	14	32	63	109
Kohlenstoffbindung	65	143	88	148
Landschaftsästhetik	10	29	78	203
Schutz des Wasserhaushaltes	11	30	82	132

Tabelle 1: Nachfrage von Firmen nach Ökosystemdienstleistungen. Gezeigt werden die Investitionsbereitschaft in US\$ pro Zertifikat, welches dem Schutz von einem Hektar Wald für ein Jahr entspricht, um eine der vier Ökosystemdienstleistungen bereit zu stellen.

Eine Befragung zur Investitionsbereitschaft¹ von Firmen in bestimmte Ökosystemdienstleistungen der Wälder Costa Ricas ergab bedeutende Hinweise zur Wirksamkeit des Finanzinstrumentes „Payments for Ecosystem Services“ auf Seiten privater Nachfrage. Wie sich herausstellte, waren internationale Firmen hauptsächlich an Zertifikaten zur Kohlenstoffbindung interessiert, während Costa Ricanische Firmen darüber hinaus zur Investition in den Schutz von Wassereinzugsgebieten, Biodiversität und Landschaftsbild bereit wären (Tabelle 1). Zudem bestand ein bemerkenswert großes Interesse an indirekten und nichtfinanziellen Nutzen.

Global gesehen liegt der Forschungsschwerpunkt auf der Bedeutung von Rohstoff- und Finanzmärk-

ten für Ökosystemdienstleistungen und Biodiversität. Hauptaugenmerk gilt dabei der Weiterentwicklung der Ökobilanzierungs-Methode.

Um dem hohen Verflechtungsgrad des ökologischen und des sozio-ökonomischen Systems gerecht zu werden, sind die Arbeiten an der Professur für ökologische Dienstleistungen stark interdisziplinär ausgerichtet. Aktuell äußert sich dies in der Beteiligung am fächerübergreifenden DFG Graduiertenkolleg TERRECO, sowie in der Mitarbeit am TEEB Projekt Deutschland (*The Economics of Ecosystems and Biodiversity*). Das gewonnene Wissen soll dazu beitragen, gesellschaftlichen Akteuren die Folgen ihrer Entscheidungen im Hinblick auf Ökosystemdienstleistungen transparenter zu machen.

Abb. 3: Tropischer Nebelwald in Costa Rica, Reventazón (Foto: Thomas Koellner)



Die BayCEER Geschäftsstelle

Das Aufgabenspektrum der fünf Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in der BayCEER-Geschäftsstelle könnte nicht breiter sein:

FORSCHUNGSANTRÄGE UND NACHWUCHSFORSCHER

Die Geschäftsstelle unterstützt die BayCEER-Mitglieder in der Antragsphase für Verbundprojekte. Sie hilft beim Auf- und Ausbau des strukturierten Promotionsprogramms „Ecology and Environmental Research“ innerhalb der Bayreuther Graduiertenschule für Mathematik und Naturwissenschaften BayNAT.

PROJEKTMANAGEMENT

Verbundprojekte im BayCEER werden von der Geschäftsstelle in Managementfragen und bei Veranstaltungen mit unterstützt. Seit Anfang 2010 koordiniert Dr. Susanne Kühnholz (rechts im Bild) das EU-Projekt „Pathway“, das die europaweit diskutierte Verbesserung des naturwissenschaftlichen Unterrichts zum Ziel hat.

TECHNISCHE UNTERSTÜTZUNG VON FORSCHUNGSPROJEKTEN

Insbesondere die Freilandforschung in Verbundprojekten wird in praktischen Fragen begleitet. Gerhard Müller ist hier Experte für Elektronik: Er berät und unterstützt die Forscher bei Aufbau, Entwicklung und Wartung von elektronischen Steuerungen und Messeinrichtungen in Labor und im Freiland und kümmert sich um die Sicherheit von Versuchs- und Messaufbauten. Gerhard Kürfner leistet die feinmechanischen Arbeiten bei Aufbau, Entwicklung und Wartung von Versuchs- und Messeinrichtungen (siehe Artikel S. 44). Der Verleih dreier Fahrzeuge der UBT wird von der Geschäftsstelle in der Außenstelle Dr.-Hans-Frisch-Straße organisiert. Stationiert sind hier außerdem ein Mercedes LKW

mit Messanhänger, das Erdbohrgerät COBRA und eine Anlage zur Solarstromversorgung im Freiland.

INTERNE KOMMUNIKATION

In diesem klassischen Aufgabenbereich jeder Geschäftsstelle werden die Sitzungen des Leitungsgremiums vor- und nachbereitet, der Informationsfluss zwischen Mitgliedern und Leitung des Forschungszentrums sichergestellt und die Hochschulleitung über wichtige Entwicklungen informiert. Seit die Mitgliederzahl mit der Neustrukturierung im Jahr 2009 auf über 60 Professoren und promovierte Wissenschaftler angestiegen ist, läuft ein großer Teil der internen Kommunikation über Rundmails und Newsletter.



Das Team der Geschäftsstelle (von links): Verena Fassold, Gerhard Müller, Dr. Birgit Thies, Gerhard Kürfner und Dr. Susanne Kühnholz.

VERANSTALTUNGSMANAGEMENT UND ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

In enger Abstimmung mit der Arbeitsgruppe EDV und Datenbanken organisiert die Geschäftsstelle Veranstaltungen verschiedenster Größen – vom kleineren Workshop bis zur internationalen Tagung. Dazu zählt eine Vielzahl von Aufgaben: Werbung und Sammlung der Online-Anmeldungen im Vorfeld, Programmplanung, Organisation von Tagungsbüro und Catering und schließlich der Finanzabschluss. Erste Ansprechpartnerin ist hier Verena Faßold. Die BayCEER-Tagungsinfrastruktur wird auch universitätsintern verliehen. Um die Öffentlichkeitsarbeit – zu der die Redaktion dieses SPEKTRUMs gehört – kümmert sich Dr. Birgit Thies (Mitte), die die Geschäftsstelle leitet.

WEBLINK

- www.bayceer.uni-bayreuth.de

DIENSTLEISTER WALD

■ HOLGER LANGE
MICHAEL HAUHS

Simulation menschlicher Eingriffe im Wald

KOMPLEXE MODELLE VOM WALD
UND DER KOMPLEXE WALD
ALS MODELL



- Abb. klein: Ein Dach in einem Waldbestand in Gårdsjön (Schweden), das den sauren Regen abhalten sollte.
- Abb. links: Umweltüberwachung (hier Niederschlagsmesser) in Gårdsjön.

In den Umweltwissenschaften gelten Wälder oft als komplexe Ökosysteme. Zur naturwissenschaftlichen Beschreibung ihrer Struktur und Funktion muss man auf lebende und unbelebte Komponenten eingehen, die durch vielfältige Interaktionen miteinander verknüpft sind. Diese Feststellung klingt selbstverständlich. Dennoch handelt es sich nur um einen möglichen Zugang zu Wäldern, einem Modell, das so dominant ist, dass es leicht mit der Realität verwechselt werden kann. Daneben gibt es eine ganz andere Perspektive, die für Waldbesitzer und Ökosystemmanager typisch ist. In Deutschland befindet sich ein Großteil des Waldes in öffentlichem Besitz. Als Nutzungsziele sind in den letzten Jahren neben dem Holztertrag auch Erholungsfunktionen und der Naturschutz getreten. Manche Wälder wurden aus der Holznutzung genommen und in Nationalparks umgewandelt. Das liegt an einer Reihe von Faktoren, von denen niedrige Holzpreise und zunehmender Import von Holz aus Osteuropa nur zwei sind. Hinter dieser Entwicklung und der politischen Auseinandersetzung darüber steht oft die Vorstellung, dass der Wald ohne den Einfluss des Menschen zu einer *natürlichen* Vegetationsform wird. Ein solcher „wilder Wald“ (nicht „Urwald“, dieser Begriff setzt voraus, dass im entsprechenden Gebiet niemals eine Nutzung stattgefunden hat), der in Deutschland stets ein *verwilderter* Wald (Entwicklungs-Nationalparks) ist, wird zum eigenständigen Wert. Wald ist in unseren Landschaften das Symbol für „die Natur“ und das Ursprüngliche. Die politische Auseinandersetzung über den Eigenwert des (wild)en Waldes findet Ausdruck in der Abwägung, welche Flächen den Zielen des Naturschutzes gewidmet werden, und auf welchen die Wertbildung (weiterhin) nach ökonomischen Prinzipien erfolgt. Es gibt auch Ansätze, die die Naturschutz- oder die Erholungsfunktion oder andere Servicefunktionen wie z. B. Kohlenstoffbindung ökonomisch bewerten, beziehungsweise „monetarisieren“. Das kann private Waldbesitzer oder die öffentliche Verwaltung dazu bringen, den Waldumbau voranzutreiben (vergleiche Artikel S. 82). Es wird klar, dass der eben beschriebene Zugang zu Waldökosystemen von ganz anderer Art ist als der naturwissenschaftliche. Hierbei sind es gerade die einfachen, wiederholbaren Aspekte des Systems, die beim Management im Fokus liegen. Die Ökologische Modellbildung an der Universität Bayreuth verfolgt seit 1992 ein Forschungsprogramm, das beiden Perspektiven – der des Wissenschaftlers und der des Ökosystem-Managers

– gerecht zu werden sucht (siehe Spektrum Heft 2/1999). Die Modellbildung findet dabei nicht nur in den Köpfen, sondern auch in Computern statt. Für Modellierer müssen dazu die oben dargestellten Beschreibungen in mathematische Formen gebracht werden. Beim naturwissenschaftlichen Zugang zum System ist es naheliegend, vorhandene Daten zu nutzen oder Messungen durchzuführen, deren Ergebnisse vom Modell reproduziert werden sollen. Außerdem soll das Modell logisch konsistent sein: das, was an den Ergebnissen des Modells für überprüfbar und nützlich befunden wird, soll auch nachweislich aus den theoretischen und systematischen Grundlagen des Modells folgen. Daher werden in diesem Zugang oft Prozesse unterstellt, die im dynamischen System Wald ablaufen, es handelt sich um *Prozessmodelle*. Die Mehrzahl der Beiträge aus BayCEER in diesem Heft stammen daher auch aus der *Prozessforschung*. Das Problem ist, dass jeder Versuch, einen Wald in Form von Prozessen und Naturgesetzen dynamisch zu

AUTOREN

Prof. Dr. Holger Lange



arbeitet als Seniorwissenschaftler am **Norwegischen Institut für Wald und Landschaft** in Aas, Norwegen, wo er die Abteilung Forstökologie leitet. Gleichzeitig ist er Professor der Geowissenschaften an der Universität Bayreuth. Er erhielt sein Diplom sowie seinen Dokortitel

in Theoretischer Physik an der Universität Dortmund und habilitierte sich im Fach Ökologische Modellbildung an der Universität Bayreuth. Seine Forschungsinteressen gelten der Modellierung terrestrischer Ökosysteme, besonders im Hinblick auf Wälder und Wassereinzugsgebiete, Hydrologie, die Erkennung von Mustern in Langzeitdatensätzen, Zeitreihenanalyse, Skalierungseigenschaften und langreichweitige Korrelationen, nichtlineare multivariate Statistik, Populationsdynamik von Schadinsekten sowie die Fernerkundung in der Forstwissenschaft, speziell im Hinblick auf hyperspektrale Aufnahmen, Lidar und SAR.

Prof. Dr. Michael Hauhs



ist Professor für Ökologische Modellbildung an der Universität Bayreuth. Er unterrichtet Geoökologie, ökologische Modellbildung, Zeitreihenanalyse und Umweltin-

formatik. Er erhielt sein Diplom sowie seinen Dokortitel im Fach Forstwissenschaften an der Universität Göttingen, wo er im Fach Bodenkunde habilitierte. Er hat über Wassertransportmodelle, Waldwachstumsmodelle, künstliches Leben, die theoretischen Grundlagen der Modellbildung und die Annäherung an interaktive Modelle aus der Informatik veröffentlicht.

beschreiben, scheinbar unweigerlich zu einem komplexen Modell führt. Die Überschrift „komplexe Modelle vom Wald“ steht für diesen Modelltyp. Er wird aber dem anderen Zugang, der auf die einfachen Aspekte des Systems abzielt, nicht gerecht und ist in vielen Fällen auch nicht praktisch relevant. In diesem Sinn besitzen also viele Waldmodelle Defizite.

Die öffentliche Einschätzung des „wildes Waldes“ als wertvoll ist auf der Ebene der praktischen Relevanz angesiedelt. Die breite öffentliche Zustimmung zu allen Maßnahmen zum Erhalt des Waldes demonstriert die Sicherheit dieses Urteils. Da Wälder sich stets wandeln, wird nicht der (vergängliche) Wald selbst zum Träger der Wertschätzung, sondern die Dynamik, die seinen Wandel als naturwissenschaftliches Modell beschreibt. Als wichtige Naturschutzstrategie wird heute der *Prozessschutz* in mehreren deutschen Nationalparks als Leitbild genannt (vergleiche Meinung S. 94).

Aus naturwissenschaftlicher Sicht werden Wälder also mit den Instrumenten der Modellbildung wie Moleküle, Planetensysteme oder das Wetter als dynamische Systeme beschrieben. Ihre Besonderheit liegt aus der Sicht dieser Modellansätze lediglich in der hohen Komplexität. Im Unterschied zu den anderen Beispielen ist aber die natürliche Dynamik

WALD IST IN UNSEREN LANDSCHAFTEN DAS SYMBOL FÜR „DIE NATUR“ UND DAS URSPRÜNGLICHE.

von Wäldern *schutzbedürftig*, zum Beispiel vor Störungen durch den Menschen; das ist eine *Wertung*, die für dynamische Systeme in

aller Regel nicht zu finden ist und meistens auch nicht als Aufgabe der beteiligten Wissenschaftler gesehen wird.

Was hat die Komplexität eines Systems mit dessen Schutzbedürftigkeit und zu schützenden Werten zu tun? Bei näherem Hinsehen offenbart sich hier ein eklatantes Missverhältnis zwischen wissenschaftlichem Prozessverständnis und Relevanz im Hinblick auf Bewertung. Die Variablen, die für eine Bewertung zentral sind und auch in der öffentlichen Debatte am häufigsten vorkommen, wie Holzproduktion und -nutzung, Biodiversität, Artenverschiebungen und Eingriffe des Menschen, kommen in den Prozessmodellen gar nicht vor. Es ist immer noch nicht gelungen, auf der Basis von dynamischer Systemtheorie und Prozessen Eigenschaften vorherzusagen, die für die Bewertung relevant sind.

Das liegt unter anderem daran, dass die Nutzerperspektive schwieriger zu formalisieren ist. Viele der „Modelle“ und Einschätzungen liegen nur in verbaler, oft diffuser Form vor. Die aus theoretischer Sicht besonders rigorosen Prozessmodelle und die aus der Sicht der Nutzung besonders relevanten Modelle erscheinen daher als inkompatibel. Die relevanten Aspekte ergeben sich nicht aus dem Prozessverständnis. Dieses Dilemma ist allgemein bekannt. Das Problem ist, dass der Grund für diese Schwierigkeit nach wie vor in der Komplexität von Waldökosystemen selbst gesucht wird. Der Grund könnte aber auch „im Auge des Betrachters“ liegen, und zwar in Form einer unangemessenen Modellbildung zum Beispiel menschlicher Eingriffe.

Wertungen kommen in Prozessmodellen nicht vor. Wenn Wälder tatsächlich „normale“ dynamische Systeme wären, könnten sie mit Prozessmodellen adäquat beschrieben werden. Wir würden ihnen „danach“ Werte von *Außen* aus unserer kulturellen Perspektive zuschreiben. Das Attribut „Komplexität“ ist aber ebenfalls eine solche kulturelle Zuschreibung. Dieser Begriff gehört daher nicht in das Vokabular der naturwissenschaftlichen Sicht zur Charakterisierung der Besonderheit von Wäldern, er charakterisiert viel treffender unsere *Wahrnehmung* von Wäldern als komplex. Der zweite Teil der Überschrift „Modelle vom komplexen Wald“ steht für diese Analyse des dominanten Modelltyps, der sich als unzureichend erwiesen hat.

Vollständig mit Moos bedeckter Waldboden als Folge einer Phosphordüngung in Gårdsjön.



Das ist das zentrale Dilemma der Modellbildung von Waldökosystemen. Wir verfolgen daher eine Alternative, die nicht bei den im System ablaufenden Prozessen ansetzt. Die Formalisierung dieser Klasse von Modellen des Waldes liefert die Informatik. Sie stellt einen umfangreichen Satz an formalen Abstraktionen bereit, die in der Ökologischen Modellbildung auf Waldökosysteme angewendet werden können.

Der grundlegende Unterschied liegt in der Verwendung der Begriffe *Zustand* und *Verhalten*. In der Physik ist der Zustand die primäre Kategorie; das Verhalten des Systems folgt sekundär aus dem Anfangszustand und den Entwicklungsgleichungen. Entscheidungen kommen nicht vor. In der Informatik ist das Verhalten einer Software oder des damit interagierenden Nutzers die primäre Kategorie. Die Abfolge von Interaktionen hat den sekundären Effekt, dass sich die inneren Zustände verändern.

Der Umgang von Nutzern und Managern mit Waldökosystemen entspricht viel eher dem Informatikzugang. Förster interagieren bei ihren Eingriffen und Entscheidungen mit dem System wie über eine Nutzeroberfläche eines Simulators; die Frage nach den *kausalen* Zuständen im Inneren des Systems wird dabei nicht gestellt und erscheint aus Sicht der erwarteten Serviceleistung des Waldes auch als irrelevant. Das Erfahrungswissen, das Förster aufgebaut haben, gründet sich nicht auf Prozessforschung.

In diesem neuartigen Zugang vom „Wald als komplexes Modell“ geht es also darum, ein einfaches Modell einer Schnittstelle zu entwickeln.

Wir gehen dabei von nachhaltig genutzten Waldökosystemen aus, wie sie die forstliche Tradition in Deutschland hervorgebracht hat. Dieser genutzte Wald kann als ein

gezügelmtes System verstanden werden, an dessen „Nutzerschnittstelle“ sich Abläufe (eben Verhalten) erfolgreich wiederholen lassen. Forschungsziel ist die möglichst vollständige Beschreibung aller relevanten Entscheidungssituationen, die an diesen Schnittstellen auftreten können. Durch eine (annähernd) vollständige Beschreibung des akkumulierten Erfahrungswissens wird die Bewertung jeder konkreten Situation zu einem *internen* Aspekt derartiger Modelle. Es ist dabei von vorneherein klar, dass diese Modelle sich aus prinzipiellen Gründen nicht als Vorhersage-Instrumente für neu-



Im See Gårdsjön wurde der Verlust von Fischarten durch Versauerung umfassend dokumentiert. Die Fragen unserer jährlichen in Gårdsjön mit Studenten durchgeführten Markierungsversuche lauten: Wie gut lassen sich Freiland-Experimente wiederholen? Welche Prozesse kann man in Waldökosystemen identifizieren?

artige Umweltbedingungen eignen. Sie können aber in umgekehrter Blickrichtung als ein sensibler Indikator im Hinblick auf die Wirkung von veränderten Umweltbedingungen auf genutzte Wälder dienen. Der Aufwand steckt dabei in der Dokumentation der bisher gemachten (relevanten) Erfahrungen und Beobachtungen, um auf dieser Basis Abweichungen früher erkennen und sicher klassifizieren zu können.

Das umfangreiche, wenn auch oft nicht gut formalisierte und dokumentierte Erfahrungswissen konnte auch in der Vergangenheit erfolgreich zur Identifikation abweichenden Verhaltens eingesetzt werden. Dort, wo Angler entgegen ihren Erwartungen keine Fische mehr fingen, konnte zuerst die Wirkung des sauren Regens in Skandinavien nachgewiesen werden.

Dort, wo Förster entgegen ihren Erwartungen Vergilbungen von Nadeln an Bäumen beobachteten, konnte zuerst die Wirkung des sauren Regens in Mit-

teleuropa auf Wälder nachgewiesen werden. Dort, wo Weinbauern entgegen ihren Erwartungen früher im Jahr die Trauben lesen konnten, wird eine frühe Wirkung des Klimawandels in Mitteleuropa vermutet.

Das Forschungsprogramm der Ökologischen Modellbildung versucht diese Erklärungs- und Formalisierungsleistungen mit den Mitteln der theoretischen Informatik zu erreichen. Unser Ziel ist es, bei Modellen von Waldökosystemen theoretische Rigorosität, logische Konsistenz und praktische Relevanz der Anwendung miteinander zu verbinden.

DAS ERFAHRUNGSWISSEN, DAS FÖRSTER AUFGEBAUT HABEN, GRÜNDET SICH NICHT AUF PROZESSFORSCHUNG.

DIENSTLEISTER WALD

■ FRANZ BOGNER

Der Wald im Wandel der Zeit

UMWELTBILDUNG IM
„GRÜNEN KLASSENZIMMER“



■ Lernstation zum Thema der Pflanzen-
und Baumbestimmung

Unter dem Titel „Der Wald im Wandel der Zeit“ firmiert ein mehrtägiges Umweltbildungsprogramm, das mit dem spezifischen Ziel der Förderung umweltspezifischer Kompetenzen am Lehrstuhl für Didaktik der Biologie entwickelt wurde. Die Doktorandin hinter diesem Programm ist Frau Dipl. Biol. Alida Kossack. Sie ist es, die in den letzten drei Jahren im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Kompetenzmodelle zur Erfassung individueller Lernergebnisse und zur Bilanzierung von Bildungsprozessen“ das Umweltbildungs-Unterrichtskonzept von der bloßen Theorie- auf die tragfähige Praxis-Schiene gesetzt hat.

Umweltbildung wird in der Regel als eine Art „neuer“ Allgemeinbildung – im Sinne von Bewusstseins- und Wertewandel – verstanden. Demgegenüber wird in der Umweltpsychologie und in der Fachdidaktik zunehmend deutlich, dass vor allem spezifischen Handlungs- und kognitiv-emotionalen Kompetenzen eine große, wenn nicht die entscheidende Bedeutung beim Hervorbringen umweltgerechten Handelns zukommt.

Entstanden ist schließlich ein 3-tägiges und ein 1-tägiges Umweltbildungsprogramm, das kombiniert sowohl in der Schule als auch im Grünen Klassenzimmer (Wald) umgesetzt wird. Im Rahmen des Projekts nahmen knapp 550 Real- und Hauptschüler/innen der 5. und 6. Jahrgangsstufe der Region teil. Das Programm thematisierte unterschiedliche zeitliche Dimensionen, die besonders im Ökosystem Wald sichtbar werden (Abb.1). Es ging dabei natürlich um die Grundlagen des Ökosystems Wald, aber auch um lokale, regionale und globale Einflüsse des Menschen auf dieses Ökosystem und generell um umweltschutzrelevantes Wissen in diesem Großthema.

Prof. Franz X. Bogner

Umweltbildung ist seit Jahren eine der vier dominanten Forschungssäulen am **Lehrstuhl Didaktik der Biologie**, der von Prof. Bogner geleitet wird. Immer werden dabei theoriegeleitete Einzelthemen praxisorientiert aufbereitet, in die Schulen getragen und empirisch umfangreich begleitet, um fundierte Aussagen über Auswirkungen der Module auf Schüler machen zu können.



Sowohl die 1-tägigen als auch 3-tägigen Module beinhalteten das gleiche Spektrum an „indoor“ und „outdoor“ Lerneinheiten, so dass ein direkter Vergleich der beiden Zeiteinheiten ermöglicht wurde. Während in den Unterrichtsräumen gängige schülerzentrierte Lerneinheiten wie selbstständig erarbeitete Präsentationen und „Lernen-an-Stationen“ angeboten wurden, konzentrierten sich

WEBLINK

- www.bayceer.uni-bayreuth.de/didaktik-bio



Simulation der Vernetzungen innerhalb des Ökosystems, bei der jeder selbst Hand anlegen darf.

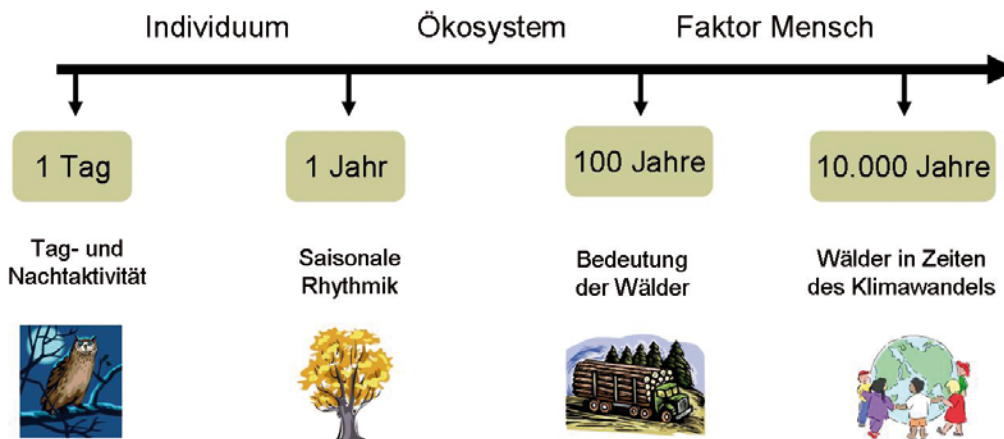


Abb 1: Überblick der vier ausgewählten Zeitschienen der Unterrichtseinheiten unter Berücksichtigung anthropogener Einflüsse auf das Ökosystem Wald.

Abb 2: Übersicht der Lerninhalte beider Unterrichtsmodule.

3-tägiges Modul		
1. Tag	2. Tag	3. Tag
<ul style="list-style-type: none"> • Gruppenpräsentationen (indoor) • Spiele und Lerneinheiten (outdoor) • Nachtexkursion (outdoor) 	<ul style="list-style-type: none"> • Stationenlernen I (indoor) • Waldrallye (outdoor) 	<ul style="list-style-type: none"> • Stationenlernen II (indoor) • Umweltideen von Schülern (indoor)
1-tägiges Modul		
<ul style="list-style-type: none"> • Gruppenpräsentationen (indoor) • Spiele und Lerneinheiten (outdoor) • Waldrallye (outdoor) • Stationenlernen I (indoor) • Nachtexkursion (outdoor) 		

die erlebnisorientierten Lerneinheiten im Wald auf die originale Begegnung mit der Natur (Spiele, Nachtexkursion), aber auch die spielerische Vermittlung von Grundlagenwissen im Grünen Klassenzimmer (Waldschichten, Nahrungsnetze). Im Rahmen einer Waldrallye konnten sich die Schüler/innen das Wissen experimentell aneignen. Der konsequente Einsatz von Gruppenarbeiten erhöhte die Motivation förderte neben dem Austausch an neu erworbenem Wissen auch die soziale Beziehung zwischen den Schüler/innen (Abb.2).

Im Kern des Forschungsprojekts stand und steht die Entwicklung eines empirisch fundierten ökologiespezifischen Kompetenzmodells, das alle Handlungs- und kognitiv-emotionalen Kompetenzen psychometrisch modelliert. Erklärtes Ziel war dabei insbesondere die umweltspezifischen Handlungs- und kognitiven Kompetenzen theoretisch-empirisch zu integrieren. Anhand von ökologisch

relevanten Zeiträumen wird im Rahmen des Umweltbildungsprogramms umweltspezifisches Wissen erlebnisorientiert in Form von Gemeinschaftsarbeiten angeeignet, hinterfragt und praxisnah weiterentwickelt. Konkrete Handlungsoptionen werden aufgezeigt, diskutiert und deren Umweltschutzpotentialen gegenübergestellt. Im Vordergrund steht die kritische Auseinandersetzung mit alltagsnahen Situationen, um auf diesem Weg umweltfreundliche Verhaltensweisen im Alltag fester zu integrieren. Die eintägigen und dreitägigen Module sowohl am schulischen als auch außerschulischen Lernort sollen unter verschiedenen Fragestellungen analysiert werden. So konzentrieren sich die Forschungsfragen auf den Lernzuwachs umweltrelevanten Wissens an 3-tägigen schulischen und außerschulischen Lernorten, den Einfluss von 1- und 3-tägigen Schulmodulen auf die Zunahme der individuellen Naturverbundenheit und die Änderung von Umwelteinstellung (Naturschutz- und Naturnutzungspräferenzen) sowie Umweltverhalten durch 3-tägige Schulprojekte.

Abb. 3: Ausgewählte Beispiele der drei unterschiedlichen Wissensarten.

Systemwissen

Allgemeine Fakten:

- Bedeutung der Wälder
- Nachhaltige Forstwirtschaft
- Entstehung und Wirkungsweise von Luftschadstoffen

Handlungswissen

Handlungsmöglichkeiten:

- Umweltzertifikate
- Umweltfreundliche Schulhefte
- Sommer: Nahverkehr/Fahrrad

Wirksamkeitswissen

Umweltschutzpotenzial:

- Energiesparen
- Papierrecycling/ Mülltrennung
- Kauf regionaler Produkte

Das Unterrichtsprojekt steht damit in der langen Tradition von Umweltbildungsarbeit am Lehrstuhl für Didaktik der Biologie. Freilandunterricht hat im Biologieunterricht eine Tradition, die über die Jahrzehnte hinweg unterschiedliche Ausprägung erfahren hat. Dabei wurde und wird von der Annahme ausgegangen, dass ein erlebnisorientierter Unterricht auf der Basis einer originalen Begegnung mit der Natur zu besseren Ergebnissen führen kann als konventioneller, oft lehrerzentrierter Unterricht dies vermag. Vereinzelt Untersuchungen haben einem solchen Unterricht im Freiland den Lernerfolg besonders jüngerer und leistungs-



Lernstation zur Stockwerksbildung innerhalb eines Laubwaldes.

schwächerer Schüler/innen bestätigt. Diese und vergleichbare Befunde deuten darauf hin, dass ein Erlernen biologischer Sachverhalte durch Primärerlebnisse offensichtlich zu anderen Ergebnissen führen kann als die Vermittlung gleicher Lerninhalte durch Sekundärerfahrungen, also etwa durch Medien oder verbale Darstellungen.

Einsatz des Bayreuther 2-MEV-Messinstruments (eine empirische Skala zur Erfassung von Umweltbewusstseinstellungen) eine Vorauswahl geeigneter Unterrichtsansätze für unterschiedliche Schülerpopulationen möglich werden könnte.

Der Einfluss von Freilandunterricht kann daher nicht nur durch eine reine Überprüfung der Kenntnisse bewertet werden, sondern muss darüber hinaus auch zum Beispiel geänderte Einstellungen berücksichtigen. Gerade weil mehr als nur eine Vermittlung von abfragbarem Wissen angestrebt wird, sind Lernzielkontrollen im Freilandunterricht sehr viel schwieriger zu etablieren als im konventionellen Unterricht: Die Überprüfung von Einstellungen, von Einstellungsänderungen oder von individuellem Handeln gestaltet sich als komplexer Ansatz, auch wenn viele Praktiker vor Ort an den Erfolg ihres Unterrichts in freier Natur glauben. Dabei wurde auch darauf geachtet, inwieweit durch den



Schulklasse am Ende der erfolgreichen Unterrichtseinheit.



MEINUNG

■ PEDRO GERSTBERGER
STEFAN PEIFFER

Der Schutz alter Wälder

EIN PLÄDOYER FÜR DIE BUCHEN-
WÄLDER DES STEIGERWALDS

■ Frühlingsaspekt mit Bärlauchblüte auf
wechselfeuchem Boden im Steigerwald

Deutschland ist ein Waldland: rund 31 % der Bundesfläche sind mit Wald bestanden. Damit gehört Deutschland zu den walddreichsten Ländern Europas.

Die Definition des Begriffs ‚Wald‘ berücksichtigt aber nicht, ob es sich um einen Naturwald, einen naturnahen Wald oder um einen gepflanzten Forst handelt. Auch die Baumartenzusammensetzung spielt bei der Begriffsbestimmung keine Rolle. Mit einem Anteil von über 50 % überwiegen in Deutschland immer noch naturferne Nadelholz-Monokulturen (mehrheitlich Fichte und Kiefer) mit gleichartigem, weil ehemals gepflanztem Baumbestand („Altersklassen-Forste“). Große Anstrengungen werden in Deutschland inzwischen unternommen, diese Wälder wieder in naturnähere Wälder mit standortheimischen Laubholzarten, vor allem der Buche, umzuwandeln, weil Nadelholzforste gegenüber vielerlei Gefährdungen (Sturmwurf, Klimaänderungen, Schädlinge) instabiler sind als Mischwälder.

Die Forstwirtschaft legt das Erntealter der Bäume auf im Schnitt 80 - 100 Jahre fest, bei dem sich die höchsten Renditen im Holzzuwachs erzielen lassen. Bestände, die älter als 150 Jahre sind, gehören in Mitteleuropa zu den seltenen Ausnahmen, wobei zu berücksichtigen ist, dass Buchen bis 500 Jahre, Eichen bis über 1.000 Jahre alt werden können. Für eine große Zahl an Tieren, Pflanzen, Pilzen und Flechten bieten erst alte, reife Wälder mit einem entsprechend hohem Anteil an Totholz optimalen Lebensraum: allein über 1.200 Pilzarten wurden im Buchen-Nationalpark Hainich in Thüringen bisher nachgewiesen, wobei Experten sogar von mindestens 2.000 vorhandenen Arten ausgehen. In diesen naturbelassenen Urwäldern spielen interne Kreislaufprozesse aller Nährstoffe, des Wassers und der Energie die wesentliche Rolle. Produzenten (Aufbau) und Destruenten (Zersetzung, Abbau) befinden sich insgesamt im Gleichgewicht, wobei der Boden als großes Kohlenstoff-Endlager fungiert. Derartige Urwälder sind in Mitteleuropa aber bis auf wenige Relikte (oft Bannwälder oder Jagdbezirke aus Feudalzeiten) durch ihre Nutzung devastiert und schließlich beseitigt worden.

Die größten, zusammenhängenden und naturnahen Buchenaltwälder Bayerns befinden sich neben dem Spessart vor allem im Steigerwald. Mit der Forschungsfläche Steinkreuz im Steigerwald (Forst-

betrieb Ebrach) verfügt das Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung (BayCEER) an der Universität Bayreuth über eine wertvolle Buchen-Traubeneichen-Altholz-Messfläche für alle Fragen der interdisziplinären Waldökosystemanalyse. Seit gut 20 Jahren wurden und werden hier Fragen der Photosynthese und Kohlenstoffspeicherung, des Streuabbaus, der Humusneubildung, des Wasser- und der Elementkreisläufe untersucht. Die Ergebnisse belegen den herausragenden Wert alter Buchenwälder für die Kohlenstoffspeicherung im Boden. Schon vor Jahren hat BayCEER in Briefen an die Umweltminister Bayerns und des Bundes auf die Notwendigkeit eines verbesserten Schutzes der Altbuchenwälder des Steigerwalds hingewiesen.

In den vergangenen drei Jahrzehnten sind in Deutschland vielerorts sogenannte Naturwaldreservate (NWR) durch die Forstverwaltungen eingerichtet worden. Dabei handelt es sich um Waldbestände, die in ihrem Natürlichkeitsgrad Waldtypen darstellen, die für die jeweilige Region

DEUTSCHLAND IST EIN WALDLAND

AUTOREN

Dr. Pedro Gerstberger

ist Diplom-Biologe mit Schwerpunkt Botanik und arbeitet als Akademischer Direktor am Lehrstuhl für Pflanzenökologie der Universität Bayreuth.

Der **Lehrstuhl für Pflanzenökologie** untersucht Stoffkreisläufe, Wassernutzung und Gaswechsel von Pflanzen und Pflanzengemeinschaften, insbesondere von Wäldern aller Klimazonen. Er setzt sich mit der Biodiversität von Vegetationsbeständen auseinander und befasst sich mit dem Schutz und dem Management wertvoller Biotope und Artengemeinschaften. Ferner laufen Untersuchungen an schnellwachsenden, ausdauernden Bioenergie-Pflanzen zur ökologisch angepassten Produktion von Bio-Methan.



Prof. Dr. Stefan Peiffer

Prof. Dr. Stefan Peiffer leitet den **Lehrstuhl für Hydrologie** und ist seit 2005 geschäftsführender Direktor des BayCEER.

Selbst ein Bayreuther Geoökologe der ersten Stunde, kehrte er 2003 nach Stationen in Luzern, Colorado und Aachen an die Universität Bayreuth zurück. Seine Arbeitsgebiete umfassen Grundwasserschutz, Umweltgeochemie, Altlasten, Bergbaufolgen und Seensanierung. Privat ist er im Bund Naturschutz aktiv.

Der alljährliche Laubfall ist die Quelle der Humusbildung und Kohlenstofffestlegung in Wäldern. Hier: verrottendes Buchenlaub im Steigerwald.



besonders charakteristisch sind. Diese NWR wurden aus der forstwirtschaftlichen Bewirtschaftung völlig herausgenommen, um als Studienobjekte für die weitere Waldentwicklung zu dienen. Die natürlichen Prozesse laufen hier ungehindert von Nutzungseingriffen ab. So kann analysiert werden, wie sich beispielsweise der Klimawandel auf die Struktur und die Baumartenzusammensetzung der Bestände auswirkt, um damit letztlich Strategien für die Bewirtschaftung benachbarter Nutzwälder abzuleiten. Zudem sollen sie der Sicherung der biologischen Vielfalt dienen. In Bayern gibt es über alle Regionen verteilt insgesamt 158 NWR (überwiegend Staatswaldflächen), die zusammengekommen eine Fläche von beachtlichen 7.000 Hektar umfassen. Ihr Anteil an der bayerischen Waldfläche beträgt aber nur bescheidene 0,25 % und damit wird klar, dass sie letztlich nur kleine Insel-Refugien in einem Meer genutzter Holzproduktionsflächen sind. Waldtypische Tier- und Pflanzenarten, die nur über ein geringes Fernausbreitungsvermögen verfügen, sind kaum in der Lage sich von einem Reservat zum nächsten auszubreiten.

Viele großflächige Wald- und Forstbereiche in Deutschland unterliegen diversen Schutzkategorien: sie sind Landschaftsschutz- oder Flora-Fauna-Habitat-Gebiete, Biosphärenreservate oder Naturschutzgebiete. In allen diesen gilt (mit ganz wenigen Ausnahmen): die ordnungsgemäße Forstwirtschaft bleibt weiterhin zugelassen. Die Holzressourcen werden also auch in eigentlich geschützten Wäldern genutzt und da-

mit die Kreislaufprozesse, was Holz und Kohlenstoffspeicherung betrifft, unterbrochen. Zu groß ist der Bedarf an Holz als Industrierohstoff oder zur thermischen Verwertung.

Aufgrund ihrer Fähigkeit, große Mengen von Kohlendioxid zu binden, fungieren Wälder auch als wichtige Klimafaktoren. Hartnäckig hält sich eine von der Forstwirtschaft verbreitete Hypothese, dass nur genutzte Wälder eine maximale CO₂-Speicherung ermöglichen, womit die Bewirtschaftung (Holzeinschlag) von Wäldern auch in Schutzgebieten gerechtfertigt wird. Dabei wird gerne auf die Konstruktion von hölzernen Dachstühlen etc. aus dem geschlagenen Holz verwiesen, womit eine lange Speicherzeit für den eingelagerten Kohlenstoff postuliert wird. Etablierte, alte Wälder würden hingegen nur noch gering zur Nettokohlendioxid-Fixierung beitragen. Für die im oberirdischen Stammholz-Zuwachs umgesetzte CO₂-Menge mag dies zutreffen. Verkannt wird bei dieser Ansicht aber, dass durch die enormen Streumengen alter Wälder (Blattfall im Herbst, abgestorbene Zweige und Äste, Wurzelnekromasse) der Zuwachs des Kohlenstoffgehalts im Ökosystem Wald durch die Humusbildung im Boden erst in einem Alter weit jenseits des derzeitigen Erntealters einer Sättigung zustrebt. Selbst unsere noch jungen „Urwälder“ in

Deutschland, wie im Nationalpark Hainich mit Baumaltern von „nur“ 180-220 Jahren, lassen noch keine Sättigung in der Kohlenstoffspeicherung des Gesamtsystems er-

kennen, wie Analysen des Max-Planck-Instituts für Biogeochemie in Jena belegen.

**DER NATURSCHUTZ IST – RECHTLICH
GESEHEN – NICHT ANGELEGENHEIT
DES BUNDES, SONDERN DER LÄNDER.**

Die Rodung von Wäldern hat erwiesenermaßen einen dramatischen Humusverlust mit resultierenden CO₂-Emissionen zur Folge, der auch durch nachfolgende Wiederaufforstungen innerhalb einer Baumgeneration nicht wieder behoben werden kann. Damit ist offensichtlich, dass die immense Kohlenstofffestlegung im Bodenumus einen wesentlich längeren Zeitraum umfasst, als jene im Rahmen der menschlichen Nutzung des Holzes. Für diese wird nur eine mittlere Zeitspanne von 15 bis maximal 100 Jahre veranschlagt, bis das im Holz festgelegte CO₂ wieder in die Atmosphäre zurückkehrt.

Vor allem alte, ungenutzte Naturwälder und ihre ungestörten Böden sind also Kohlenstoffsinken. Weltweit nehmen Wälder etwa ein Drittel aller vom Menschen produzierten CO₂-Mengen auf.

Im Rahmen der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und des Kyoto-Protokolls hat sich Europa verpflichtet, von 2008 bis 2012 die Kohlendioxid-Emissionen gegenüber 1990 um mindestens 8 % zu senken. Zur Erreichung dieses Ziels wurde von der Bundesregierung anvisiert, dass bis 2020 bundesweit 5 % der Wälder Deutschlands aus der Bewirtschaftung herausgenommen werden sollen, um die CO₂-Speicherfähigkeit deutscher Wälder stärker zu nutzen.

Um die ehrgeizigen Ziele zur CO₂-Langzeit-Speicherung zu erreichen, sollten daher die wenigen noch vorhandenen alten und naturnahen Wälder von Abholzung verschont bleiben, selbst wenn die von der Forstwirtschaft angedachte Folgenutzung unter nachhaltigen Bewirtschaftungsprinzipien durchgeführt werden soll. Alte Wälder sind im stark menschlich überprägten Mitteleuropa inzwischen so selten geworden, dass sie auch aus naturschutzfachlicher Sicht (Artenreichtum) und weiteren Walddienstleistungsfunktionen (vgl. Artikel S. 82) höchsten Schutzes bedürfen. Dies sollte im Besonderen für solche Waldgebiete gelten, die sich ohnehin schon im öffentlichen Besitz der Länder oder der Kommunen befinden. Zum Schutz dieser Lebensgemeinschaften reicht eine Ausweisung als Schutzgebiet alleine keinesfalls, hier ist der gänzliche Verzicht auf den Holzeinschlag zu fordern.

Da der Naturschutz rechtlich gesehen nicht Angelegenheit des Bundes, sondern der einzelnen Länder ist, liegt die Verantwortung einer Unterschutzstellung von Naturgütern ganz bei diesen. Es bleibt also zu hoffen, dass sich auch Bayern

der Verantwortung bei der Unterschutzstellung wertvoller, alter Buchenwälder nicht entzieht. Was liegt näher, als solche Gebiete hierfür auszuwählen, denen jetzt schon ein hoher Naturschutzwert innewohnt und die sich zudem im Staatseigentum befinden, wie große Teile des nördlichen Steigerwalds. Entscheidend wird dabei sein, diese Wälder im Rahmen einer Schutzverordnung komplett aus ihrer Nutzung herauszunehmen und sie damit dauerhaft zu erhalten.

Schließlich können wir Europäer nicht glaubwürdig allenthalben den Erhalt der tropischen und borealen Urwälder von anderen Staaten einfordern (bis zum Boykott von Tropenholz), wenn bei uns zu Hause ganz andere Maßstäbe an den Schutz wertvoller Naturwälder angelegt werden.

WEBLINKS

- www.hydro.uni-bayreuth.de
- <http://btbtbx2.bio.uni-bayreuth.de>
- www.bund-naturschutz.de/fakten/wald/nationalpark-steigerwald



Totholzreicher
Altbuchen-
bestand im Steigerwald
auf der Messfläche des
BayCEER am Steinkreuz.

Entdecken
Sie unser 

 **Wald**
kultur
 **erbe!**

Bundesweit mehr als
5.000
Veranstaltungen
im Internationalen
**Jahr der
Wälder**

wald2011.de



Bundesministerium für
Ernährung, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz



INTERNATIONALES JAHR
DER WÄLDER • 2011