Zeitschrift: NAGON / Naturforschende Gesellschaft Ob- und Nidwalden
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Ob- und Nidwalden
Band: 3 (2005)

Artikel: Biosphere-Amosphere Exchange Research in Switzerland
Autor: Eugster, Werner
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1006743

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Biosphere-Atmosphere Exchange Research in Switzerland

Symposium
der Kommission für Atmosphären-Chemie und -Physik der scnat

Programm

- *Begrüssung und Einführung in die Thematik Ökologie und Austauschprozesse*
- *Langfristige Forschung zum besseren Verständnis der Atmosphären-Interaktionen und biogeochemischen Kreisläufe schweizerischer Waldökosysteme, Peter Waldner (WSL Birmensdorf)*
- *Auswirkung von Mikroklima und Landnutzung auf die CO_2-Flüsse über einem subalpinen Grasland, Nele Rogiers (PSI Villigen)*
- *Zerlegung der Netto-CO_2-Flüsse zwischen Wald und Atmosphäre mit Hilfe des stabilen Isotops ^{13}C, Nina Buchmann (ETH Zentrum Zürich)*
- *Quantifizierung der mikrobiellen Oxidation von Methan im Boden, Josef Zeyer (ETH Zürich-Schlieren)*
- *Regeneration und Stabilität von artenreichen Wiesen – ein Feldexperiment mit simulierter Trockenheit, Andreas Stampfli (Universität Bern)*
- *CO_2-Austausch und Kohlenstoff-Bilanz von Grasland-Ökosystemen unter intensiver und extensiver Bewirtschaftung, Christof Ammann (Agroscope FAL Reckenholz)*
- *Stoffkreisläufe zwischen Atmo- und Pedosphäre: Vorstellungen der Projekte des Instituts für Umweltgeowissenschaften der Universität Basel, Christine Alewell (Universität Basel)*
- *Notwendige Grundlagenforschung in der atmosphärischen Grenzschicht, besonders für die Flux-Bestimmung, Mathias Rotach (ETH Zürich-Irchel und Meteo Schweiz)*
- *Das Mikroklima und die Regulation der Transpiration von Bäumen, Roman Zweifel (Universität Bern)*
- *CO_2-Flüsse über den Wäldern der Médoc/Landes (F) und in Folgeprojekten, Bruno Neininger (MetAir AG)*
- *Schlusswort*

Werner Eugster

Vorwort

Das Fachsymposium mit dem Titel «Biosphere-Atmosphere Exchange Research in Switzerland» hatte zum Ziel, die in der Schweiz tätigen Forscherinnen und Forscher, die sich mit den Austauschprozessen zwischen Biosphäre und Atmosphäre beschäftigen, zusammenzubringen. Die Absicht war es, die Diskussion und den Austausch von Erfahrungen und Ideen über Disziplinengrenzen hinweg zu fördern. Durchgeführt wurde das Symposium von der Kommission für Atmosphären-Chemie und -Physik (ACP) der Akademie der Naturwissenschaften. Drei der insgesamt zehn Vorträge wurden gemeinsam mit der Schweizerischen Gesellschaft für Meteorologie (SGM) gestaltet.

Die Jahrestagung 2004 der scnat stand unter dem Thema «Limits» oder «Grenzen». Einerseits sind es genau diese Disziplinengrenzen, die häufig dazu führen, dass man erst an wissenschaftlichen Kongressen im Ausland erfährt, was die Kollegen nebenan genau machen. Diese Grenzen versuchte dieses Symposium mindestens aufzuweichen. Andererseits befasst sich die Forschung im Bereich der Biosphären-Atmosphären-Austauschprozesse mit einer der wichtigsten Grenzen in natürlichen Systemen, nämlich dem Übergang vom gasförmigen Medium Luft zum festen Medium Pflanze. Sonnenlicht, das rund 150 Millionen Kilometer bis hierher zurückgelegt hat, wird urplötzlich innerhalb von wenigen Mikro- bis Millimetern absorbiert und in lebensspendende Wärme umgesetzt, oder in der Photo-

synthese zu Biomasse und damit zu Nahrung für eine ganze Hierarchie von Lebewesen umgewandelt, die in einem feinverästelten Nahrungs-Netzwerk miteinander in Beziehung stehen.
Dieser Artikel ist eine kurze Synthese der im Rahmen der Vorträge behandelten Themenbereiche dieses Symposiums. Für Details können der Autor oder besser die Hauptreferentinnen und -referenten des Symposiums kontaktiert werden.

Einleitung

Für unsere Nahrungsmittelproduktion ist der Austausch von Kohlendioxid (CO_2) zwischen Pflanzen und der Atmosphäre der grundlegende Prozess: Pflanzen nehmen durch Photosynthese CO_2 aus der Atmosphäre auf, um Biomasse zu bilden, und geben dabei Wasserdampf und Sauerstoff an die Atmosphäre ab. Der Sauerstoff, der dabei in unsere Atemluft abgegeben wird, erlaubt unser Leben überhaupt. Und der Wasserdampf, den die Pflanzen durch Transpiration abgeben, alimentiert den globalen Wasserkreislauf. Die Energie, die nötig ist, um alle diese Prozesse anzutreiben, stammt aus der einfallenden Sonnenstrahlung.
Bei all diesen Vorgängen handelt es sich um Grenzüberschreitungen: Das Sonnenlicht wird zu einem grossen Teil innerhalb weniger Mikrometer vom Laub oder den Nadeln der Bäume, den Blättern krautiger Pflanzen, auf Ästen, Stämmen und dem Erdboden absorbiert und in drei niederwertige thermische Energieformen umgesetzt: die fühlbare Wärme, welche die Lufttemperatur anhebt, die latente Wärme, die verwendet wird um flüssiges Wasser zu verdunsten, und die gespeicherte Wärme im Boden. In grünen Blättern absorbiertes Licht liefert die Energie, um Kohlendioxid in seine Bestandteile C (Kohlenstoff) und O_2 (Sauerstoff) aufzuspalten, so dass der Kohlenstoff in komplexen chemischen Reaktionen in Kohlenhydrate und damit in Biomasse umgewandelt und der gasförmige Sauerstoff an die Atmosphäre abgegeben werden kann. Damit das geschehen kann, besitzen höhere Pflanzen sogenannte Spaltöffnungen oder Stomata, die meist auf der Unterseite der Blätter mit einer guten Lupe oder einem Mikroskop zu erkennen sind. Sie sind nachts geschlossen und tagsüber geöffnet. Dadurch wird CO_2 ins Innere der Blätter eingelassen und gleichzeitig Sauerstoff und Wasserdampf in der umgekehrten Richtung an die Luft abgegeben.
Obschon jede Pflanze den Öffnungsgrad der Stomata den Umgebungsbedingungen anpassen kann, hat sie keine Möglichkeit zu kontrollieren, welche anderen Gase ausser dem CO_2 auch noch in die Blätter gelangen und dort entweder als Dünger oder als Schadstoff auf die Pflanze einwirken können. Dies ist mit ein Grund, weshalb die Vegetation eine ganz wichtige Schnittstelle zwischen Atmosphäre und Erdboden darstellt. Sie hilft nämlich mit, ungewünschte Gase und auch Schwebestaub (die so genannten Aerosolpartikel) aus der Atmosphäre zu entfernen und somit unsere Atemluft zu reinigen.
Nicht nur im Rahmen des Klimawandels werden alle diese Prozesse heute intensiv erforscht. Auch aus lufthygienischer Sicht ist das Verständnis der Rolle der Vegetation sehr wichtig. Die Wahl der Referentinnen und Referenten für dieses Sympo-

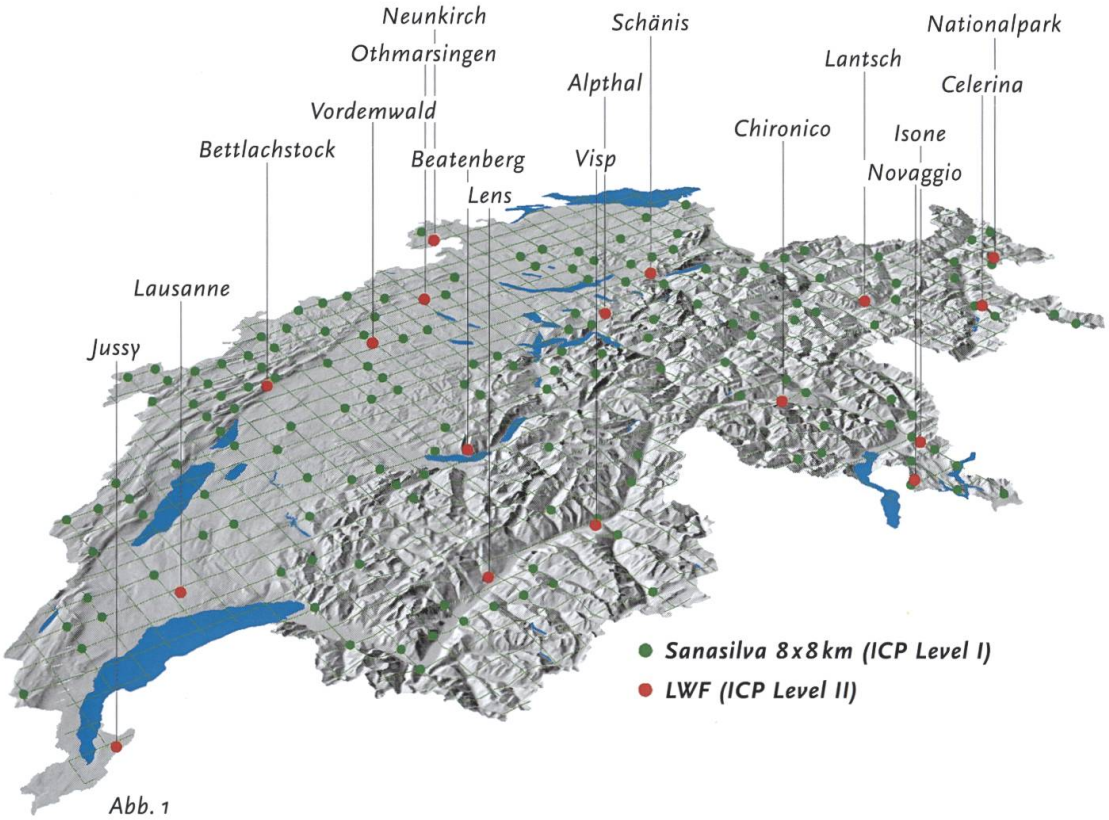


Abb. 1

sium zielte deshalb darauf ab, möglichst die gesamte Breite dieser in der Schweiz sehr wichtigen und international sehr gut eingebetteten Forschungsrichtungen zusammenzubringen. Im Folgenden wird aus den einzelnen Referaten das Wesentliche zusammengetragen und damit einer weiteren interessierten Leserschaft zugänglich gemacht. Soweit möglich wurde versucht, auf Fachjargon und technische Details zu verzichten. Für weitergehende Auskünfte stehen der Autor und die Vortragenden selbstverständlich gerne zur Verfügung. Zu den meisten Aspekten gibt es zur Vertiefung auch umfangreiche wissenschaftliche Publikationen, die auf Anfrage erhältlich sind.

Langfristige Waldökosystemforschung

Ein schweizweites Netzwerk

Die Vortragsserie wurde von Peter Waldner eröffnet, der sich an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) intensiv mit dem Projekt der Langfristigen Waldforschung (LWF) beschäftigt.

Das Ziel der Langfristigen Waldforschung ist das frühzeitige Erkennen ökologischer Risiken für Wälder und Waldgesellschaften. Dabei werden die drei Bereiche Luftschadstoffe, Temperatur und Kohlendioxidaustausch speziell hervorgehoben. Die LWF-Untersuchungen möchten unser Verständnis der Prozesse vertiefen. Anhand des Ist-Zustands, der beobachtbaren zeitlichen Entwicklung über viele Jahre, und in verschiedenen Fällen auch mittels experimenteller Manipulationen in ausgewählten Waldökosystemen wird erforscht, wie Wälder auf Umweltveränderungen reagieren. Diese Umweltveränderungen können zum Beispiel durch den Klimawandel verursacht werden, durch direkte und indirekte menschliche Einflüsse wie Emissionen von Schadstoffen in die Luft, oder auch durch Veränderungen in der Bewirtschaftungspra-

Abb. 1
Netzwerk der Langfristigen Waldökosystemforschung (LWF). Die wesentlichen Waldtypen in unterschiedlichen Höhen- und Expositionslagen der gesamten Schweiz werden an diesen 17 Standorten untersucht. Zusätzlich sind die Standorte der Sanasilva-Erhebungen zur Erfassung der Kronenverlichtungen eingetragen.

Abb. 2
Atmosphärische Stickstoffdeposition auf Waldflächen in Europa. Die schweizerischen LWF-Standorte sind in diesem internationalen Netzwerk integriert.

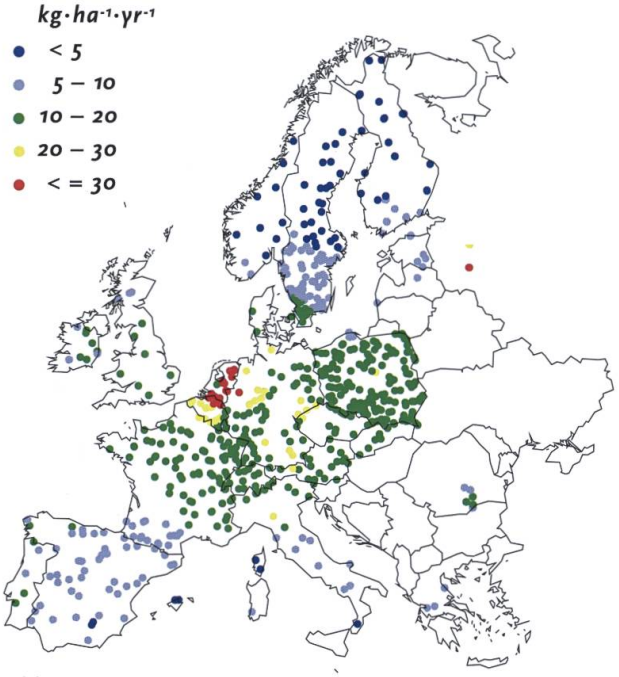


Abb. 2

xis von Wäldern. Als Forschungsplattform ermöglicht das LWF-Projekt die Langzeitbeobachtung (das «Monitoring») von Waldökosystemen und stellt die relevanten Daten zur Verfügung, die für die Modellierung mit Computermodellen nötig sind.

Das LWF-Netzwerk umfasst 17 Standorte (Abb. 1) an denen kontinuierliche Beobachtungen durchgeführt werden. Aus der Zeit der Waldschadensforschung weitergeführt wird auch das Sanasilva-Netzwerk, in dem an ausgewählten Orten in einem 8x8 km²-Raster alle ein bis zwei Jahre der Gesundheitszustand der Bäume anhand deren Kronenverlichtung ermittelt wird. Aus wissenschaftlicher Sicht wird heute allerdings angezweifelt, ob die Kronenverlichtung tatsächlich ein gutes Mass für die Gesundheit der Bäume ist. Umso wichtiger sind deshalb die im Folgenden ausgeführten LFW-Langzeitbeobachtungen.

Das LWF-Netzwerk ist in verschiedene europäische und internationale Beobachtungsnetzwerke integriert. Seit 1979 auch von der Schweiz die Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (LRTAP: Grenzüberschreitender Ferntransport von Luftschadstoffen) unterzeichnet wurde, entstanden verschiedene Netzwerk für derartige Langfristbeobachtungen. Die LWF-Standorte sind Teil des ICP-Forests-Netzwerk von rund 700 Waldbeobachtungsflächen in 39 Mitgliedstaaten der UNO-Waldschutzkommission (Abb. 2; siehe auch http://www.icp-forests.org). Ebenso sind sie Teil des ICP-IM (International Co-operative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects).

Kritische Einträge

Wichtige Langfristuntersuchungen beschäftigen sich mit den kritischen Einträgen von Schad- und Nährstoffen aus der Luft in die Wälder (Abb. 3). Wichtige Komponenten sind die Stickstoffverbindungen. Diese stammen in oxidierter Form als NO_x (zum Beispiel Stickstoffdioxid NO_2) vornehmlich aus Verbrennungsprozessen, also vom Verkehr, aus Industriegebieten sowie speziell im Winter auch aus den Heizungen unserer Wohnungen und Häuser, oder aber in reduzierter chemischer Form als Ammoniak (NH_3) hauptsächlich aus der Landwirtschaft. Stickstoff ist ein Düngemittel und deshalb nicht zwingend schädlich für die Pflanzen, darum wird er als Nährstoff und nicht unbedingt als Schadstoff bezeichnet. Für den Menschen hingegen ist allerdings das NO_2 schädlich und trägt nichts zu unserer Ernährung bei, deshalb die Bezeichnung als Schadstoff. Aber auch bei Pflanzen kann übermässiger Stickstoffeintrag eine schädliche Wirkung haben: Werden die Bäume nämlich einseitig mit viel zuviel Stickstoff gedüngt, fehlen für die gesunde Entwicklung plötzlich andere Spurenelemente wie Kalzium, Magnesium und Kalium, was zu einem zu

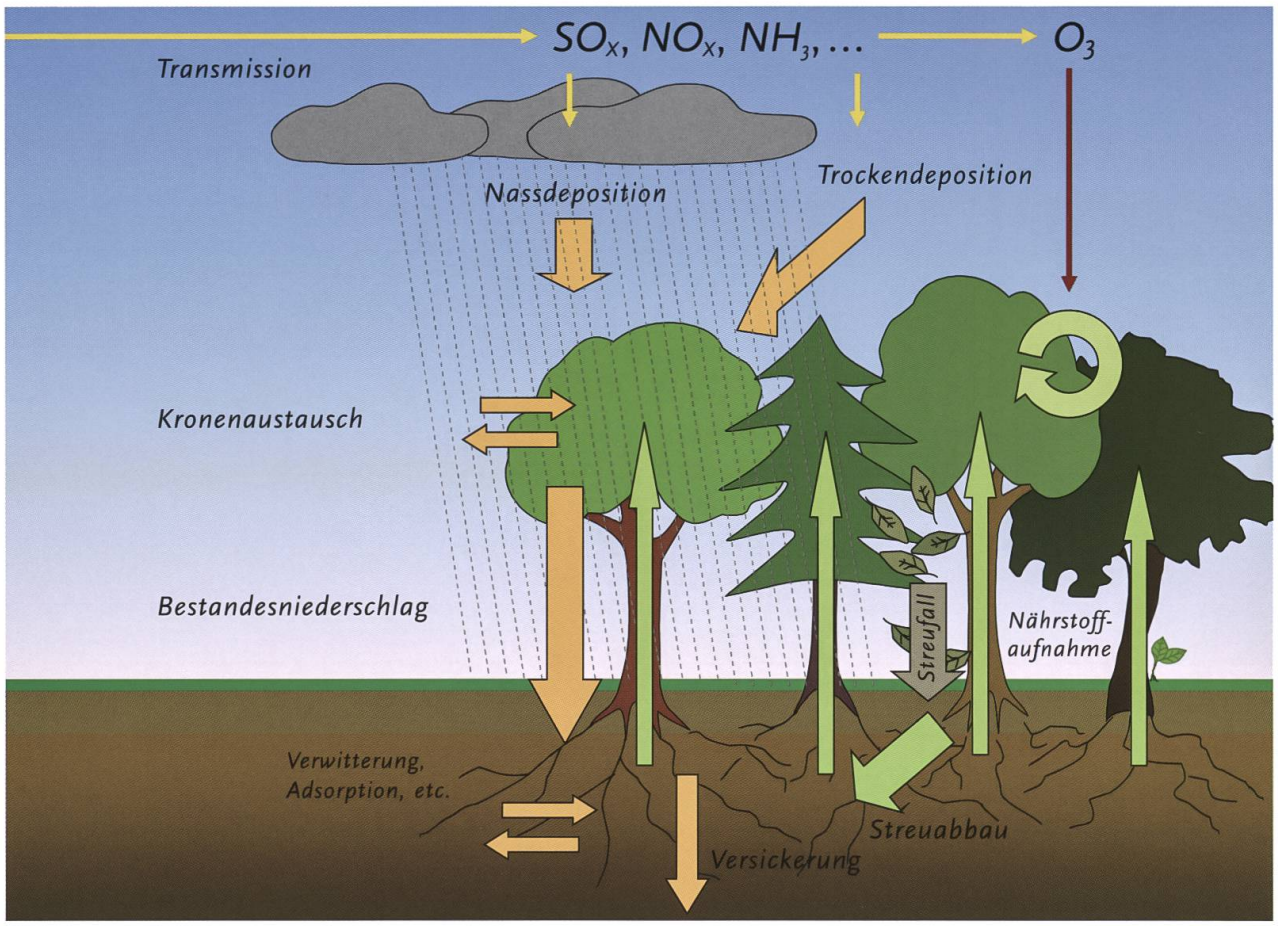


Abb. 3

schnellen Wachstum und damit zu einer Schwächung des Baumes führen kann. In artenreichen Wiesen werden zudem die auf Nährstoffarmut bestens angepassten seltenen Pflanzen langsam durch stickstoffliebende Arten ersetzt, die schneller wachsen und diese seltenen Spezialisten allmählich verdrängen. Diese Prozesse laufen nicht plötzlich ab, sondern sind schleichende Veränderungen, die eine langfristige Beobachtung nötig machen, um sie verstehen und quantitativ erfassen zu können, um daraus Handlungsstrategien für die Umweltpolitik abzuleiten.

Critical Loads und Critical Levels

International hat man sich auf das Konzept der Critical Loads, das sind die kritischen Einträge, und die Critical Levels, das sind die kritischen Konzentrationen in der Luft, geeinigt, um die Bedenklichkeit von aktuellen Einträgen und der Konzentrationen dieser Komponenten in der Umwelt zu bestimmen. Man geht dabei davon auf, dass je nach Vegetationstyp, Bodenart und geologischem Untergrund eine bestimmte Toleranz der Ökosysteme gegenüber solchen Belastungen besteht, die nach wissenschaftlichen Kriterien entweder aus experimentellen Versuchen oder Beobachtungen in der Natur abgeleitet wurden. Für den Stickstoffeintrag, den Eintrag versauernder Komponenten (früher wurde nur vom sauren Regen gesprochen) und für die Konzentration von Ozon in der Luft wurden solche kritische Werte festgelegt.

Aktuelle Stickstoffeinträge

Für die Waldökosysteme des LWF-Netzwerks liegen diese kritischen Werte im Bereich von 8–20 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr. Sowohl Messungen

Abb. 3
Prozesse, die für den Eintrag von Schad- und Nährstoffen in ein Waldökosystem verantwortlich sind.

Abb. 4
Aktuelle Gesamt-Deposition von Stickstoff aus der Atmosphäre auf die LWF-Flächen (orange Säulen) im Vergleich mit den modellierten Werten (grüne Säulen) von B. Rihm, Meteotest, Bern.

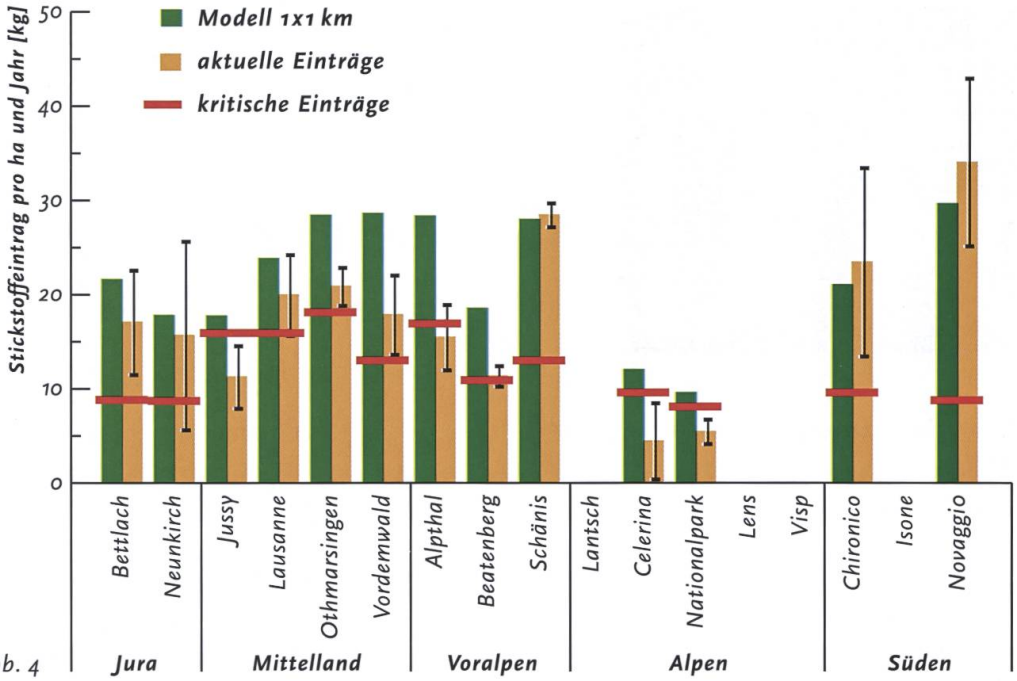


Abb. 4

wie Modellrechnungen für die 17 LWF-Standorte zeigen, dass diese standortspezifischen kritischen Werte an fast allen Standorten entweder erreicht oder deutlich überschritten werden (Abb. 4). Ausnahmen bilden nur die Standorte in den Alpen (es wurden nicht überall Messungen durchgeführt) und Jussy in der Westschweiz.

Die gute Übereinstimmung der Modellrechnungen mit den Messungen an diesen Standorten (Abb. 4) erlaubt somit auch eine Extrapolation und damit die Abschätzung eines Gesamteintrages für die Schweiz. Die neusten Rechnungen zeigen somit, dass auf der Fläche der Schweiz pro Jahr rund 79'000 Tonnen Stickstoff pro Jahr aus der Luft in die Ökosysteme eingetragen werden – wohlgemerkt Stickstoff, der aus menschlichen Tätigkeiten stammt und im Gegensatz zum riesigen natürlichen Vorrat an inertem N_2-Stickstoff in der Luft chemisch reaktiv und damit für Pflanzen überhaupt als Nährstoff verfügbar ist. Könnte man diese Menge Stickstoff als Kunstdünger in Eisenbahnwagen abfüllen, entspräche dies einem vollbeladenen Güterzug, bei dem die Lokomotive in Zürich, und der letzte Wagen in Olten zu finden wäre.

Die versauernden Einträge

Im Gegensatz zu den Stickstoffkomponenten ist es seit den 1980er-Jahren etwas ruhiger geworden um den Eintrag versauernder Komponenten. Darunter werden die verschieden Säuren im Regen, aber auch die gasförmigen Substanzen wie Salzsäure in der Abluft von Kehrichtverbrennungsanlagen zusammengefasst (heute werden diese Gase allerdings zum allergrössten Teil durch Rauchgaswäscher abgefangen). Heute liegen diese Einträge generell unter den kritischen Werten, mit Ausnahme der kalkarmen Tessiner Standorte. Genauerer Beobachtung bedarf aber die Tatsache, dass trotz dieser Verminderung der Einträge versauernder Komponenten noch an vielen Orten der relative Gehalt an Kationen (Kalzium, Magnesium und Kalium) im Bodenwasser, im Verhältnis zum im Boden auch natürlich vorkommenden Element Aluminium, über dem kritischen Wert liegt. Dies dürfte für die betroffenen Böden längerfristig nicht unproblematisch sein und könnte zu einer Abnahme der Fruchtbarkeit führen.

Abb. 5

Abb. 5
Mit Küvetten wird ein Zweig in eine Kammer eingeschlossen, so dass die Reaktion der Pflanze auf experimentell veränderte Umweltbedingungen (zum Beispiel Licht, Temperatur, Feuchtigkeit, CO_2 – oder Ozon-Gehalt der Luft) direkt erforscht werden kann. Eigenentwicklung der Eidg. Forschungsanstalt WSL und der Firma DMP, Fehraltdorf.

Wie sieht die Ozonbelastung aus?

Bei allen Waldschadensforschungsarbeiten der letzten mehr als 20 Jahre ist es nie gelungen, den direkten Zusammenhang zwischen Ozonkonzentrationen und Schadensbildern an Pflanzen mit wissenschaftlicher Präzision nachzuweisen. Man hat aber festgestellt, dass die Kombination von Konzentration und der Dauer der Einwirkung eine entscheidende Bedeutung hat. Wie beim Stickstoff scheint es eine gewisse Belastbarkeit von Ökosystemen zu geben, die mit dem kritischen AOT40-Wert am Besten angenähert werden kann.

Die Abkürzung AOT40 steht für den Ozondosiswert über einem als kritisch festgelegten Schwellenwert von 40 ppb. Eine Ozonkonzentration von 40 ppb entspricht etwa 80 µg Ozon pro Kubikmeter, was wiederum etwa zwei Dritteln des in der Schweiz gültigen Halbstunden-Grenzwerts entspricht. Während der Vegetationsdauer von April bis September wird nun die Überschreitung dieses Schwellenwertes mit der jeweiligen Stundenzahl der Überschreitungsdauer multipliziert und aufsummiert. Dies entspricht in etwa dem Vorgehen, das man von Atomkraftwerken kennt, wo jeder Arbeiter ein Dosismeter auf sich trägt, das die Summe der Strahlenbelastung erfasst. Mit dem Unterschied, dass hier der Schwellenwert bei Null angesetzt wird.

Durch spezielle Begasung mit Ozon wird an jungen Bäumen an einem Versuchsstandort der WSL im Tessin daran gearbeitet, diesen Schwellenwert genauer zu bestimmen. Ausserdem wird mit Küvettenmessungen an einzelnen Zweigen (Abb. 5) versucht, experimentell noch bessere Ansätze zu entwickeln, wie man den Zusammenhang zwischen Schadstoffkonzentrationen in der Luft und deren Wirkung auf die Pflanze beschreiben kann. Basierend auf dem heute gültigen AOT40-Konzept gilt Ozon nach wie vor als Problemschadstoff. An 10 LWF-Standorten von 14 mit entsprechenden Daten liegen die aktuellen Werte über der kritischen Dosis (Abb. 7).

Grasland-Ökosysteme

Über die CO_2-Bilanz von Grasland-Ökosystemen, also Wiesen, Weiden und Mähweiden, sprachen Nele Rogiers vom Paul Scherrer Institut in Villigen und Christof Ammann von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL) in Zürich-Reckenholz. Die Bedeu-

Abb. 6

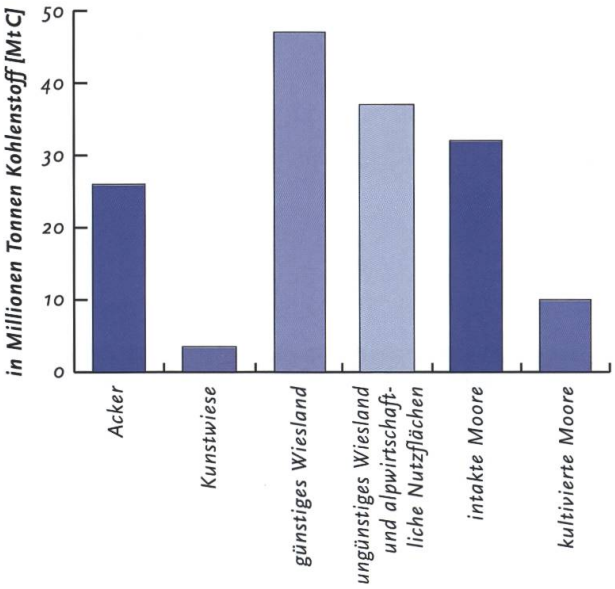


Abb. 6
Kohlenstoffvorräte in der Landwirtschaft.

Abb. 7
Ozonbelastung im Jahr 2002 anhand des AOT40 (Accumulated Over Threshold 40 ppb for the daylight hours), der kritischen Belastung (Critical Level) und der Anzahl Arten mit sichtbaren Symptomen (visual-injury) auf den LWF-Flächen.

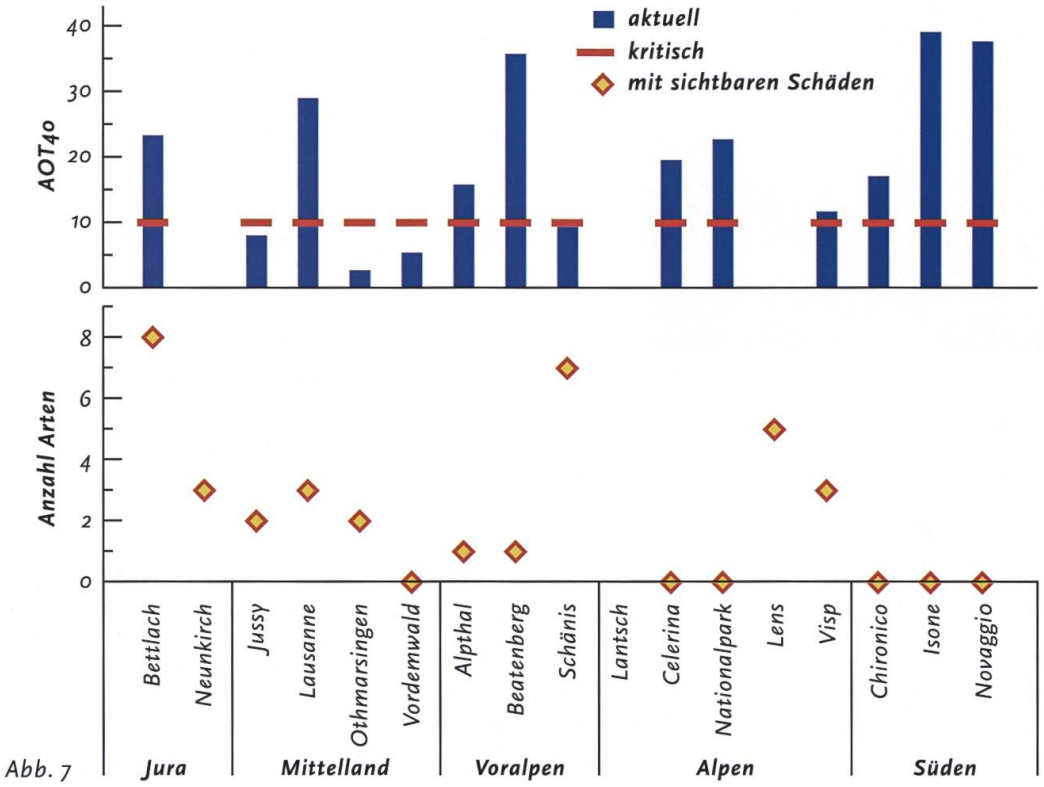


Abb. 7

tung der Kohlenstoffvorräte in der Landwirtschaft wurde durch Abb. 6 verdeutlicht. Es ist zwar unbestritten, dass Wälder wegen der enormen Biomasse der Bäume eigentlich den grössten Gesamt-Kohlenstoffspeicher in der Schweiz ausmachen. Im Rahmen des Kyoto-Protokolls haben sich alle wichtigen Nationen der Welt ausser den Vereinigten Staaten von Amerika verpflichtet, ihren CO_2-Ausstoss zu verringern oder mit geeigneten Massnahmen zu veranlassen, dass überschüssiges CO_2 aus der Atmosphäre in sogenannten natürlichen Senken gebunden wird. Man spricht dabei von der «Kohlenstoff-Sequestrierung». Das heisst, nur jener Kohlenstoff darf in der nationalen Bilanz angerechnet werden, der in die organische Bodensubstanz eingebaut wird. Im Boden gibt es zwei wesentliche Kohlenstoff-Reservoirs: erstens einen aktiven Vorrat, der relativ rasch wieder umgewälzt wird; das sind zum Beispiel die Laubstreu im Wald oder die Stoppeln auf dem Feld, die nach dem Ernten übrigbleiben und durch die mikrobiellen Destruenten abgebaut werden; und zweitens einen inaktiven Vorrat, in dem Kohlenstoff langfristig gespeichert bleibt, so wie das im Fall von Torfschichten in Mooren allgemein bekannt ist. Dieses zweite Reservoir ist für die «Kohlenstoff-Sequestrierung» im Rahmen des Kyoto-Protokolls von speziellem Interesse, da nur die Zunahme dieses langfristigen Speichers als tatsächliche Entfernung von CO_2 aus der Atmosphäre gelten kann.

Bei diesen langfristigen Bodenspeichern sind nun aber nicht die Waldökosysteme die Tabellenersten, sondern jahrhundertealte, gut bewirtschaftete und ausreichend gedüngte Weiden, gefolgt von Wiesland. Äcker, die gepflügt werden, rangieren relativ weit hinten, da beim Pflügen jeweils eine beträchtliche Menge des Kohlenstoffs wieder freigesetzt wird. Christof Ammann ging in seinem Vortrag auf die Bedeutung ein, die allenfalls eine Umwandlung von Ackerland in Grasland für die «Kohlenstoff-Sequestrierung» in der Schweiz haben könnte.

Abb. 8

Abb. 8
Rigi-Seebodenalp mit dem Messturm, der seit Mai 2002 bis voraussichtlich Sommer 2005 den CO_2-Austausch kontinuierlich erfasst.

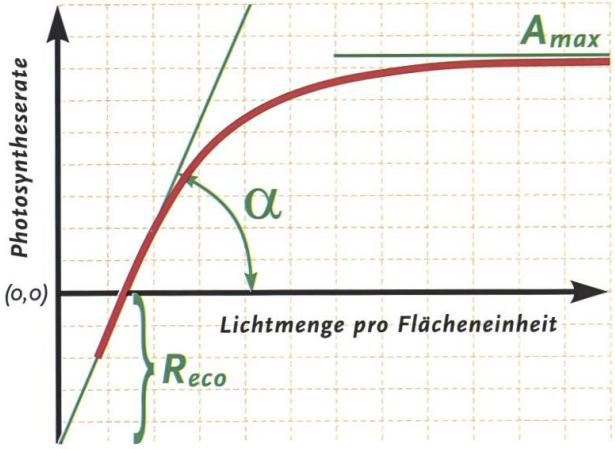
Abb. 9
Abhängigkeit des Netto-CO_2-Austauschs von Wiese und Weide auf der Seebodenalp vom Lichtangebot. Links: schematische Darstellung der theoretisch erwarteten Kurve. A_{max} ist die maximal mögliche Assimilation der Pflanzen, R_{eco} die Ökosystematmung, und die Steilheit α die Lichtnutzungseffizienz der Pflanzen. Rechts: tatsächlich gemessene Verhältnisse auf der Seebodenalp für Wiese (gelbe Kurve) und Weide (blaue Kurve).

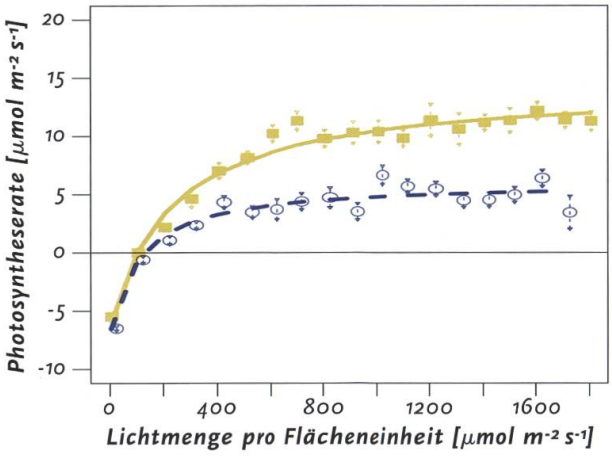
Abb. 10
Die Kohlenstoffbilanz des Jahres 2003 gemessen auf der Rigi-Seebodenalp im Vergleich mit extensiver und intensiver Kunstwiese im Unterland. Die Seebodenalp liegt auf 1000 m ü.M. auf ehemaligem Moorland. Dieser ehemalige Moorboden baut sich langsam ab und führt dazu, dass mehr CO_2 an die Atmosphäre abgegeben wird als gleichzeitig aufgenommen werden kann. Dies im Gegensatz zu intensiv bewirtschafteter Kunstwiese im Unterland.

Subalpine Landwirtschaft: Rigi-Seebodenalp

Nele Rogiers führte auf der Seebodenalp (Abb. 8) an der Nordflanke der Rigi ob Küssnacht ganzjährige Messungen des Netto-CO_2-Austauschs durch. Die für diese Messungen verwendete Methode heisst «Eddy-Kovarianz-Methode». Das Wort Eddy bezieht sich nicht etwa auf dessen Erfinder, wie häufig fälschlicherweise vermutet wird, sondern stammt aus dem Englischen und bezeichnet die Turbulenzwirbel, die im Wasser und in der Luft für die Durchmischung sorgen. Einen solchen Wirbel oder «Eddy» kann man am Besten selber in der Natur entdecken, wenn man im Herbst das Laub auf der Strasse beobachtet und mitverfolgt, wie plötzliche Windböen dieses Laub in kreisförmigen Bewegungen umherwirbelt. Es ist zwar nicht sichtbar, aber man kann sich gut vorstellen, dass wie das Laub auch Kohlendioxid und alle anderen Substanzen in dieser Luft in gleicher Weise mitbewegt werden. Da Gasmoleküle und auch Schwebestaubpartikel und Nebeltröpfchen eine ausreichend kleine Masse haben, folgen diese sogar noch viel stärker der Wirbelbewegung der Luft. Deshalb lässt sich der Transport dieser Substanzen in der Atmosphäre aus der Kovarianz der Luftbewegung und den Konzentrationsschwankungen dieser Substanzen berechnen. Vereinfacht ausgedrückt handelt es sich um eine Milchbüchleinrechnung: Mehrmals pro Sekunde wird an einem Standort die Vertikalwind-

Abb. 9





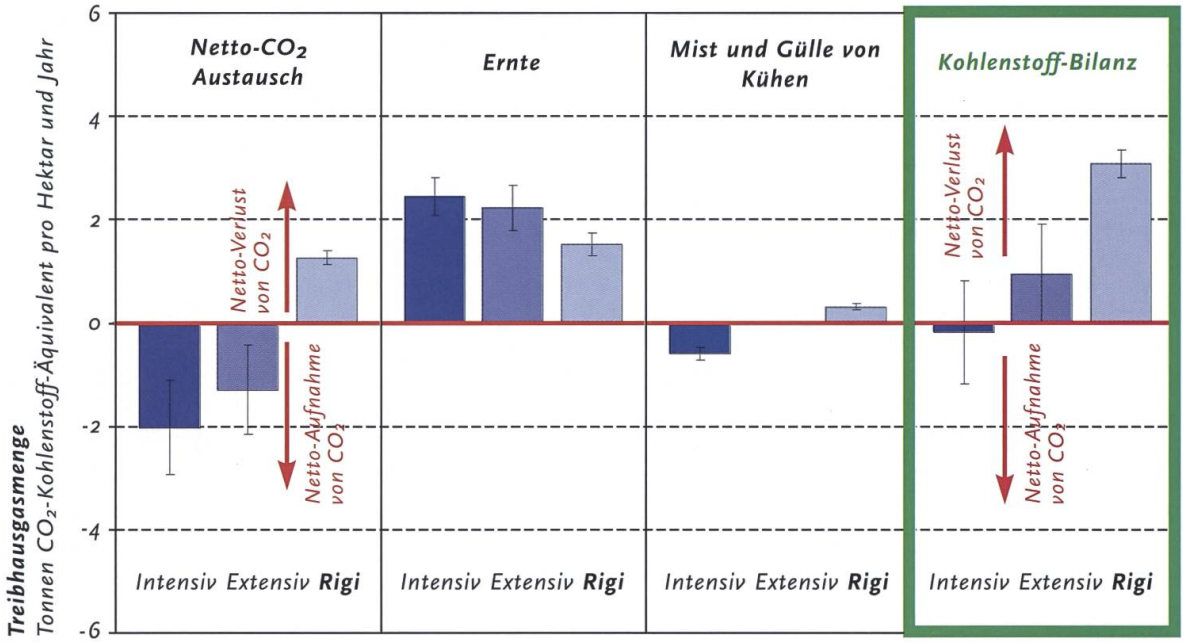


Abb. 10

geschwindigkeit gemessen, mit der gleichzeitig gemessenen Konzentration multipliziert und über ein Zeitintervall von typischerweise 30 Minuten summiert und der Mittelwert bestimmt. Schliesslich muss noch das Produkt der Mittelwerte beider Grössen abgezogen werden und das Resultat entspricht der Kovarianz und somit dem Fluss der beobachteten Grösse zwischen Atmosphäre und Vegetation oder Boden.

Im Fall von CO_2 erfasst man mit dieser Messung zu jedem Zeitpunkt den Netto-Unterschied zwischen photosynthetischer Assimilation (also der Biomassenproduktion der Vegetation) und der Respiration oder Atmungstätigkeit des gesamten Ökosystems. Wenn man den CO_2-Austausch kontinuierlich misst, kann man aus den Daten mittels eines einfachen Näherungsmodells drei wichtige Grössen bestimmen, die einen Vegetationstyp charakterisieren (siehe Abb. 9): 1. die maximal mögliche Assimilationsleistung (A_{max}) der Pflanzen bei starker, aber noch nicht schädlicher Sonneneinstrahlung; 2. die Ökosystematmung (R_{eco}) welche die Summe der Atmung der Pflanzen selber, deren Wurzeln, und der Mikroorganismen im Boden umfasst; sowie 3. die Lichtnutzungseffizienz der Pflanzen.

Die auf der Seebodenalp gemessenen Differenzen zwischen Wiese und Weide zeigen auf, wie mit der Bewirtschaftungsweise der CO_2-Austausch zwischen Ökosystem und Atmosphäre ganz entscheidend beeinflusst werden kann. Die bereits vorliegenden Messungen zeigen, dass die Seebodenalp im Jahr 2002 schwach und im Jahr 2003 mit dem rekordwarmen Sommer deutlich an Kohlenstoff verloren hat (Abb. 10). Nele Rogiers vermutet, dass der hohe Kohlenstoffgehalt des Bodens, aus dem noch im letzten Weltkrieg Torf gestochen wurde, dafür verantwortlich ist. Die weiteren Untersuchungen sollen nun zeigen, ob diese Verluste einmalig auf das eher extreme Witterungsgeschehen zurückzuführen sind, oder ob mit der aktuellen Bewirtschaftungsweise tatsächlich die Kohlenstoffvorräte langsam aber stetig abgebaut werden. Falls dem so wäre, könnte mit finanziellen Anreizen an die Landwirte versucht werden, die Bewirtschaftungsweise so zu beeinflussen, dass weniger CO_2 an die Atmosphäre abgegeben wird, was gleichzeitig im Rahmen des Kyoto-Protokolls als aktive «Kohlenstoffsenke» anrechenbar wäre.

Abb. 11 und Abb. 12 Martin Schroth und Karina Urmann bei Vorversuchen für einen Gas Push-Pull Test auf der Göscheneralp mit Blick auf den Dammagletscher.

Talwirtschaft: Intensive und extensive Wiese in Oensingen

Um solche Möglichkeiten der «Kohlenstoff-Sequestrierung» in Grasland-Ökosystemen der Schweiz zu erforschen, führt das FAL intensive Feldarbeiten in Oensingen (Kanton Solothurn) durch. Christof Ammann berichtete über den aktuellen Stand der Forschungsarbeiten nach gut zwei Jahren. In Oensingen wurde ein Acker in Wiesland umgewandelt. In der Landwirtschaft spricht man von Kunstwiese, die nach einer entsprechenden Zeitdauer von mindestens etwa fünf Jahren in eine Naturwiese übergeht. Da die Ackernutzung wegen des jährlichen Pflügens nur relativ wenig Kohlenstoff langfristig im Boden speichern kann, wird allgemein erwartet, das eine derartige Landnutzungsänderung eine gewisse Menge Kohlenstoff im Boden festbinden könnte, die im Rahmen des Kyoto-Protokolls als «Kohlenstoff-Senke» anrechenbar wäre. Im Versuch der FAL wurde die eine Hälfte des Ackers in eine extensive, die andere in eine intensive Mähwiese umgewandelt.

Wie auf der Seebodenalp wird auch hier der CO_2-Austausch mit der Eddy-Kovarianz-Methode erfasst. Zusätzlich werden aber die Ernteerträge und der Kohlenstoffeintrag durch Gülle und Mist genaustens erfasst, um eine möglichst exakte Kohlenstoffbilanz zu erstellen. Zusätzlich wird gemessen, wie viel des Treibhausgases N_2O (Lachgas) von den beiden Versuchsfeldern entweicht. Ein Molekül N_2O ist 296 mal wirksamer als ein Molekül CO_2 und ist deshalb ein ganz wesentlicher Faktor bei einer gesamtheitlichen Betrachtung der Treibhausgasbilanz von landwirschaftlichen Ökosystemen.

Erste Resultate für 2002 und 2003 zeigen ein Bild, das wenig Illusionen aufkommen lässt bezüglich der Möglichkeiten, grössere Mengen an Kohlenstoff durch die Aufgabe von Ackerland im Boden festbinden zu können. Zwar wurde 2002 durchaus eine gewisse CO_2-Aufnahme beider Flächen gemessen, aber der extrem warme und auch recht trockene Sommer 2003 hatte zur Folge, dass nach dem ersten Grasschnitt die Vegetation kaum mehr nachwuchs und somit die Jahresbilanz des CO_2 eher ungünstig aussah. Wenn man nun noch die anderen Treibhausgase wie eben das Lachgas berücksichtigt, muss man aber sogar in beiden Jahren eine Verschlechterung der Treibhausgasbilanz feststellen. Auch diese Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen. Mit Computermodellen wird nun versucht, basiert auf den Feldmessungen, den Einfluss verschiedenartiger Bewirtschaftungsarten auch für längere Zeiträume abzuschätzen, als das mit nur wenigen Jahren Messungen im Feld allein möglich wäre.

Wie können regionale Unterschiede erfasst werden?

Untersuchungen, wie sie auf der Seebodenalp oder in Oensingen durchgeführt werden, sind extrem aufwändig und teuer, und können nicht an beliebig vielen Orten durchgeführt werden. Deshalb stellt sich die Frage, wie man zu flächendeckenden Informationen gelangen könnte, die solche Bodenmessungen ergänzen und eine genaue räumliche Information für nationale Treibhausgasinventare liefern könnten. Hier stellte Bruno Neininger die Messmethodik des Motor-

Abb. 11

Abb. 12

seglers Dimona HK36 TTC ECO HB-2335 vor, der speziell für solche Messungen ausgerüstet wurde, wobei CO_2 nur eine von einer Vielzahl lufthygienisch relevanter chemischer Komponenten in der Luft ist. Leichtflüchtige organische Kohlenstoffe wie Alkane, Alkene, Aromaten, sowie die Standard-Luftschadstoffe NO_2 und Ozon können entweder in einem horizontalen Flugmuster über der Landschaft gemessen werden oder aber im Vertikalprofil bis über die Atmosphärische Grenzschicht hinaus, in welcher diese Schadstoffe quasi gefangen sind. Damit lässt sich mit einem einfachen «Schuhschachtelmodell» der Austausch zwischen Atmosphäre und Biosphäre in Zahlen ermitteln. Man muss sich hierzu vorstellen, man könne die Atmosphäre über einer Landoberfläche in eine Schuhschachtel packen und darin mit dem Flugzeug an vielen Orten die Konzentrationen der gewünschten Substanzen messen. Einige Stunden später führt man wieder ein derartiges Flugmuster mit Messungen durch und kann aus der zeitlichen Veränderung der Gesamtkonzentration in gedachter Schuhschachtel den Austausch an der Bodenoberfläche ermitteln. Neininger stellte etliche erfolgreiche Messkampagnen aus dem Ausland vor, die er auch in der Schweiz als durchführbar einschätzt und die für die nationalen Treibhausgasinventare von grossem Wert wären.

Methan darf nicht vergessen werden!

Methan (CH_4) ist nach dem CO_2 das zweitwichtigste Treibhausgas weltweit. Ein Molekül entfaltet die gleiche Treibhauswirkung wie 23 Moleküle CO_2 und hat in der Atmosphäre eine Lebensdauer von sieben bis zehn Jahren. Methan wird von Wiederkäuern ausgestossen und in staunassen Böden von Mikroorganismen durch die Methanogenese $CO_2 + H_2 \rightarrow CH_4$ oder $CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$ produziert. Etwas weniger bekannt ist, dass Mikroorganismen im Boden aber auch Methan aufnehmen können. Dieser Prozess nennt sich Methan-Oxidation, $CH_4 + O_2 \rightarrow CO_2$. Um diese Oxidation messen zu können, entwickelte Josef Zeyer vom Institut für Terrestrische Ökologie mit seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern (Abb. 12) eine Methode, die es auch erlaubt, den natürlichen Abbau von organischen Schadstoffen im Boden zu bestimmen.

Als konkretes Beispiel wird in Studen (Kanton Bern) untersucht, wie Petrol-Kohlenwasserstoffe, die durch ein Leck während längerer Zeit aus einem Heizöltank einer Wohnsiedlung ausgeflossen sind, durch solche Mikroorganismen im Boden abgebaut werden. Die Methode nennt sich «Gas Push-Pull Test»: man pumpt (englisch «push») eine bekannte Menge eines Gasgemisches, das sowohl Methan wie auch Sauerstoff und bestimmte Edelgase (Argon und Neon) enthält, in den kontaminierten Boden. Dort lässt man das Gasgemisch eine Zeitlang verweilen, und zieht dann aus der Bodenluft eine Probe (englisch «pull»), die man analysiert. Edelgase haben die gewünschte Eigenschaft, dass Mikroorganismen nichts damit anfangen können. Sie sind nämlich chemisch inert. Das heisst, anhand des Konzentrationsverhältnisses zwischen dieser Bodenluftprobe und der ursprünglich in den Boden gepumpten

Abb. 13

Abb. 14

Abb. 13 – 15
Der Untersuchungsstandort von Andreas Stampfli bei Negrentino im Blenio-Tal mit geschlossener Regenstore, die sich automatisch über der Vegetation ausrollt, sobald es zu regnen beginnt. Abb. 13 zeigt die Store bei schönem Wetter und Abb. 14 bei Regen.

Gasgemischs kann der Verdünnungsfaktor der Luft während der Verweildauer im Boden ermittelt werden. Hat es keine Organismen im Boden, die Methan oxidieren (oder produzieren), dann muss dieser Verdünnungsfaktor bei Methan der gleiche sein wie beim Edelgas. Wird Methan oxidiert, ist der Faktor kleiner, und falls Methan produziert wurde, entsprechend grösser. Damit kann man die Tätigkeit der Mikroorganismen im Boden quantifizieren. Diese Methode ist nicht nur für Fälle wie denjenigen in Studen geeignet, sondern kann auch in der Natur ohne negative Effekte für die Umwelt durchgeführt werden. Allerdings muss vorerst in einem Vorversuch am Standort abgeklärt werden, in welcher Konzentration die zu untersuchenden Gase im Boden vorkommen (Abb. 12).

Weitere Problemstoffe in der Umwelt

Christine Alewell vom Institut für Umweltgeowissenschaften der Universität Basel und ihre Mitarbeiter beabsichtigen, in kommenden Forschungsprojekten auch die Oxidation von Lachgas im Boden genauer zu untersuchen. Bisher hat man den Boden immer als Quelle von Lachgas betrachtet, vor allem die landwirtschaftlich genutzten Böden nach einer Düngergabe bei gleichzeitig hoher Bodenfeuchte. Felduntersuchungen haben nun aber gezeigt, dass es auch einen Prozess geben muss, bei dem im Boden Lachgas aus der Luft entfernt wird. Allerdings ist hier noch nicht klar, ob dies ebenfalls der Tätigkeit von Mikroben zuzuschreiben ist, oder ob andere Effekte dafür verantwortlich sind.

Als weiteren Problemstoff in der Umwelt, der an der Universität Basel untersucht wird, erwähnt Alewell das Quecksilber und das Radon, wobei Quecksilber durch den Menschen in geringsten Mengen in die Atmosphäre abgegeben wird und sich in der Natur wieder absetzt, während Radon aus dem Boden entweicht und quasi als natürliche radioaktive Markiersubstanz für Atmosphären-Biosphären-Austauschprozesse herbeigezogen werden kann. Um diese Austauschprozesse ausreichend verstehen zu lernen, wird die Verknüpfung mit dem Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf an verschiedenen Orten genauer untersucht. Quecksilber zum Beispiel ist heute in rund 20mal höherer Konzentration in der Umwelt zu finden als noch in vorindustrieller Zeit. Da Quecksilber kaum natürlich abgebaut werden kann, gilt es als einer dieser Problemstoffe, die sich in der Nahrungskette zunehmend anreichern und letztlich auch unsere Nahrungsmittel beeinträchtigen. Am direktesten ist dies bei den Fischen festzustellen.

Trockenheit beeinflusst Vegetation viel stärker als Nässe

Viele solcher natürlichen Prozesse sind wenig bekannt oder schlecht erforscht, da in der Schweiz nur in beschränktem Ausmass langfristig angelegte Forschungsprojekte gefördert werden. Hier konnte Andreas Stampfli vom Institut für Pflanzenwissenschaften der Universität Bern eine interessante und erfreuliche Ausnahme von dieser Regel vorstellen. Er hat seit 1988, als er als Doktorand damit begonnen hat, die Vegetations-

Abb. 15

entwicklung von Wiesen im Blenio-Tal (Tessin) untersucht und deren Reaktion auf klimatische Extreme wie Trockenheit und Nässe (siehe **Stampfli** & **Zeiter** 2004). Daraus leitete er ab, dass die Graslandvegetation viel sensitiver auf extreme Trockenheit als auf extreme Nässe reagiert. Nun ist er daran, in einem speziell dazu angelegten Feldversuch diese Hypothese experimentell zu überprüfen. Dazu hat er einen Bereich der Untersuchungsfläche mit einer automatischen Regenstore ausgerüstet (Abb. 13), die sich bei Regen schliesst (Abb. 14 und 15).

Dies erlaubt ihm, unter dieser Store einen Versuch anzulegen, in dem die Teilflächen während zwei Jahren nach einem besonderen Muster bewässert werden. Damit ergeben sich vier unterschiedliche «Niederschlagsklimatologien» mit vier Bereichen: 1. nass in beiden Jahren; 2. nass im ersten, trocken im zweiten Jahr; 3. trocken im ersten, nass im zweiten Jahr; und 4. trocken in beiden Jahren. Stampfli hofft, aus diesem Versuch auch ableiten zu können, welche Pflanzenarten unter den jeweiligen Bedingungen sich am besten aus gesäten Samen entwickeln können, und wie die natürliche Reaktion auf dieses künstlich vorgegebene «Niederschlagsregime» ausfällt. Um möglichst natürliche Bedingungen zu simulieren verwendet Stampfli zur Bewässerung nur Regenwasser, das vor Ort gesammelt wurde, und hat auch bereits den Effekt der Regenstore auf den Strahlungshaushalt bestimmt: zwar ist die Regenstore während 6.2% der Tagesstunden ausgefahren, aber da es bei Regen ohnehin nicht sehr sonnig ist, fällt die Verminderung des Strahlungsangebots mit nur 1.3% recht gering aus und dürfte im Rahmen des Versuchs keinen relevanten Fehler verursachen.

Bäume kontrollieren ihr Mikroklima und werden durch dieses selber kontrolliert

Es leuchtet ein, dass solche Versuche nicht ganz so einfach in Wäldern durchgeführt werden können. Roman Zweifel, ebenfalls vom Institut für

Abb. 16

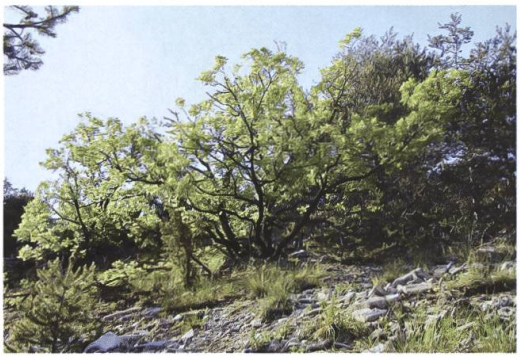


Abb. 17

Pflanzenwissenschaften der Universität Bern, hat deshalb an klimatisch unterschiedlichen Standorten in der Schweiz einzelne Bäume bezüglich ihres Zusammenspiels mit dem Mikroklima untersucht. Etwas einfach formuliert, untersuchte er, wie Bäume auf das Klima reagieren und gleichzeitig mittels Transpiration, also der Abgabe von Wasserdampf durch die Spaltöffnungen der Nadeln oder Blätter, ihr Bestandesklima regulieren können. Seine Untersuchungen führte er in Davos (Kanton Graubünden) und Jeizinen und Salgesch (beide im Kanton Wallis) durch. Dabei untersuchte er die Baumarten Fichte, Föhre, Eiche und Wacholder (Abb. 16 und 17).

Die Baumarten ergänzen sich in verschiedener Hinsicht. Bei anhaltend schöner und trockener Witterung beginnt die Föhre ihre Spaltöffnungen zu schliessen und schränkt somit ihre Photosynthese deutlich ein. Der Wacholder ist hingegen weniger produktiv, reagiert aber kaum auf solche Umwelteinflüsse. Und die Eiche nimmt eine Zwischenposition ein: sie reagiert auch auf Trockenstress, aber nicht so stark wie die Föhre (Abb. 18). Interessant ist der Umstand, dass aber die Eiche auch unter vorteilhaften Bedingungen nur etwa 25–30 % der möglichen Verdunstungsrate aufrecht erhält. Damit ist sie zwar jederzeit auf Trockenperioden vorbereitet, wächst aber entsprechend weniger schnell als dies bei optimaler Ausnützung der möglichen Verdunstungsrate möglich wäre.

Roman Zweifels Untersuchungen in Davos und im Wallis liessen keinen Zweifel daran, dass das Mikroklima der Schlüssel zum Verständnis der physiologischen Reaktion von Bäumen ist: die Regulierung der Spaltöffnungen in Nadeln und Blättern von Bäumen ist eine Reaktion auf mikroklimatische und baumphysiologische Prozesse,

Abb. 18

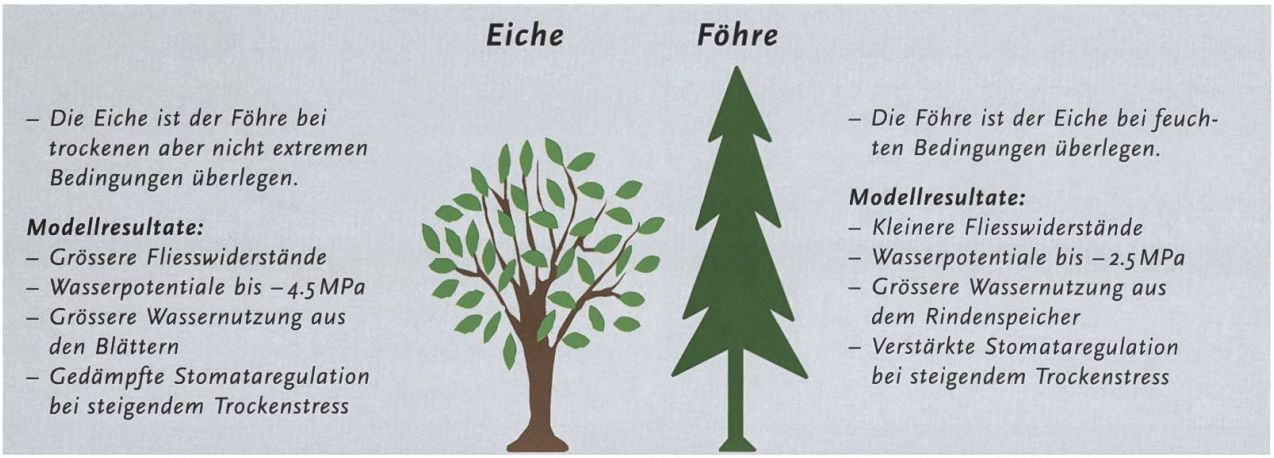


Abb. 16 und 17
Der Untersuchungsstandort bei Salgesch (links) mit an das trockene Mikroklima besonders angepassten Eichen (rechts).

Abb. 18
Vergleich von Eiche und Föhre bezüglich deren Funktion bei unterschiedlichen Umweltbedingungen im Wallis.

während der Stoff- und Energieaustausch zwischen Boden und der Luft durch diese Spaltöffnungen bestimmt werden: Wasser- und Kohlenstoffaustausch, sowie Verdunstungswärme und fühlbare Wärme.

Aktuelle Entwicklungen in der Forschung

Zum Abschluss werden die beiden Vorträge zusammengefasst, die sich mit aktuellen Entwicklungen in der Forschung befassen. Im ersten wurden die Bedeutung und Möglichkeiten von natürlichen stabilen Isotopen aufgezeigt, während der zweite vor allem den Meteorologen die aktuellen Wissenslücken an der Forschungsfront aufzeigte.

«Spione» zur Erforschung der Prozesse: stabile Isotope

Nina Buchmann vom Institut für Pflanzenwissenschaften der ETH Zürich zeigte, wie mit Hilfe des stabilen Isotops ^{13}C die gemessenen Werte des Netto-CO_2-Austauschs, wie sie Nele Rogiers und Christoph Ammann mit der Eddy-Kovarianz-Methode bestimmen, in ihre Bestandteile Assimilation (oder Photosynthese) und Respiration (oder Ökosystematmung) aufgetrennt werden können. Dabei ist wichtig zu wissen, dass ^{13}C-Kohlenstoff in der Natur in geringen Mengen überall da vorkommt, wo der etwas leichtere Kohlenstoff mit der Nukleonenzahl 12, also ^{12}C, vorkommt. Im Gegensatz zum dominierenden ^{12}C hat ^{13}C ein Neutron mehr in seinem Kern, ist dementsprechend schwerer als ^{12}C, hat aber praktisch die gleichen chemischen Eigenschaften wie ^{12}C. Da das Isotop ^{13}C keinem radioaktiven Zerfall unterliegt, nennt man es stabil. Es ist also in keiner Weise vergleichbar mit radioaktiven Isotopen, wie sie im Zusammenhang mit nuklearer Kernspaltung entstehen, oder im Fall des radioaktiven ^{14}C für die Altersbestimmung von Hölzern usw. verwendet werden können.

Das Isotop ^{13}C ist quasi ein Spion im System: es «beteiligt» sich an allen Aktivitäten der ^{12}C-enthaltenden Moleküle, die es «beschattet», allerdings mit ganz kleinen aber entscheidenden Unterschieden: so hat es ein $^{13}CO_2$-Molekül wegen seiner etwas grösseren Masse etwas schwieriger, durch die Spaltöffnungen in das Blattinnere von Pflanzen einzudringen, als die $^{12}CO_2$-Moleküle. Dies nennt man «Diskriminierung». Man kann deshalb leicht feststellen, ob eine Pflanze Photosynthese betreibt oder nicht. Denn diese «Diskriminierung» hat zur Folge, dass eine Pflanze vorzugsweise $^{12}CO_2$-Moleküle anstelle der ebenfalls vorhandenen $^{13}CO_2$-Moleküle aufnimmt. Damit steigt das Verhältnis von $^{13}CO_2$ zu $^{12}CO_2$ ausserhalb der Pflanze leicht an, wenn diese aktiv ist. Ähnliches geschieht bei der Respiration: die leichteren $^{12}CO_2$-Moleküle werden etwas häufiger als die schwereren $^{13}CO_2$-Moleküle von den Mikroorganismen im Boden, den Wurzeln und Stämmen (nicht aber von den Blättern der Pflanze) an die Luft abgegeben. Damit nimmt der Gehalt an $^{13}CO_2$ in der Luft über einem Bestand vor allem in der Nacht stark ab. Mit ausgeklügelten Modellen kann man nun aufgrund von Konzentrationsmessungen von $^{12}CO_2$ und $^{13}CO_2$ an verschie-

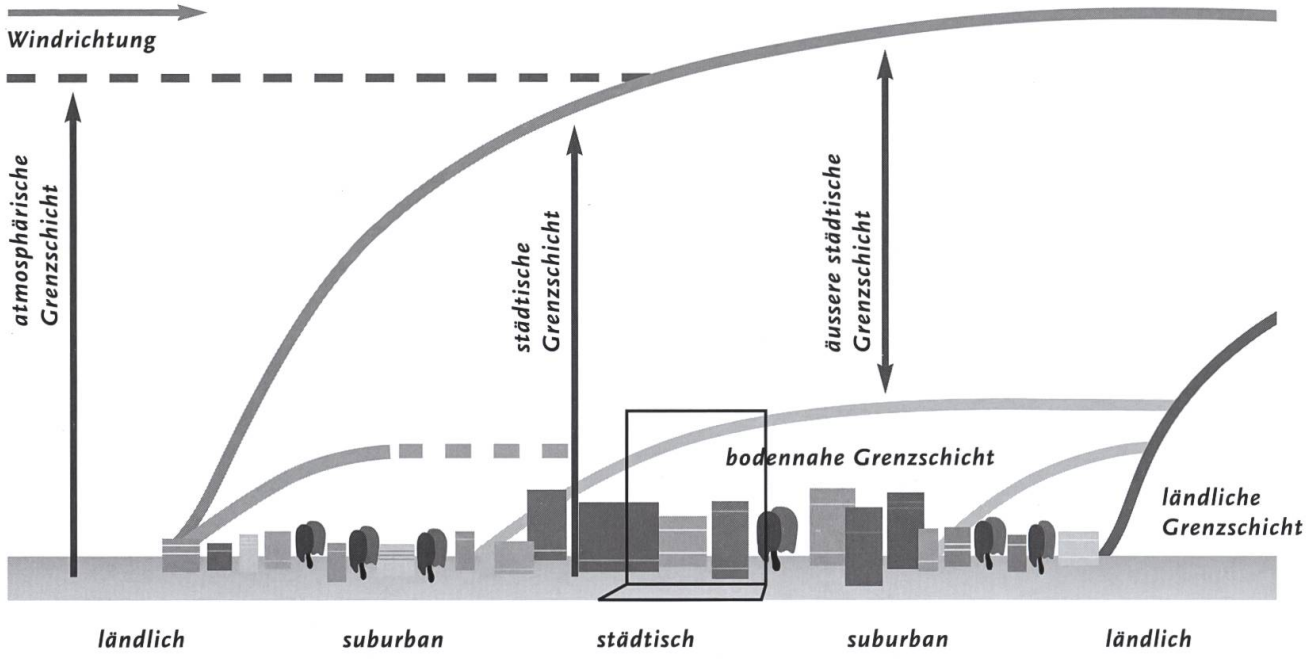


Abb. 19

denen Orten im Ökosystem quantitative Rückschlüsse auf die Photosyntheseleistung und die Respirationsrate eines Pflanzenbestandes ziehen. Diese Grundkonzepte sind heute recht gut bekannt in der Wissenschaft. Dennoch gibt es einige Probleme, die es zu lösen gilt, da in der Natur wie erwartet meist nicht nur zwei einfache, sich perfekt voneinander abgrenzende Prozesse für das Gesamtsystem verantwortlich sind. Eine Vielzahl von gleichzeitig ablaufenden Prozessen erschwert die experimentelle Durchführung solcher Untersuchungen. Auch der Umstand, dass CO_2, das aus der Verbrennung fossiler Energieträger entsteht sehr ähnlich wie CO_2 aus der Ökosystemrespiration aussieht, erschwert den Einsatz von stabilen Isotopen in gewissen Fällen. Die aktuelle Entwicklung geht nun in Richtung einer kombinierten Betrachtung von Kohlenstoff- und Wasserstoffkreislauf. Das heisst, dass nebst ^{13}C auch ^{18}O, das schwerere Isotop des Luftsauerstoffs ^{16}O mit untersucht wird.

Arbeit für die Meteorologen

Zum Schluss des Symposiums ging Mathias Rotach (MeteoSchweiz) auf den aktuellen Forschungsbedarf in der Meteorologie ein. Bisher hat sich die Forschung vorwiegend mit den meteorologischen Bedingungen in horizontal gleichförmigem, flachem und idealisierten Gelände befasst. Kein Hügel, kein Wechsel in der Vegetation stört die freie Sicht über die Ideallandschaft der Meteorologen. Damit lassen sich aber die Austauschprozesse in tatsächlich exisiterendem Gelände mit strukturierter Topografie und kleinräumig wechselndem Vegetationsmosaik nur beschränkt beschreiben. Die grössten Unsicherheiten bestehen nach wie vor im Verständnis der nächtlichen Austauschprozesse in der bodennahen Luftschicht, oder in der langlebigen stabilen Grenzschicht über der Erdoberfläche, wie sie Mathias Rotach und Atsumu Ohmura (ETH Zürich) in ihren Studien in Grönland untersucht haben.

Die Herausforderung für die nächste Forschergeneration von Meteorologen werden deshalb die Durchmischungs- und Austauschprozesse über nicht flachem und horizontal nicht gleichförmigen Gelände sein. Dabei spielen die Einflüsse grosser Rauhigkeitsunterschiede der Oberfläche, wie sie etwa durch Einzelpflanzen, Bäume, Steine und Häuser verursacht werden, eine wichtige Rolle

Abb. 19
Im Gelände mit grossen Rauhigkeitsunterschieden entstehen so genannte interne Grenzschichten, die sich wie Hüllen über Gruppen gleichartiger Rauhigkeitselemente (Einzelpflanzen, Bäume, Steine und Häuser) ausdehnen. Die Windrichtung ist von links, und bei jeder markanten Änderung der Oberflächenrauhigkeit beginnt der Aufbau einer neuen internen Grenzschicht, die mit der Distanz zum Rauhigkeitswechsel mächtiger wird bis sie die Höhe der atmosphärischen Grenzschicht erreicht hat.

(Abb. 19). Es bilden sich in der Atmosphäre verschiedene Grenzschichten aus, die den Luftaustausch von bodennaher Luft mit höheren Luftschichten erschweren, so dass sich die Atmosphäre deutlich anders verhält als unter idealisierten Bedingungen mit flachem Gelände und gleichmässiger, unstrukturierter Oberfläche.
Am Beispiel eigener Messungen, die im Rahmen des Mesoscale Alpine Project (MAP) durchgeführt worden sind, zeigte Rotach, wie sich die Energiebilanz der Taloberfläche in der Riviera sehr stark von derjenigen in verschiedenen Höhenlagen am Talhang unterschied. Dabei spielen die Hangneigung, die Exposition, das Vorhandensein von Tal- und Hangwindsystemen und die lokale Vegetation eine Rolle, die bislang noch nicht abschliessend erforscht und verstanden ist. Hier gibt es ausreichend *terra incognita* für zukünftige Forschungsarbeiten in der Meteorologie, die nicht nur das Verständnis von CO_2- und Energieaustausch zwischen Biosphäre und Atmosphäre verbessern würden, sondern auch einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der täglichen Wetterprognosen leisten könnten.

Schlussbemerkung

Das Symposium hat das weite Spektrum der Forschungsarbeiten, die in der Schweiz zum Thema der Biosphären–Atmosphären Austauschprozesse aktuell im Gange sind, vorgestellt. Viele Arbeiten sind erst im Entstehen oder kurz vor dem Abschluss. Es war deshalb nicht selbstverständlich, dass die Referentinnen und Referenten ihr Daten-, Bild- und Zahlenmaterial bereitwillig für diesen Artikel zur Verfügung gestellt haben. Auch damit konnte eine weitere wichtige «Grenze» überwunden werden: die wissenschaftlichen Ergebnisse und Erkenntnisse andern verfügbar zu machen.

Literatur

Stampfli, A. & **Zeiter**, M. (2004): Plant regeneration directs changes in grassland composition after extreme drought: a 13-year study in southern Switzerland. *Journal of Ecology*, **92**: 568–576

Bildnachweis

Abb. 1: Eidg. Forschungsanstalt WSL (http://www.wsl.ch/forest/risks).
Abb. 2: ICP-Forests, 2004: The Condition of Forests in Europe, 2003 Executive Report. United Nations Economic Commission for Europe, Convention on Long Range Transboundary Air Pollution, Geneva (verfügbar unter http://www.icp-forest.org).
Abb. 3: Peter Waldner
Abb. 4: Thimonier A., Schmitt M., Waldner P. und Rihm B., 2005: Atmospheric deposition on Swiss Long-term Forest Ecosystem Research (LWF) plots. *Environmental Monitoring and Assessment*, **104**: 81–118
Abb. 5: Peter Waldner
Abb. 6: nach Nele Rogiers aus Daten von Jens Leifeld, Eidg. Forschungsanstalt FAL, Zürich Reckenholz.
Abb. 7: Marcus Schaub, Jahr 2002, unveröffentlicht. Projekt Effect- and Risk-Assessment of Ozone Air Pollution on Forest Vegetation in Switzerland, Eidg. Forschungsanstalt WSL (http://www.wsl.ch/ projects/ozone_ch).

Abb. 8: Werner Eugster und Nele Rogiers
Abb. 9: **Rogiers** N., **Eugster** W., **Furger** M. und **Siegwolf** R., 2005: Effect of land management on ecosystem carbon fluxes at a subalpine grassland site in the Swiss Alps. *Theoretical and Applied Climatology,* im Druck.
Abb. 10: Nele Rogiers
Abb. 11: Werner Eugster
Abb. 12: Werner Eugster
Abb. 13: Andreas Stampfli
Abb. 14: Andreas Stampfli
Abb. 15: Andreas Stampfli
Abb. 16: Romain Zweifel
Abb. 17: Romain Zweifel
Abb. 18: Romain Zweifel
Abb. 19: Nach einer Vorlage von Mathias Rotach und Atsumu Ohmura

Anschrift des Autors

PD Dr. Werner Eugster, ACP/ETH Zürich, ETH Zentrum LFW C55.2, 8092 Zürich, werner.eugster@ipw.agrl.ethz.ch

Anschrift der Referentinnen und Referenten:

Prof. Dr. Christine Alewell, Universität Basel, Bernoullistrasse 30, 4055 Basel, christine.alewell@unibas.ch
Dr. Christof Ammann, Agroscope FAL, Reckenholzstrasse 191, 8046 Zürich, christof.ammann@fal.admin.ch
Prof. Dr. Nina Buchmann, ETH Zürich, ETH Zentrum LFW C56, 8092 Zürich, nina.buchmann@ipw.agrl.ethz.ch
Dr. Bruno Neininger, MetAir AG, Sonnenberg 27, 6313 Menzingen, bruno.neininger@metair.ch
Nele Rogiers, Labor für Atmosphärenchemie, Paul Scherer Institut, 5232 Villigen, nele.rogiers@psi.ch
PD Dr. Mathias Rotach, Meteo Schweiz, Krähbühlstrasse 58, 8044 Zürich, mathias.rotach@meteoswiss.ch
Dr. Andreas Stampfli, Universität Bern, Altenbergrain 21, 3012 Bern, andreas.stampfli@ips.uni be.ch
Dr. Peter Waldner, WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmenstorf, peter.waldner@wsl.ch
Prof. Dr. Josef Zeyer, ETH Zürich, Grabenstrasse 3, 8952 Schlieren, zeyer@env.ethz.ch
Dr. Roman Zweifel, Universität Bern, Altenbergrain 21, 3012 Bern, roman.zweifel@ips.unibe.ch