

Zeitschrift: Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft.
Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Annuaire de la Société
Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative

Herausgeber: Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

Band: 162 (1982)

Teilband: Wissenschaftlicher Teil : Naturforschung im Dienste des Gemeinwohls
= Partie scientifique : les sciences naturelles au service de la
communauté

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: 10.12.2025

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

P 819 337 : 1982/1

Die 1815 gegründete Schweizerische Naturforschende Gesellschaft ist die älteste wissenschaftliche Dachgesellschaft der Schweiz. Ihr Ziel ist die Förderung und Entwicklung der exakten und Naturwissenschaften und deren Vertretung in der Öffentlichkeit. Den intensiven Gedankenaustausch zwischen Wissenschaftlern verschiedener Fachrichtungen fördert die SNG, indem sie Symposien durchführt oder unterstützt und publiziert. Das Jahrbuch, wissenschaftlicher Teil, ist die Fortsetzung der seit 1819 erschienenen Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft.

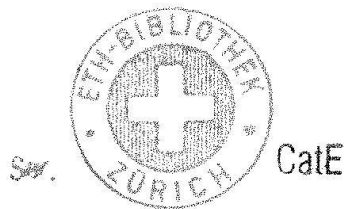
Fondée en 1815, la Société helvétique des sciences naturelles est la plus ancienne organisation faîtière scientifique du pays. Elle a pour but l'encouragement et le développement des sciences exactes et naturelles, leur compréhension auprès du public et l'intensification des échanges entre scientifiques de diverses disciplines. Elle organise et soutient des symposia et en publie les actes. L'Annuaire, partie scientifique, remplace les Actes de la Société helvétique des sciences naturelles, publiés depuis 1819.

**Naturforschung
im Dienste
des Gemeinwohls**

**Les sciences
naturelles au service
de la communauté**

1986
Birkhäuser Verlag
Basel · Boston · Stuttgart

P 819 337 : 1982/1



21. FEB. 1989

Die vorliegende Publikation ist urheberrechtlich geschützt.
Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in andere Sprachen,
vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche
Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie,
Mikrofilm oder andere Verfahren – reproduziert oder in eine
von Maschinen, insbesondere Datenverarbeitungsanlagen,
verwendbare Sprache übertragen werden.

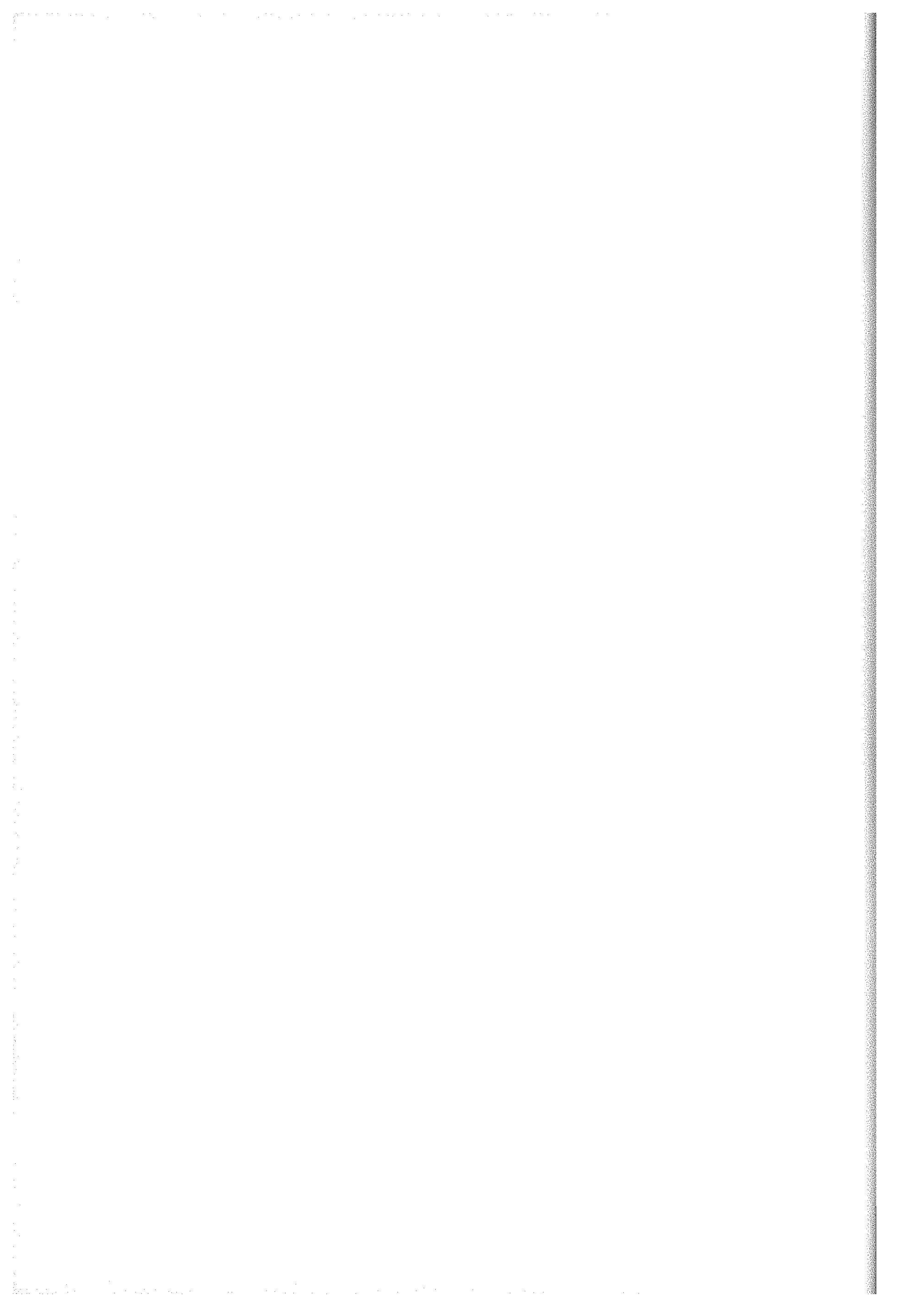
©1986 Schweizerische Naturforschende Gesellschaft Bern
Printed in Switzerland
ISSN 0080/7362

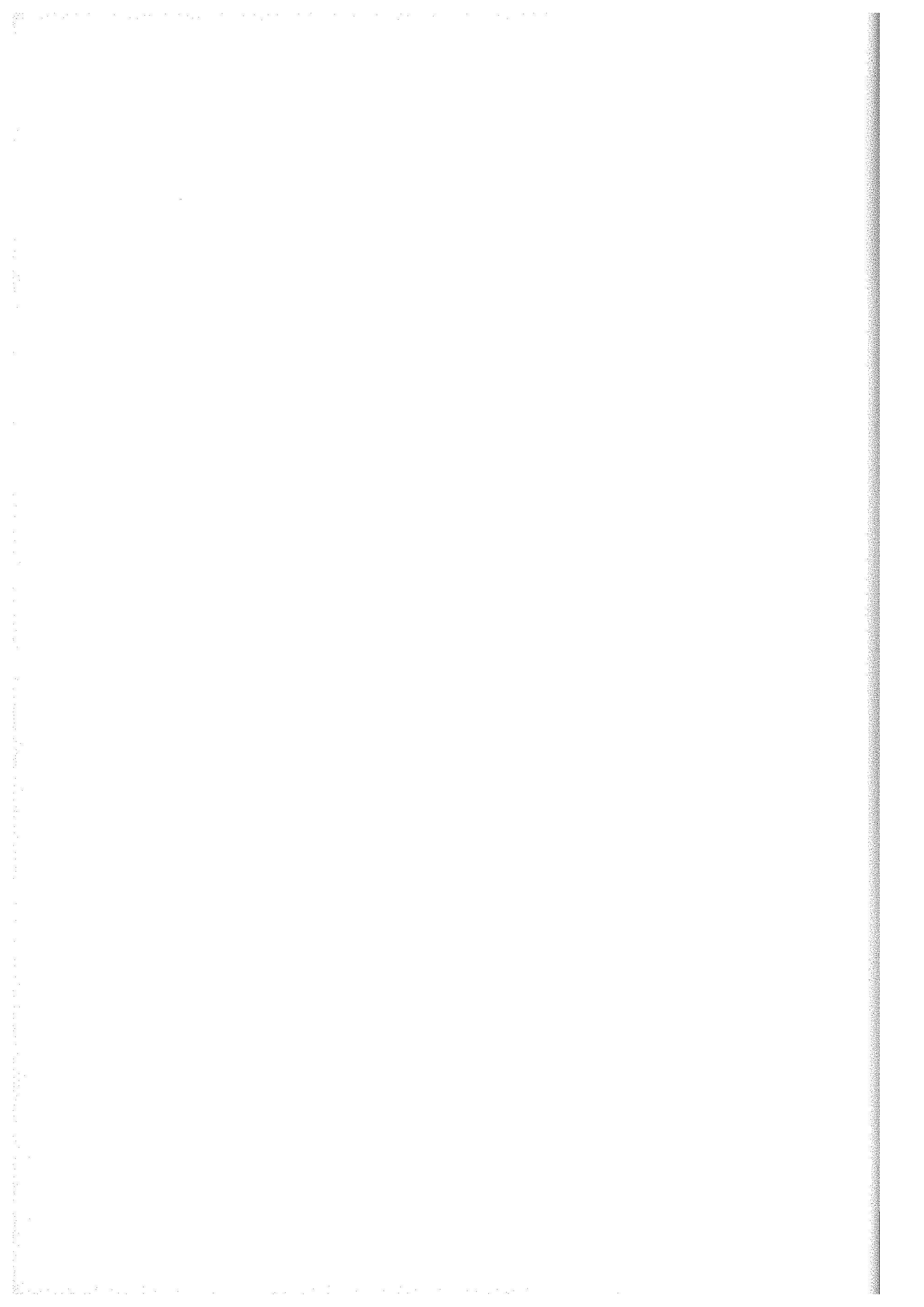
Naturforschung im Dienste der Gesundheit: Erreger und Überträger tropischer Krankheiten

Symposium zu Ehren von Prof. Dr. Rudolf Geigy aus Anlass seines 80. Geburtstages, veranstaltet vom Schweizerischen Tropeninstitut Basel und vom Institut der Zoologie, Neuchâtel, unter dem Patronat der Schweizerischen Zoologischen Gesellschaft.



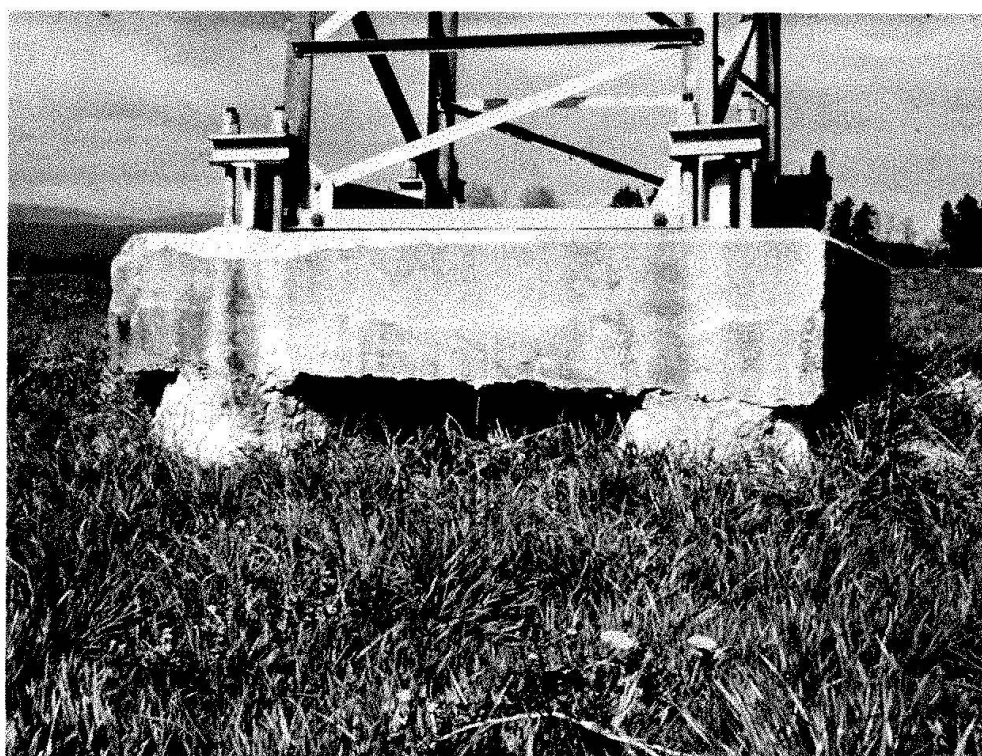
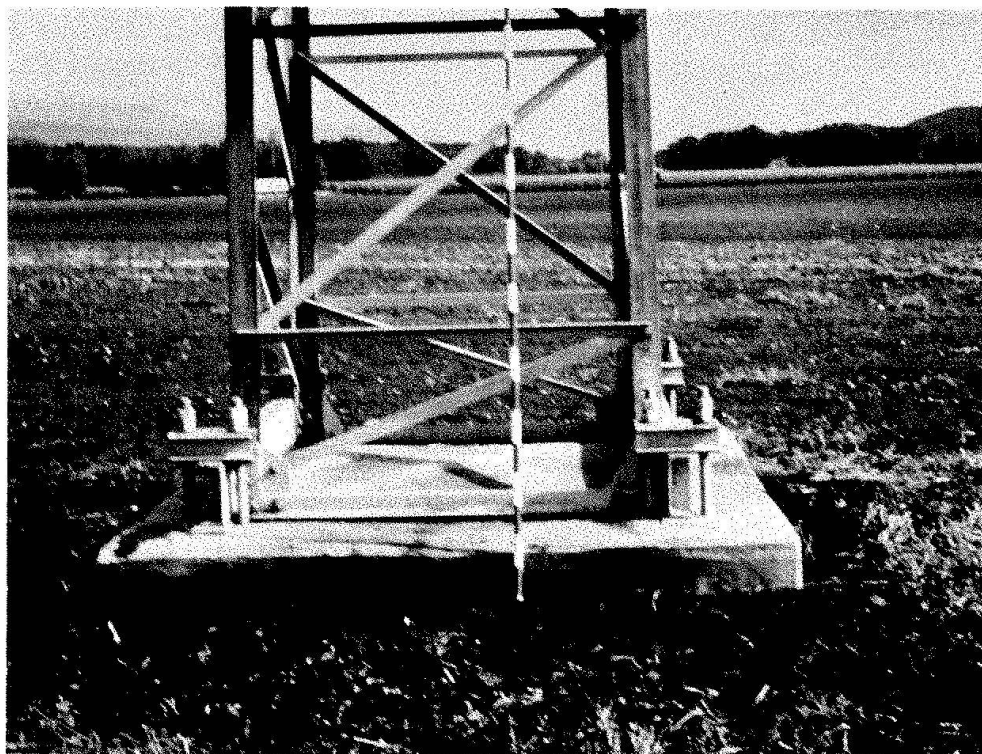
Professor Rudolf Geigy (Photo Fred Hufschmid)



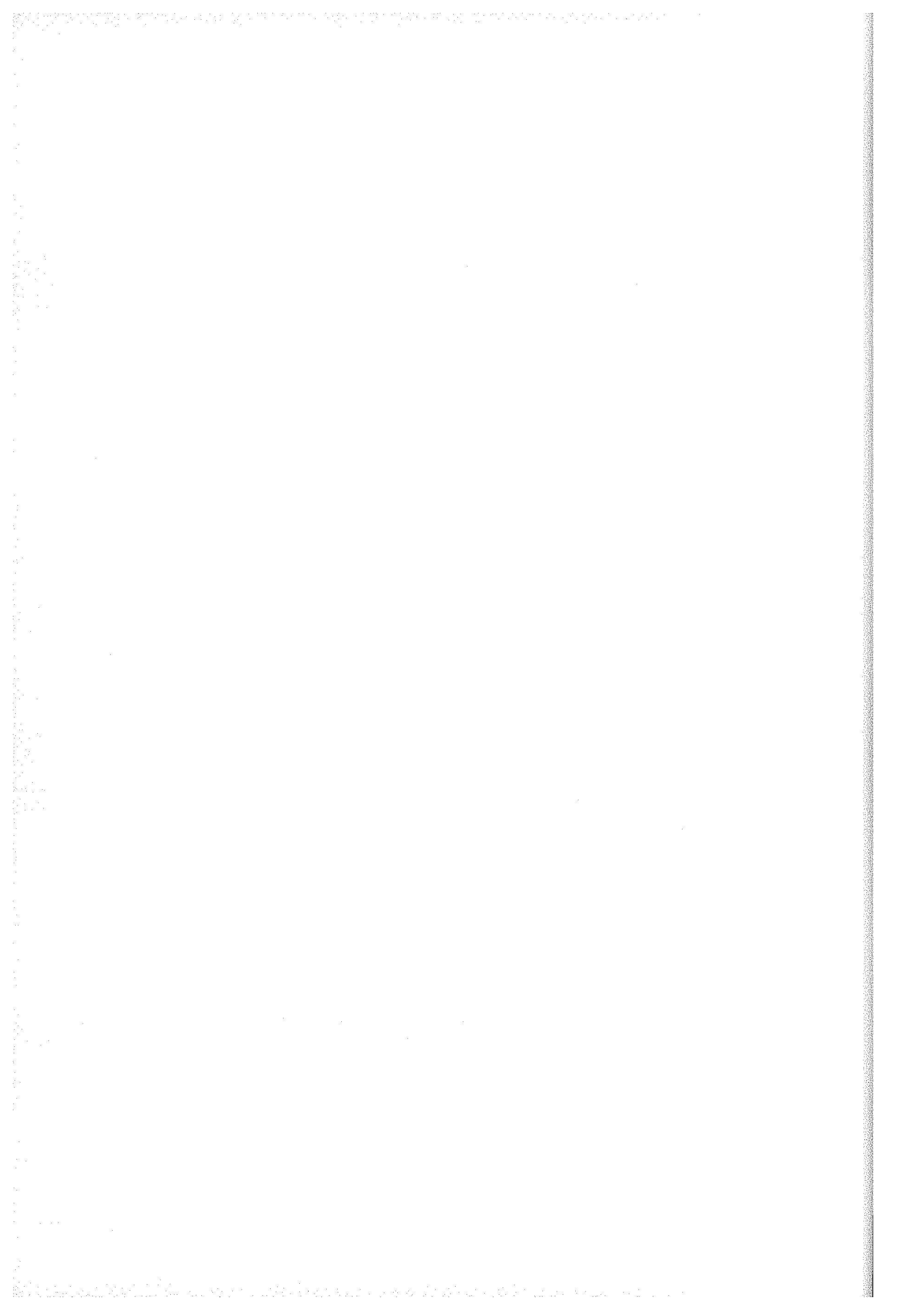


Les sols organiques menacés de Suisse

Symposium de la Société Suisse de Pédologie



Tassement de noire dans le Seeland.



Jahrbuch der SNG/Annuaire de la SHSN

1978

Gletscher und Klima/Glacier et climat
1981. 312 Seiten/pages. Broschur/broché

1979

Méthode et responsabilité/Methode und Verantwortung
1981. 112 pages/Seiten. Broché/Broschur

1980, Fasc. 1

Das Bewegungsverhalten von Krebszellen/
Winterthurer Naturforscher und Techniker vor 1850/
Die Relevanz von Lysimetern/
Elektrochemie und verwandte Probleme
1982. 138 Seiten/pages. Broschur/broché

1980, Fasc. 2

Osteosynthese und Endoprothese/
Ostéosynthèse et Endoprothèse
1984. 197 Seiten/pages. Broschur/broché

1980, Fasc. 3

Wirbeltierzytogenetik/Cytogénétique des vertébrés/
Cytogenetics of Vertebrates
1981. 86 Seiten/pages. Broschur/broché

1981

Vom Ursprung der Dinge/
De l'origine des choses
1983. 160 Seiten/pages. Broschur/broché

1982, Fasc. 1

Naturforschung im Dienste des Gemeinwohls/
Les sciences naturelles au service de la communauté
1985. 188 Seiten/pages. Broschur/broché

1982, Fasc. 2

Stadtdynamik in der Schweiz/
La dynamique urbaine en Suisse
1983. 109 Seiten/pages. Broschur/broché

1982, Fasc. 3

On the nature of cancer
1985. 77 pages. Paperback

1983

Das Klima, seine Veränderungen und Störungen/
Le climat, ses modifications et perturbations
1985. 129 Seiten/pages. Broschur/broché

NATURFORSCHUNG IM DIENSTE DES GEMEINWOHLS LES SCIENCES NATURELLES AU SERVICE DE LA COMMUNAUTÉ

Birkhäuser Verlag

Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden
Gesellschaft, wissenschaftlicher Teil
Annuaire de la Société Helvétique des Sciences
Naturelles, partie scientifique

1982/1

**SNG
SHEN**

Inhalt

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Naturforschung im Dienste des Gemeinwohls.</i> | 5 |
| <i>Naturforschung im Dienste der Gesundheit:</i> <i>Erreger und Überträger tropischer Krankheiten</i> <i>Symposium zu Ehren von Prof. Dr. Rudolf Geigy</i> | 51 |
| <i>Les sols organiques menacés de Suisse</i> | 97 |
| <i>Logik zwischen Mathematik und Philosophie</i> | 161 |

Naturforschung im Dienste des Gemeinwohls

Inhalt

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>W. Arber, Universität Basel</i> Einführung | 7 |
| <i>H. Oeschger, Universität Bern</i> Der Beitrag der Physik zur Umweltforschung | 9 |
| <i>P. Cuendet, EPF Lausanne</i> La conversion de l'énergie solaire par des systèmes photosynthétiques artificiels | 31 |
| <i>J. Davies, Institut Pasteur, Paris</i> Prospects and problems in biotechnology | 39 |
| <i>K. Heusler, CIBA-GEIGY AG, Basel</i> Natur und Chemie. | 43 |

Einführung

Werner Arber

Wir Menschen sind Teil der belebten Natur, und dem Biologen offenbaren sich viele mehr oder weniger enge Verwandtschaften zwischen allen Lebewesen. Was den Menschen aber als etwas Besonderes auszeichnet, sind seine hochentwickelten intellektuellen Fähigkeiten. Eine der edelsten Früchte intellektueller Tätigkeiten ist die Kultur, welche ich hier als die Summe der Beiträge des Menschen zur Verbesserung der Lebensqualität der Mitmenschen definieren möchte. Es ist interessant festzustellen, dass solche Beiträge sehr häufig von Einzelpersonen stammen. Ich denke hier insbesondere an Schriftsteller, Maler, Bildhauer und Komponisten, deren Werke auf andere Menschen bleibende Wirkung ausüben. Diese Wechselwirkung bildet die Basis für unsere Kultur.

Forschung ganz allgemein und Naturforschung im speziellen ist ein Teil der Kultur. Auch hier sind Werke von Einzelpersonen wesentlich, obwohl der einzelne Forscher meist sehr stark von seinen Kollegen abhängig ist. In der Naturforschung zeigt sich doch das Phänomen der Geschichtlichkeit. Der Forscher ist kein Einzelgänger, sondern baut auf allen zuvor von anderen Forschern erzielten Ergebnissen auf. Dieses integrale Wissen, das man auch das naturwissenschaftliche Weltbild nennen könnte, bildet die Basis für jede weitere Entwicklung. Aus diesen Gründen ist das naturwissenschaftliche Weltbild einem steten Wandel unterworfen.

Aus dieser Betrachtung folgt, dass Naturforscher einen steten Dialog mit allen anderen Forschern verlangt, sowohl mit jenen, die früher lebten und forschten als auch mit jenen, die jetzt am Werke sind. Unsere Tagung ist eine gute Illustration für diesen permanenten Austausch von Wissen und Gedanken. Es ist uns allen klar, dass dieser Dialog keine nationalen Grenzen kennt, sondern weltweit ist, und ich bin überzeugt, dass gerade dieser Aspekt viel zur Völkerverständigung beitragen kann.

Es ist die Rolle der Hochschule, dem angehenden Forscher ein möglichst umfassendes natur-

wissenschaftliches Weltbild zu vermitteln, welches die Basis für das Forscherhandwerk darstellt. Forschen selber als praktische Tätigkeit muss ebenfalls wie jedes andere Handwerk gelernt werden. Dies bedingt, dass die Forschung ein integraler Teil der Lehre an den Hochschulen darstellen muss.

Es ist uns allen bekannt, dass diese Verkopplung zwischen Lehre und Forschung relativ hohe Kosten bringt. Zu deren Deckung gibt es im Prinzip zwei Quellen: Mäzene, welche leider heutzutage eher selten geworden sind, und die öffentliche Hand, d.h. die menschliche Gemeinschaft. Da die letztere den Hauptteil der Hochschulforschung zu tragen hat, erstaunt es nicht, dass die Öffentlichkeit sich in vermehrtem Masse nach dem Nutzen dieser Forschung fragt. Darauf basiert auch die Forderung, dort zu forschen, wo Bedürfnisse zur Hebung der Lebensqualität vorliegen. Diese Forderung wird oft mittels sogenannter Schwerpunktsprogramme beantwortet, welche den Weg zu praktischen Nutzenanwendungen ebnen sollten.

Allerdings bieten solche Programme keine Garantie für Erfolg. Im Gegenteil kommt ein neuer Durchbruch oft von anderswo und völlig unerwartet, z. B. wenn in einem anderen Gebiet eine neue Methode erarbeitet wird, welche sich fruchtbar auf Nachbardisziplinen auswirken kann und dort zu neuen Einsichten führt. Darauf basiert die von vielen Wissenschaftlern unterstützte Forderung, dass die Möglichkeiten zur freien Grundlagenforschung offenbleiben müssen, auch bei Bejahung einer Lenkung der Forschung im Hinblick auf schnelle Nutzenanwendung von Ergebnissen. Übrigens bin ich davon überzeugt, dass sich ein Grundlagenforscher im allgemeinen freut, wenn seine Erkenntnisse von anderen anerkannt und weiterverwendet werden, besonders wenn dies für das Gemeinwohl geschieht.

Während die Ergebnisse der Grundlagenforschung im Prinzip wertneutral sind, müssen wir uns bewusst sein, dass Nutzenanwendungen ne-

ben dem erwarteten Nutzen oft auch unerwünschte Nebeneffekte zeigen können. Man weiss, dass jedes Medikament auch ein Gift ist. Dies bedingt eine permanente Wachsamkeit bereits bei der Entwicklung einer Nutzenanwendung wie auch zu späteren Zeiten, wenn die Anwendung bereits erfolgt. Es geht hier vor allem um das Abschätzen des wirklichen, langfristigen Nutzens der Anwendung wissenschaftlicher Erkenntnis relativ zu den dieser Anwendung inhärenten Risiken. Dabei sollen Nutzen-Risikoplanalysen mögliche Effekte sowohl auf die menschliche Kultur wie auf die gesamte belebte und unbelebte Umwelt in Betracht ziehen. Solche Bilanzen müssen einer stetigen Revision unterzogen werden unter Berücksichtigung des sich stets wandelnden naturwissenschaftlichen Weltbildes. Zusätzlich muss man im Rahmen

einer ganzheitlichen Betrachtung fordern, dass bei diesen Betrachtungen neben rein naturwissenschaftlichen Aspekten auch sozial-ethische Fragen berücksichtigt werden. Der Naturwissenschaftler ist also gehalten, seinen für ihn wichtigen Dialog mit seinen Fachkollegen auszudehnen in einen Dialog mit der ganzen Menschheit, insbesondere mit deren geistigen Elite.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. Werner Arber
Abteilung Mikrobiologie
Biozentrum der Universität Basel
Klingelbergstrasse 70
CH-4056 Basel

Der Beitrag der Physik zur Umweltforschung

Hans Oeschger

Einleitung

Die Erarbeitung des Verständnisses der Vorgänge, die unsere Umwelt bestimmen, gehört zu den Grundanliegen der Naturwissenschaft. Wesentliche Beiträge zu dieser Forschung liefern Methoden, die der physikalischen und chemischen Grundlagenforschung entstammen. Beispiele dafür sind die Beobachtung durch H.C. Urey (1948), dass die Sauerstoffisotopenverhältnisse ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) im Kalziumkarbonat der Sedimente Palaeotemperaturen widerspiegeln, die Entdeckung des durch die kosmische Strahlung in der Erdatmosphäre produzierten radioaktiven Kohlenstoffs ^{14}C (Libby et al., 1947) und die Erkenntnis, dass dieses Radioisotop die Datierung von Pflanzen- und Tierresten ermöglicht, und der Versuch von F.G. Houtermans (1953), das Alter der Erde aufgrund von Bleisotopenverhältnissen abzuschätzen.

Fortschritte auf dem Gebiet der physikalischen und chemischen Analytik, die Möglichkeit der Beobachtung terrestrischer und solarer Parameter und ihres zeitlichen Verhaltens von Satelliten aus, die sich immer mehr verfeinernde Rekonstruktion der Geschichte von das Naturgeschehen beschreibenden, in Sedimenten, Baumringen, Polareis, etc. archivierten Parametern, wie auch die Entwicklung auf dem Gebiet der Computer, die die Modellierung immer komplexerer, naturgetreuerer Systeme möglich macht, haben der Umwelt- und Klimaforschung neue Impulse verliehen.

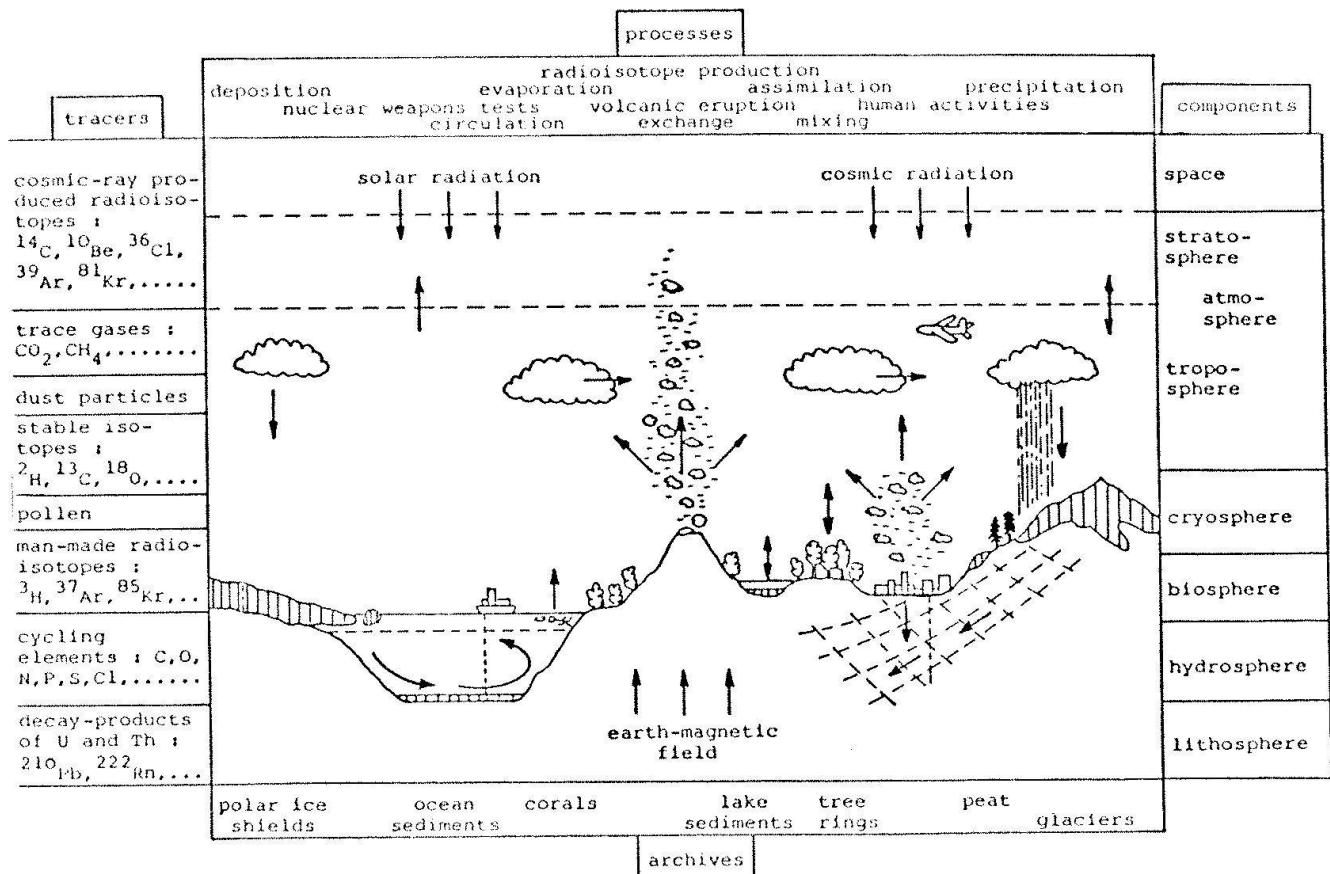
Als Beispiel sei eine neue analytische Entwicklung auf dem Gebiet des Isotopennachweises erwähnt. Durch die kosmische Strahlung produzierte Radioisotone, wie ^{14}C und ^{10}Be , wurden bisher über den Nachweis der radioaktiven Zerfälle bestimmt. Bei diesen langlebigen Radioisotopen zerfällt jedoch während der Messzeit nur ein kleiner Bruchteil der radioaktiven Kerne der Probe, so dass die vorhandene Information schlecht genützt wird. Der direkte, massenspektrometrische Nachweis war wegen der

grossen Zahl der Atome der Nachbarisotope (oft 10^{12} mal häufiger) nicht möglich. Ende der 70er Jahre wurde in Berkeley (R.A. Muller et al., 1977) and Rochester (C.L. Bennet et al., 1977) gezeigt, dass Teilchenbeschleuniger, ursprünglich für die kernphysikalische Grundlagenforschung entwickelt, als Massenspektrometer eingesetzt, den Nachweis von 10^4 – 10^5 Atomen eines Isotops gestatten, selbst wenn die Nachbarisotope derart stark, wie oben erwähnt, dominieren. Diese neue Nachweisteknik ermöglicht heute ^{14}C -Bestimmungen an 1 mg natürlichen Kohlenstoffs oder ^{10}Be -Bestimmungen an in 1 kg Eis enthaltenem Beryllium, während früher für den Nachweis über den radioaktiven Zerfall Proben von mehreren Gramm Kohlenstoff respektive vielen Tonnen Eis erforderlich waren. Erfreulicherweise war es möglich, diese Technik in einer Zusammenarbeit zwischen dem Laboratorium für Kernphysik der ETHZ und dem Physikalischen Institut der Universität Bern auch in der Schweiz aufzubauen und weiter zu entwickeln.

Besondere Aktualität kommt der Erforschung der Umweltsysteme im Hinblick auf deren anthropogene Veränderungen zu. So hat der Mensch im Industriezeitalter den CO_2 -Gehalt der Atmosphäre durch das Abholzen von Wäldern und die Fossilienenergienutzung signifikant erhöht. Der atmosphärische CO_2 -Gehalt wird weiter ansteigen mit Auswirkungen auf das Klima der Erde. Zur Beurteilung derartiger Eingriffe in das Naturgeschehen mit teilweise negativen Auswirkungen für die Gesellschaft sind wissenschaftliche Grundlagen zu erarbeiten, die heute noch weitgehend fehlen.

Das Umweltsystem

In den Anfängen beschränkte sich die Anwendung physikalischer und chemischer Methoden



Figur 1: Das Umweltsystem.

zur Erforschung von Umweltvorgängen auf sich mehr oder weniger zufällig anbietende Fragestellungen. Im Folgenden wird nun der Versuch unternommen, die Vielfalt dieser Forschung systematisch zu ordnen und ihre Stossrichtungen und Zielsetzungen zu formulieren. Wir legen unserer Forschung die Vorstellung eines Umweltsystems zugrunde, wie es in Figur 1 schematisch dargestellt ist. Seine Hauptkomponenten sind die Atmosphäre im Austausch mit der Hydrosphäre, bestehend aus dem Ozean und den kontinentalen Gewässern, und mit der Biosphäre, gebildet durch die auf den Kontinenten im Ozean lebenden Organismen. Luft- und Wasserproben enthalten in Form von Partikeln, löslichen chemischen Stoffen und Anteilen radioaktiver und stabiler Isotope eine Fülle von Information über den Zustand des Umweltsystems, respektive seiner Subsysteme, wie das Energiesystem und die Kreisläufe des Wassers, des Kohlenstoffs, der Elemente N, P, S, etc. (Tabelle 1). Die in Luft und Wasser enthaltene Information wird laufend in den Archiven des Umweltsystems, den polaren Eiskappen und den Gletschern, den See- und Ozeansedi-

menten, sowie den Torfmooren und den Baumringen gespeichert.

Umweltmodelle

Die Zielsetzung der Forschung besteht darin, die Umweltvorgänge aufgrund der physikalischen, chemischen und biologischen Grundgesetze modellmässig zu beschreiben. Da die Vorgänge oft sehr komplex sind, spielen vereinfachende Simulationsansätze eine grosse Rolle. Die Modelle werden bezüglich ihrer Fähigkeit geprüft, die Reaktion der Systeme auf Störungen innerhalb vernünftiger Genauigkeitsgrenzen richtig wiederzugeben. Heutige Störungen und ihre Auswirkungen lassen sich mit räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Beobachtungen auf der Erdoberfläche und von Satelliten aus verfolgen. Ein Beispiel einer externen Störung des Klimasystems ist der Ausbruch des mexikanischen Vulkans El Chichón, der zu einer Erhöhung des Staubgehaltes und damit zu einer Trübung der Atmosphäre führte, die sich auf das Klima der nördlichen Hemisphäre aus-

Tabelle 1: Das Umweltsystem

| | |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Komponenten | |
| Atmosphäre (Stratosphäre und Troposphäre) | |
| Hydrosphäre (Ozean, kontinentale Gewässer) | |
| Biosphäre (Pflanzen und Tiere auf Kontinenten und im Ozean) | |
| Kryosphäre (Eiskappen, Gletscher, Meereis) | |
| Lithosphäre (Gesteine, Sedimente) | |
| Informationsträger | |
| Durch die kosmische Strahlung produzierte Radioisotope: | |
| | ^{14}C (CO_2), ^3H (H_2O) |
| | ^{10}Be (Aerosol), ^{39}Ar (Luft und Wasser) |
| Verhältnisse stabiler Isotope: | |
| | $^2\text{H}/^1\text{H}$ (H_2O), $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (H_2O), $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (CO_2) |
| Gase: | CO_2 , CH_4 , NO_x , Freone |
| Staub stammend von | Kontinenten, Ozean, Vulkanen |
| Pollenanteile: | z.B. Verhältnis Bäume/Sträucher |
| Subsysteme | |
| – Klimasystem | |
| – Kreisläufe v. H_2O , CO_2 , N, P, S | |
| Archive | |
| – Eis (Polarkappen, Gletscher) | |
| – Ozean- und Seesedimente | |
| – Baumringe, Torfmoore | |

wirken dürfte. Es ist nun von grossem Interesse zu prüfen, wieweit die heutigen Klimamodelle die Folgen der Trübung richtig voraussagen. Die genauen Beobachtungen der Trübung und ihrer effektiven klimatischen Auswirkungen werden andererseits Verfeinerungen der Modelle ermöglichen.

In Figur 2 ist die Modellentwicklung schematisch dargestellt. Auf der linken Seite sind die natürlichen Systeme mit ihren Störungen und Systemantworten angedeutet, auf der rechten die entsprechenden Modelle mit den parametrisierten Störungen und Modellantworten.

Nicht nur heutige, sondern auch vergangene Störungen dienen der Modellentwicklung. Mit Hilfe der natürlichen Archive rekonstruierte Parameter ergeben sowohl Information über kausale Faktoren für Umweltveränderungen in der Vergangenheit als auch über die resultierenden Veränderungen selber. Wohl ist diese Information nicht derart direkt und präzise wie die aufgrund heutiger Messungen gewonnene, doch lassen sich in den Archiven viel grössere Zeiträume mit drastischen Schwankungen überblicken, über die wir uns ohne diese Hinweise aus der Vergangenheit kaum sinnvolle Vorstellungen machen könnten.

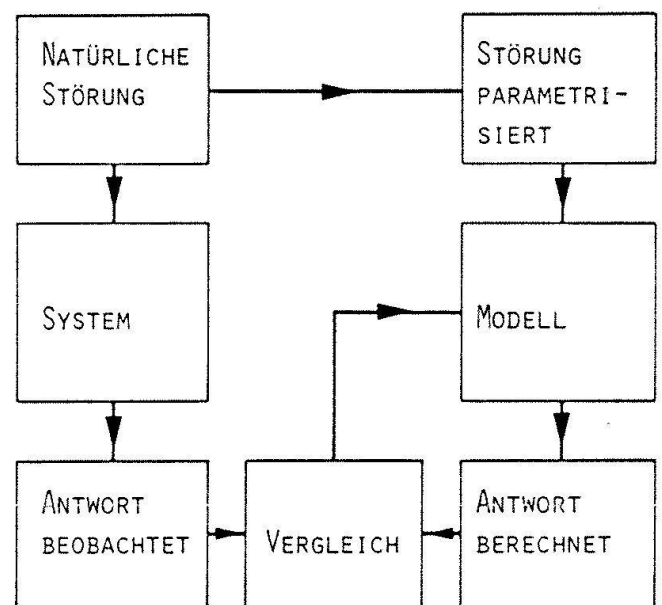
Die Modelle werden sodann benützt, um Prognosen bezüglich zukünftiger Umweltveränderungen zu erstellen. Mögliche Szenarien zukünftiger anthropogener Umweltveränderungen dienen als Input für die Modelle. Der Output gibt eine Vorstellung der zu erwartenden Umweltveränderungen.

Die hier skizzierte Modellentwicklung wird später am Beispiel des CO_2 - und des Klimasystems erläutert. Als natürliches Archiv wird uns speziell das Eis der Polarkappen dienen.

Das Archiv Eis

In den letzten Jahren trat die Bedeutung des natürlichen Archivs Eis für die hier skizzierte Forschung immer mehr in den Vordergrund. In ihm ist die getreueste Information über Prozesse auf der Erdoberfläche und im Planetensystem enthalten. Im Folgenden wird kurz erläutert, wie Information über das Umweltsystem in dieses Archiv gelangt und dort gespeichert wird.

Kontinuierlich kondensiert Wasserdampf an in der Luft suspendierten Partikeln, es bilden sich Schneeflocken, die absinken und dabei weitere Partikel anlagern. Frischer Schnee enthält somit Proben von Stoffen, die über den Kontinen-



NATÜRLICHE STÖRUNGEN: –GEGENWÄRTIGE
–VERGANGENE
–ZUKÜNFTIGE

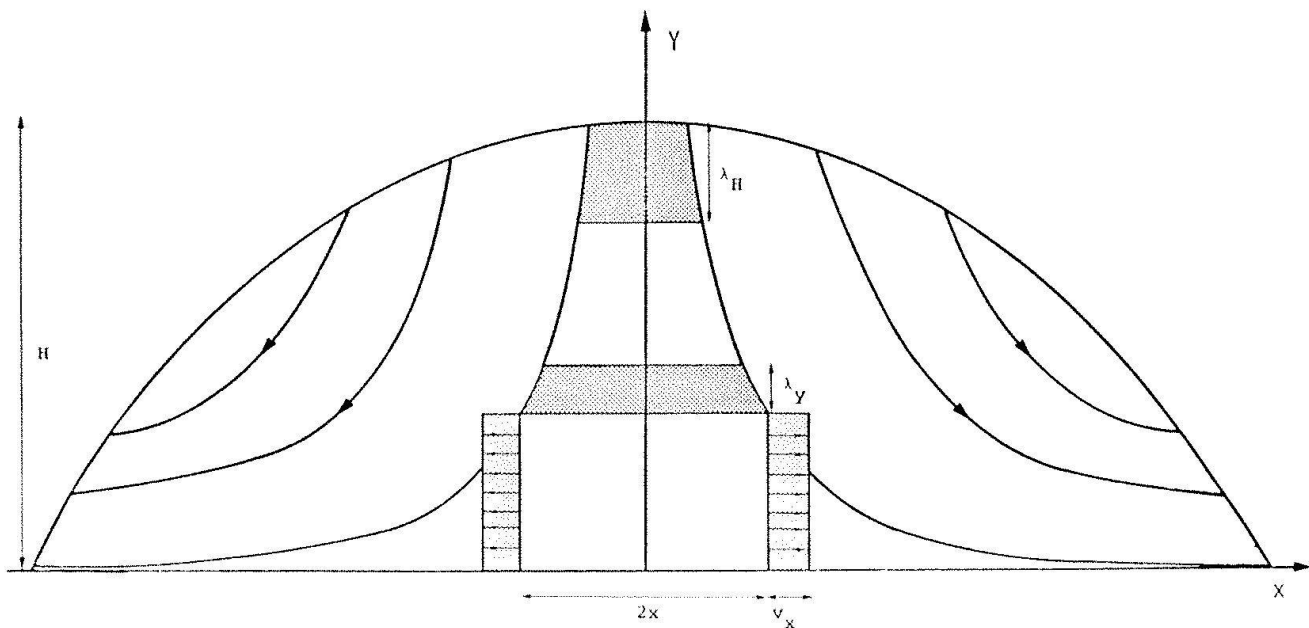
Figur 2: Entwicklung von Umweltmodellen.

ten und dem Ozean in die Luft gelangten. Interessant ist aber auch die in den Wasserstoff- und Sauerstoffverhältnissen $^2\text{H}/^1\text{H}$ und $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ der Wassermoleküle gespeicherte Information. Die schweren Isotope im Wassermolekül sind in den Niederschlägen gegenüber Meerwasser abgereichert. Grob gilt die Gesetzmässigkeit, dass diese Fraktionierung mit grösserer Temperaturdifferenz zwischen Verdunstung und Kondensation zunimmt. Die Stärke der Isotopenfraktionierung ist somit in erster Näherung ein Mass für die Temperatur, die bei der Wolkenbildung geherrscht hat. So äussern sich klimatische Schwankungen als Veränderungen der Isotopenzusammensetzung der Wassermoleküle in den Niederschlägen.

Frisch gefallener Schnee wird von neuen Niederschlägen überdeckt. Die Schneeflocken degenerieren zu kugelartigen Firnkörnern. Unter zunehmendem Druck neuer Niederschläge sintern die Firnkörner zusammen. Beim Übergang von Firn zu Eis (für Grönland typisch in einer Tiefe von 50 bis 70 m) erfolgt der Einschluss der im Firn enthaltenen Luft; es bilden sich die Luftbläschen, die durch Lichtsteuerung an der sie umgebenden Eisoberfläche dem natürlichen Eis die weisse Farbe verleihen. Auf den polaren Eiskappen wie auch auf den Gletschern werden durch diesen Prozess laufend Luftproben ent-

nommen. In erster Näherung darf angenommen werden, dass die Luft im Firn mit der Atmosphäre relativ rasch austauscht. Die Information über die Gaszusammensetzung der Atmosphäre wird somit in tieferen Schichten eingelagert als andere Informationen wie Isotopenverhältnisse im Wassermolekül, lösliche und unlösliche Stoffe, die in der jeweiligen Firnoberfläche gespeichert sind.

Wie Figur 3 am Beispiel eines Eisschildes zeigt, bewegt sich frischgebildetes Eis zunächst hauptsächlich vertikal nach unten. Unter dem Druck des darüberliegenden Eises verdünnen sich sodann die Schichten und neben der vertikalen stellt sich auch eine horizontale, zu den Randzonen hin gerichtete, Bewegung ein. Das Tiefenprofil der Horizontalgeschwindigkeit an einer beliebigen Stelle auf einem Eisschild zeigt für etwa die obersten zwei Drittel einen annähernd konstanten Wert. Zum Felsbett hin nimmt dann die Geschwindigkeit ab bis auf den Wert null, falls das Eis an das Felsbett angefroren ist. Für die Ausdünnung ergibt sich ein, zumindest für die obersten zwei Drittel mit guter Näherung gültiger, einfacher Zusammenhang: Die Höhe einer Jahresschicht über dem Felsbett, wie auch ihre Dicke, nimmt exponentiell mit der Zeit ab. Die Zeitkonstante berechnet sich als Quotient aus gesamter Höhe des



Figur 3: Fliessmodell eines Eisschildes.

H: Scheitelhöhe Eisschild

λ_H : Schichtdicke für $y = H$

λ_Y : Schichtdicke in Funktion von y

X: Distanz vom Zentrum

V_x : Horizontale Geschwindigkeitskomponente in Funktion von X

Eisschildes dividiert durch die Dicke einer frischgebildeten Jahresschicht.

Bei der Bohrung in Dye 3, Südgrönland, beträgt die Mächtigkeit des Eisschildes ca. 2000 m und die Dicke einer jungen Jahresschicht entspricht ca. 0,6 m Eis. Als mittleres Alter des Eises ergibt sich somit ein Wert von 3300 Jahren. Der Übergang Eiszeit-Nacheiszeit vor ca. 10000 Jahren wurde nach der exponentiellen Gesetzmässigkeit in einer Höhe von 100 m über dem Felsbett erwartet. Experimentell wurde der Übergang anlässlich der Bohrung (1981) in einer Höhe von ca. 220 m gefunden.

Die Information über grössere Zeiträume ist im antarktischen Eisschild gespeichert. Bei einer Dicke des Eisschildes am Südpol von ca. 3000 m und einer jungen Jahresschicht von nur 0,08 m, beträgt das mittlere Alter 37500 Jahre. Der Eiszeit-Nacheiszeit-Übergang sollte sich somit ca. 2300 m, die letzte Zwischeneiszeit vor ca. 110000 Jahren ca. 160 m über dem Felsbett nachweisen lassen.

Das CO₂-Problem

Möglichkeiten und Ergebnisse der hier skizzierten Umweltsystemforschung sollen im Folgenden am Beispiel des CO₂-Problems dargestellt werden.

Das Klima der Erde hängt stark von der Zusammensetzung der Atmosphäre ab. Gase und Feststoffe spielen eine wichtige Rolle in physikalischen Prozessen, die das Energiebudget der Erde und damit das Klima bestimmen.

Ein Beispiel ist das Kohlendioxydgas (CO₂), das, obwohl es heute nur 0,034 Volumenprozent der Atmosphäre (oder 340 ppm) ausmacht, einen Teil der von der Erdoberfläche emittierten Wärmestrahlung absorbiert und teilweise wieder auf die Erde zurückwirft und somit die Erdtemperatur um einige °C über die Temperatur erhöht, welche bei einer CO₂-freien Atmosphäre herrschen würde.

Durch die Nutzung von Fossilenergie wie Erdöl, Erdgas und Kohle, wie auch durch Rodungen und als Folge neuer landwirtschaftlicher Methoden, werden grosse Mengen CO₂ produziert und in die Atmosphäre emittiert. Abschätzungen ergeben, dass sich der atmosphärische CO₂-Gehalt bei einer steigenden Nutzung der fossilen Brennstoffe in der Mitte des nächsten Jahrhunderts verdoppeln würde.

Klimamodellrechnungen weisen darauf hin, dass eine derartige Verdoppelung zu einem Anstieg der mittleren Erdtemperatur um 1,5–4,5 °C, mit einem Verstärkungsfaktor von 2–3 in den Polargebieten, führen wird. Andere Gase wie Methan, Chlor-Fluor-Kohlenwasserstoffe und Oxyde des Stickstoffs zeigen ebenfalls Konzentrationsanstiege. Da sie wie CO₂ die Wärmestrahlung absorbieren, könnten sie den für das CO₂ abgeschätzten Effekt um etwa 50 % erhöhen.

Um sich Vorstellungen der Konsequenzen der anthropogenen CO₂-Emission machen zu können, müssen die folgenden Fragen zu beantworten versucht werden (Figur 4):

- Welchen Verlauf wird die CO₂-Produktion während der nächsten Jahrzehnte bis Jahrhunderte nehmen?
- Wie wird das emittierte CO₂ auf die Reservoir Atmosphäre, Biosphäre und Ozean verteilt, resp. welcher Bruchteil bleibt in der Atmosphäre zurück?
- Wie wird sich der erhöhte CO₂-Gehalt auf das Klima auswirken?
- Welches werden die Auswirkungen der sich ändernden Klima- und Umweltbedingungen auf Wirtschaft und Gesellschaft sein?

Zur Beantwortung der zweiten und dritten Frage liefern physikalische und chemische Methoden wichtige Informationen.

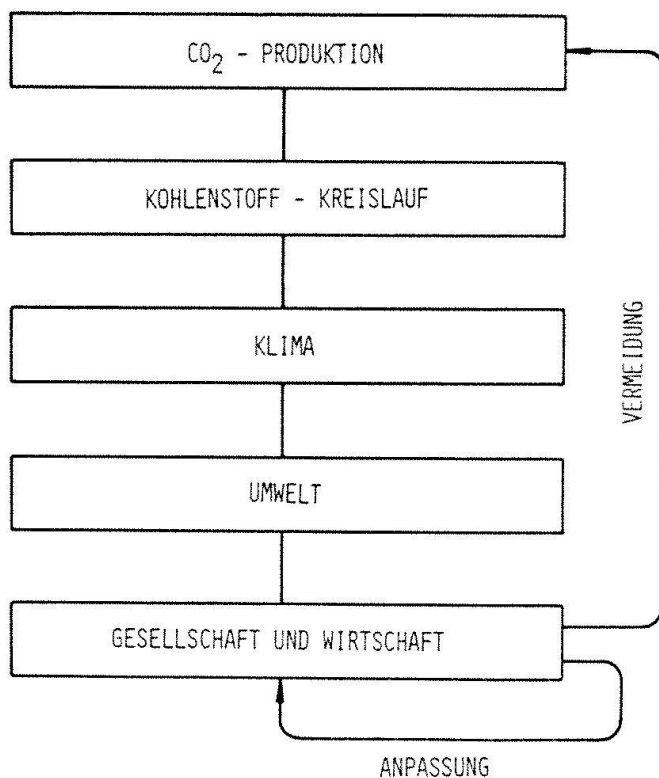
Das CO₂-System – natürliche und anthropogene Szenarien

Der CO₂-Anstieg

Obschon die mögliche Erwärmung der Erde durch CO₂ seit dem Ende des letzten Jahrhunderts bekannt ist, wird der CO₂-Gehalt der Luft erst seit 1958 regelmässig und mit grosser Genauigkeit an mehreren Orten gemessen. In Figur 5 sind die Resultate der Messungen auf dem Mauna Loa, Hawaii, dargestellt.

Die Konzentrationen, angegeben in Volumenppm (parts per million), zeigen einen stetigen Aufwärtstrend. Die saisonalen Schwankungen widerspiegeln die Aktivität der Vegetation: Aufbau und CO₂-Aufnahme im Frühling und Sommer, Abbau und CO₂-Abgabe im Herbst und Winter.

Es stellt sich nun die Frage, wie sich für die Beobachtungsperiode die CO₂-Menge, die dem



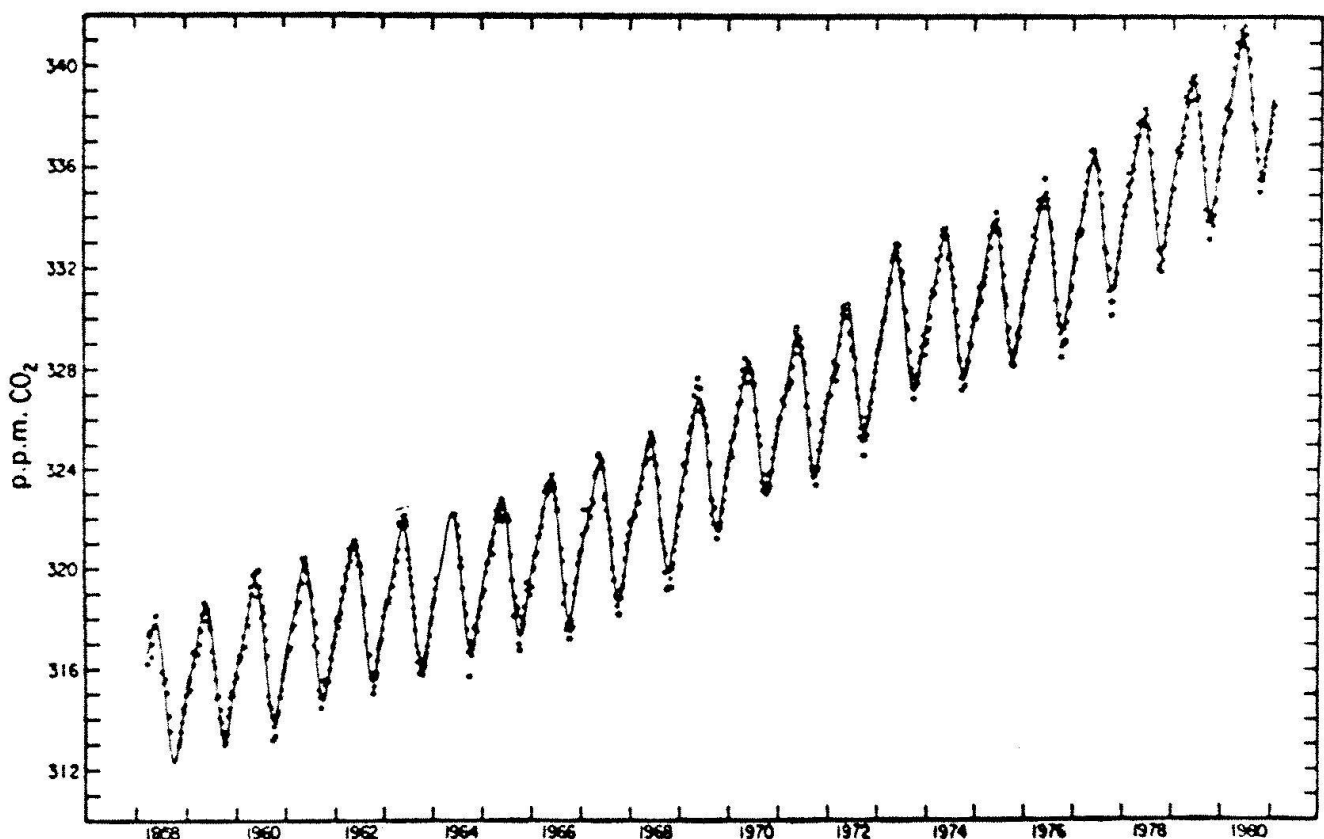
Figur 4: CO₂-Problem – die verschiedenen Aspekte und ihre Verknüpfungen.

Anstieg entspricht, mit derjenigen vergleicht, die durch Fossilenergienutzung produziert und in die Atmosphäre emittiert wurde.

Von 1958 bis 1978 stiegen die Jahresmittelwerte der CO₂-Konzentration von 316 ppm auf 336 ppm an. Die CO₂-Menge, die während dieser Periode durch die Verbrennung fossiler Energieträger produziert wurde, wird auf einen Atmosphären-Volumenanteil von 36 ppm geschätzt. Damit ergibt sich für den *Atmosphärenanteil F* (airborne fraction) des produzierten CO₂

$$F = \frac{\text{Konzentrationsanstieg}}{\text{Produktion}} = \frac{20 \text{ ppm}}{36 \text{ ppm}} = 0,56$$

Etwas mehr als die Hälfte des produzierten CO₂ scheint somit in der Atmosphäre zurückzubleiben, während sich der Rest in andere, mit der Atmosphäre austauschende Reservoirs, wie Ozean und Biosphäre verteilt. Dieser Wert des Atmosphärenanteils ist natürlich mit Unsicherheiten behaftet: die wirkliche fossile CO₂-Produktion kann von der geschätzten etwas abweichen und die CO₂-Basislinie könnte auch ohne menschliches Einwirken im untersuchten Zeit-



Figur 5: Konzentration des Kohlendioxids in der Luft an der Meßstation Mauna Loa auf Hawaii.

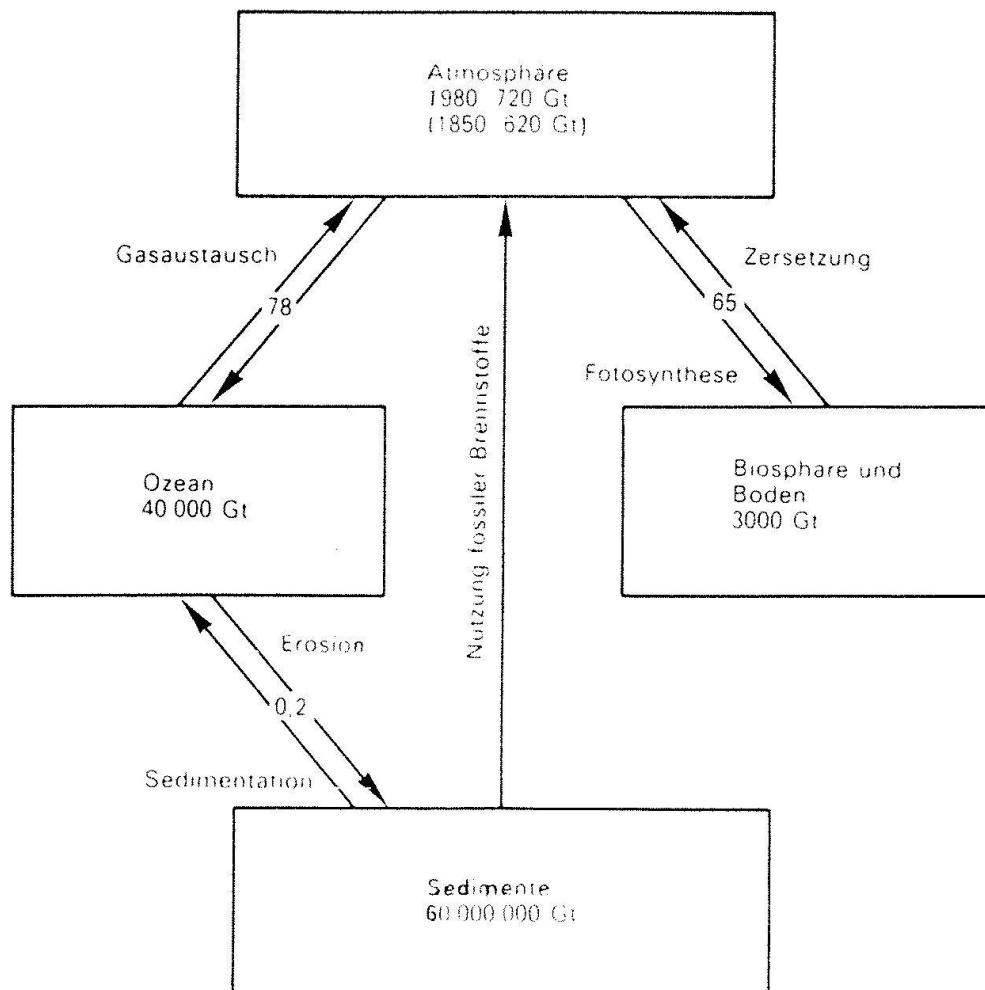
raum einer natürlichen Schwankung unterliegen.

Es ist auch zu beachten, dass die CO_2 -Emission als Folge der menschlichen Eingriffe in die Biosphäre sehr ungenau bekannt ist und daher bei dieser Bestimmung des Atmosphärenanteils nicht berücksichtigt wird. Auf diesen Aspekt wird später eingegangen. Bemerkenswert ist die Gesetzmässigkeit des CO_2 -Anstiegs. Eine erste Aussage kann auf Grund der folgenden einfachen Vorstellung gemacht werden: Wir nehmen an, das CO_2 der Atmosphäre tausche mit demjenigen in andern, nicht näher definierten Reservoiren aus und die Austauschflüsse seien proportional zu den jeweiligen CO_2 -Konzentrationen in den einzelnen Reservoiren. In die Atmosphäre werde eine exponentiell mit der Zeit zunehmende CO_2 -Menge emittiert. Es lässt sich zeigen, dass sich unter diesen Annahmen nach einiger Zeit konstante Anteile des emittierten CO_2 in den einzelnen Reservoiren einstellen.

Dies bedeutet, dass im Falle einer Fortsetzung des exponentiellen Anstiegs der CO_2 -Produktion mit einem einigermaßen konstanten Atmosphärenanteil gerechnet werden darf. Um jedoch die CO_2 -Verteilung auf die verschiedenen Reservoir für eine nicht exponentiell verlaufende Emission und den Einfluss eines allfälligen nichtlinearen Austauschverhaltens zu beurteilen, ist eine detailliertere Vorstellung der Dynamik des CO_2 im System Atmosphäre – Biosphäre – Ozean erforderlich.

Der CO_2 -Kreislauf

Das CO_2 der Atmosphäre tauscht, wie Figur 6 zeigt, mit dem anorganischen und organischen Kohlenstoff im Ozean und mit dem organischen Kohlenstoff der Biosphäre aus. Ein Teil des anthropogenen CO_2 fliesst somit in diese Reservoir ab. Langsam, und daher für die CO_2 -Aufnahme kaum ins Gewicht fallend, ist



Figur 6: Hauptsächlichste Reservoir und Flüsse des Systems. Reservoirgrößen in Gigatonnen C (10^9 t) und Flüsse in Gigatonnen C pro Jahr.

der Austausch mit den Sedimenten; hingegen bedeutet die Fossilenergienutzung die schnelle künstliche Rückführung organischen, in den Sedimenten gespeicherten Kohlenstoffs in die Atmosphäre. Um die CO_2 -Aufnahme durch den Ozean und die Biosphäre (infolge des erhöhten CO_2 -Angebots) abschätzen zu können, müssen Annahmen über die Grösse dieser Reservoirs und über die Austauschflüsse gemacht werden. Weiter muss abgeschätzt werden können, bis zu welcher Tiefe der Ozean für einen angenommenen zeitlichen Verlauf der CO_2 -Emission fossiles CO_2 aufnimmt. Die Grösse der Reservoirs Atmosphäre und Ozean ist gut bekannt, schwieriger ist die Abschätzung der Grösse der austauschenden Biosphäre und der Austauschflüsse. Auskunft über die Austauschflüsse und die Eindringtiefe in den Ozean erhält man durch Messungen des radioaktiven Kohlenstoffisotops ^{14}C an Proben aus Atmosphäre, Ozeanoberfläche und Tiefsee. Die CO_2 -Kreislaufmodelle geben ausser der ungestörten, stationären vorindustriellen ^{14}C -Verteilung auch die infolge der anthropogenen Eingriffe (Fossilenergienutzung und Kernwaffentests) gestörten Isotopenverhältnisse in guter Näherung wieder. Durch die CO_2 -Emission ändern sich neben der CO_2 -Menge auch die Isotopenverhältnisse $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ und $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, da sich das fossile CO_2 vom atmosphärischen in seiner Isotopenzusammen-

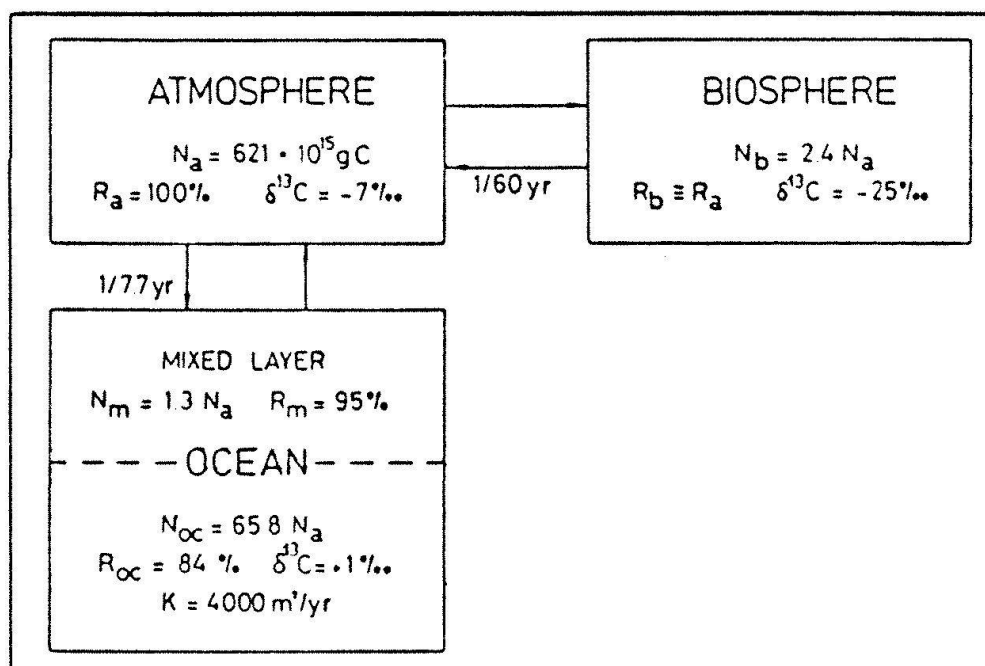
setzung unterscheidet. Bei den Kernwaffentests wurde hauptsächlich in den Sechzigerjahren in grossen Mengen ^{14}C produziert, was in der Atmosphäre vorübergehend zu einer Verdoppelung der ^{14}C -Konzentration führte.

Diese veränderten Isotopenverhältnisse werden in der Luft (CO_2) und in den Baumringen sowie im Wasser (HCO_3^-) und in den Korallen registriert. Ihre Messung ermöglicht die Prüfung und Verbesserung der CO_2 -Modelle.

Einige Experimente und Überlegungen werden im Folgenden etwas näher diskutiert. Im übrigen sei auf frühere Arbeiten (Oeschger et al., 1980; Oeschger, 1982) über die Erforschung der Dynamik des CO_2 -Kreislaufes verwiesen.

Die statische Aufnahmekapazität des CO_2 -Systems für anthropogenes CO_2

In die Atmosphäre emittiertes CO_2 wird nach genügend langer Zeit eine Gleichgewichtsverteilung in den verschiedenen austauschenden Reservoirs annehmen. Aus physikalisch-chemischen und biologischen Gründen wird der CO_2 -Überschuss nicht proportional zu den Kohlenstoffmengen in den verschiedenen Reservoirs verteilt sein. Für die folgenden Betrachtungen stützen wir uns auf die Modellvorstellung Figur 7 ab. Atmosphäre, Biosphäre



Figur 7: Kohlenstoffreservoirs und Austauschflüsse. N_i = Kohlenstoffmenge in den einzelnen Reservoirs, $\delta^{13}\text{C}$ = Promille-Abweichung des ^{13}C von einem Standardwert. R_i = Vorindustrielle ^{14}C -Aktivität in den einzelnen Reservoirs.

und Ozeanoberflächenschicht (Mixed Layer) sind als gut durchmischte Reservoirs simuliert, die Ausbreitung in den tiefen Ozean mit Hilfe eines Diffusionsansatzes. Vorerst interessieren uns die relativen Grössen der Reservoirs und die Bedingungen, die die Aufnahme von Überschuss- CO_2 bestimmen.

Ein CO_2 -Überschuss in der Atmosphäre führt zu einer entsprechenden Erhöhung des CO_2 -Partialdrucks in der Ozeanoberfläche, verknüpft mit einer Verschiebung der chemischen Gleichgewichte zwischen gelöstem CO_2 , HCO_3^- und CO_3^{2-} . Daraus resultiert eine Erhöhung des totalen CO_2 -Gehalts ($\text{CO}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$). Die relative Erhöhung des totalen gelösten CO_2 ist geringer als diejenige des CO_2 -Partialdrucks allein. Dies kann durch die Einführung eines Pufferfaktors berücksichtigt werden: Wenn das gelöste CO_2 um p Prozent ansteigt, beträgt der Anstieg des totalen CO_2 nur p/ε Prozent. Für durchschnittliches Ozeanoberflächenwasser beträgt ε ungefähr 10. ε steigt mit zunehmendem CO_2 -Druck an und dementsprechend nimmt die CO_2 -Aufnahmekapazität des Ozeans ab.

Beim Übergang Atmosphäre-Biosphäre gelten die folgenden Überlegungen. Die Wachstumsrate der Pflanzen hängt neben anderen Faktoren vom CO_2 -Angebot ab. Es ist wahrscheinlich, dass ein CO_2 -Anstieg zumindest für einen Teil der Pflanzen zu einem Anstieg der Wachstumsrate führt. Auf diese Weise können die Pflanzen einen Teil des überschüssigen CO_2 aufnehmen.

Die dynamische CO_2 -Aufnahmekapazität des CO_2 -Systems

Für die Abschätzung der dynamischen Aufnahmekapazität des CO_2 -Systems spielen Messungen des radioaktiven Kohlenstoffs ^{14}C (Halbwertszeit 5730 Jahre) eine wichtige Rolle. ^{14}C wird in der Atmosphäre laufend durch die Wechselwirkung der Partikel der kosmischen Strahlung hauptsächlich mit den Atomkernen des Stickstoffs produziert.

Das frisch produzierte ^{14}C oxidiert zu $^{14}\text{CO}_2$ und vermischt sich mit dem CO_2 der Atmosphäre. Ca. jedes 10^{12} te Kohlenstoffatom im CO_2 der Atmosphäre ist radioaktives ^{14}C . ^{14}C findet sich aber auch in dem im Wasser gelösten CO_2 , HCO_3^- und CO_3^{2-} , in den Pflanzen und Tieren oder etwa im CO_2 der im Polareis eingeschlossenen Luftblasen. Wird der Nachschub an ^{14}C -

haltigem CO_2 unterbrochen, etwa wenn ein Wasserpaket die an die Atmosphäre grenzende Wasseroberfläche verlässt, wenn eine Pflanze oder ein Tier stirbt, oder wenn sich Firn zu Eis umwandelt, so klingt die ^{14}C -Aktivität des Kohlenstoffs gemäss dem Gesetz des radioaktiven Zerfalls ab. Die in totem organischem Material, in Wasser- oder Eisproben noch vorhandene spezifische ^{14}C -Aktivität gestattet es, die Zeit zu bestimmen, die seit dem Abbruch des Austauschs mit der Atmosphäre verstrichen ist.

Auf diesem Prinzip beruht die Eichung des CO_2 -Austauschmodells (Figur 7). Vor den Nuklearwaffentests betrug die ^{14}C -Aktivität im CO_2 des Ozeanoberflächenwassers 95 % und gemittelt für das Tiefenwasser 84 % der atmosphärischen ^{14}C -Aktivität. Das Tiefenwasser besitzt somit ^{14}C -Alter im Bereich von 500–1000 Jahren. Aufgrund der ^{14}C -Information wurden für das hier diskutierte Modell die Koeffizienten für den Austausch Atmosphäre-Ozean und für die Konstante K der scheinbaren Diffusion bestimmt.

Wendet man das Modell an, um die CO_2 -Aufnahme durch den Ozean für den exponentiell ansteigenden fossilen CO_2 -Emissionsverlauf abzuschätzen, so ergibt sich, dass effektiv nur etwa 10 % des Ozeanvolumens am Prozess beteiligt sind. Für die CO_2 -Verdünnung steht somit ein Reservoir zur Verfügung, das etwa 60 % der Aufnahmekapazität der Atmosphäre besitzt. Wegen des direkten Austauschs zwischen Atmosphäre und Tiefenwasser um die Antarktis und einer möglichen Unterschätzung der Konstanten für die scheinbare Diffusion mag der wahre Wert für die Ozeanaufnahmekapazität für das fossile CO_2 bei etwa 80 % derjenigen der Atmosphäre liegen (Siegenthaler, 1982).

Mit diesem Wert berechnet sich ein Atmosphärenanteil von 55 % des emittierten CO_2 , was gut mit den Beobachtungen übereinstimmt und als Hinweis dafür betrachtet werden kann, dass sich zumindest für etwa die letzten 20 Jahre die CO_2 -Abgabe durch die Biosphäre, u. a. durch das Abholzen von Wäldern, und die erhöhte CO_2 -Aufnahme (CO_2 -Düngung) ungefähr kompensieren.

CO_2 -Modelltest auf Grund der ^{14}C -Fluktuationen in der Vergangenheit

^{14}C -Messungen an Baumringproben der letzten 8000 Jahre zeigen, dass das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis

im atmosphärischen CO_2 nicht konstant war. Zwei Typen von Variationen werden beobachtet: Eine Abnahme um ca. 10% von etwa 8000 Jahren bis 2000 Jahren vor heute und ihr überlagert sägezahnartige Schwankungen mit einer Amplitude von ca. 2% und einer Dauer von etwa 200 Jahren. Die kurzzeitigen ^{14}C -Schwankungen werden Schwankungen der ^{14}C -Produktion als Folge der Modulation der galaktischen Komponente der kosmischen Strahlung durch die vom solaren Plasma mitgeführten Magnetfelder zugeschrieben, wie sie seit etwa 30 Jahren direkt mit Hilfe von Neutronenmonitoren beobachtet werden.

Die Frage nach der Ursache der kurzzeitigen ^{14}C -Schwankungen wurde kürzlich (Beer et al., 1983) eindeutig geklärt. Neben ^{14}C produziert die kosmische Strahlung weitere langlebige Radioisotope, die in den natürlichen Archiven gespeichert sind. Ein wichtiges Beispiel ist das ^{10}Be (Halbwertszeit $1,6 \cdot 10^6$ Jahre). In erster Näherung darf erwartet werden, dass ^{10}Be die gleichen Produktionsschwankungen zeigt wie ^{14}C . Anders ist jedoch sein geochemisches Verhalten. Nach der Produktion lagert es sich an Aerosolpartikeln an und erreicht mit dem Niederschlag die Erdoberfläche. Die Produktion von ^{10}Be findet sich mit ihren Fluktuationen also aufgezeichnet im natürlichen Archiv Eis. Systematische ^{10}Be -Messungen an Eisproben, ermöglicht durch die neu entwickelte Beschleunigermassenspektromie, gestatten es, nicht nur für die letzten sieben 11-Jahreszyklen der Sonnenaktivität die erwarteten ^{10}Be -Depositions- und damit Produktionsschwankungen zu beobachten, sondern auch die aufgrund der ^{14}C -Schwankungen erwarteten Maxima der Radioisotopenproduktion während der Perioden der «ruhigen Sonne», wie z. B. während dem sogenannten Maunder-Minimum der Sonnenaktivität von 1640–1710 n. Chr.

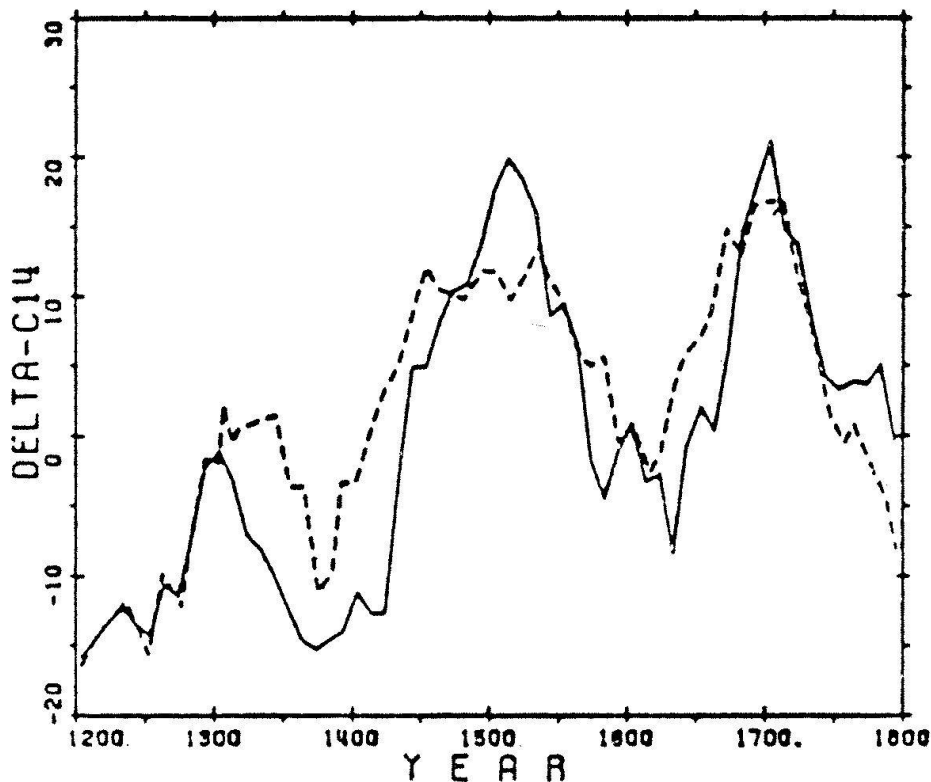
Betrachten wir nun diese Gegebenheiten aus der Optik der Entwicklung und Prüfung von Umweltmodellen. Im Archiv Eis finden wir relativ unverfälscht und mit guter Auflösung die Schwankungen der Produktion von Radioisotopen in der Atmosphäre durch die kosmische Strahlung aufgezeichnet. In erster Näherung nehmen wir an, dass die relativen ^{10}Be -Schwankungen mit den relativen ^{14}C -Schwankungen übereinstimmen. Wir kennen somit den zeitlichen Verlauf der Störung einer Grösse (^{14}C -Produktion) im Atmosphärenreservoir des CO_2 -Systems. Die Störung wird vom CO_2 -System ver-

arbeitet. Als Antwort stellen sich Veränderungen der $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisse in den verschiedenen Reservoiren ein. Die Schwankungen des $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses in der Atmosphäre sind in den Baumringen, diejenigen im CO_2 der Ozeanoberflächenschicht in den Korallen aufgezeichnet. Wir besitzen somit die Möglichkeit zu prüfen, ob unser CO_2 -Modell in der Lage ist, die Reaktion des CO_2 -Systems auf Störungen mit charakteristischen Zeiten von etwa 100 Jahren mit befriedigender Genauigkeit wiederzugeben. Dieser Modelltest ist in Figur 8 dargestellt. Die ^{10}Be -Konzentration im Eisbohrkern von Dye 3, Südgrönland, zeigt starke Variationen. Ausgeprägte Konzentrationsmaxima treten in den Bereichen 1450–1550 A.D. und 1640–1710 A.D. auf. Die relativen ^{10}Be -Schwankungen werden nun als Modell-Input für relative ^{14}C -Produktionsschwankungen benützt. Die so berechneten relativen Schwankungen des atmosphärischen $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses sind als ausgezogene Kurve gezeigt. Gestrichelt sind die in Baumringen gemessenen ^{14}C -Schwankungen aufgetragen. Innerhalb der Messgenauigkeit stimmen die so berechneten ^{14}C -Schwankungen mit den beobachteten überein: Das Modell liefert die notwendige Dämpfung um ca. einen Faktor 25, wie auch die Phasenverschiebung um etwa 20 Jahre.

Diese Feststellung führt zur erstaunlichen Erkenntnis, dass sich unter günstigen Umständen Umweltvorgänge durch relativ einfache Modelle simulieren lassen, auch wenn sie auf komplizierten physikalischen, chemischen und biologischen Vorgängen beruhen.

Welches war der vorindustrielle Wert der atmosphärischen CO_2 -Konzentration?

Aufgrund des bekannten Verlaufs der CO_2 -Injektion in die Atmosphäre durch Fossilenergienutzung lässt sich mit Hilfe des CO_2 -Modells durch Rückextrapolation auf die Mitte des letzten Jahrhunderts ein «vorindustrieller Wert» von 290 bis 300 ppm ermitteln. Gibt es experimentelle Möglichkeiten zu überprüfen, ob damals die atmosphärische CO_2 -Konzentration tatsächlich einen Wert in diesem Bereich besass? Frühere direkte, vor 1956 durchgeführte Messungen sind aus verschiedenen Gründen mit grossen Fragezeichen behaftet, und man möchte mit der heutigen Messtechnik Luftproben aus vergangenen Zeiten analysieren. Solche



Figur 8: $\Delta^{14}\text{C}$ in der Atmosphäre. Gestrichelte Linie: Baumring-Messungen (Stuiver, 1980); ausgezogene Linie: gleich wie gestrichelte Linie bis 1310, nach 1310 Modellrechnung basierend auf ^{10}Be -Daten.

Proben stehen in den feinen Hohlräumen des natürlichen Eises zur Verfügung. Mehrmals haben Wissenschaftler versucht, die Geschichte des atmosphärischen CO_2 -Gehalts aufgrund von Messungen an Eisproben zu rekonstruieren. Entscheidende Fortschritte waren aber erst in den letzten Jahren möglich, da durch Tiefbohrungen in Grönland und der Antarktis Eisproben, welche die letzten 50 000–100 000 Jahre umfassen, erschlossen und neue analytische Methoden entwickelt wurden.

Laboratorien in Bern und Grenoble sind heute in der Lage, den CO_2 -Gehalt der in Eisproben eingeschlossenen Luft auf etwa ± 10 ppm genau zu bestimmen. Von einer grossen Zahl von Proben aus Grönland und der Antarktis wurden, kurz zusammengefasst, die folgenden Resultate erhalten:

- Der vorindustrielle CO_2 -Gehalt (Mitte des letzten Jahrhunderts) lag wahrscheinlich im Bereich von 260–280 ppm.
- Während der letzten 1000 Jahre traten keine CO_2 -Schwankungen auf, die sich mit dem heute beobachteten Anstieg vergleichen lassen.

Damit wird die Annahme, dass der CO_2 -Anstieg anthropogenen Ursprungs ist, bestärkt.

Der Hinweis auf einen möglicherweise deutlich niedrigeren vorindustriellen Wert (260–280 ppm) als der durch Rückextrapolation des fossilen Inputs abgeschätzte (295 ppm) stellt weniger das Verständnis des Verhaltens des CO_2 -Systems in Frage, als dass er die Vermutung nahelegt, neben dem fossilen Input in den letzten hundert Jahren seien auch durch die Rodung riesiger Wälder, z. B. auf dem nordamerikanischen Kontinent, gewaltige CO_2 -Mengen an die Atmosphäre abgegeben worden. Die Modellvorstellungen würden durch die Annahme einer biogenen CO_2 -Emission von der Grössenordnung der fossilen und mit einem zeitlichen Schwerpunkt um die Jahrhundertwende befriedigt. Leider gestatten es die CO_2 -Messungen an Eisproben nicht, die CO_2 -Konzentration zu einem festen Zeitpunkt zu ermitteln, auch wenn eine beinahe auf das Jahr genaue Datierung des Eises möglich ist. Der Gaseinschluss erfolgt während eines relativ langen Zeitintervalls (50–100 Jahre), und benachbarte Luftblasen können zu deutlich verschiedenen Zeiten eingeschlossen worden sein. Dadurch wird die Rekonstruktion des CO_2 -Verlaufs von 1850 bis zum Einsetzen der präzisen modernen Messungen (ca. 1956) erschwert. Geeignete Proben soll-

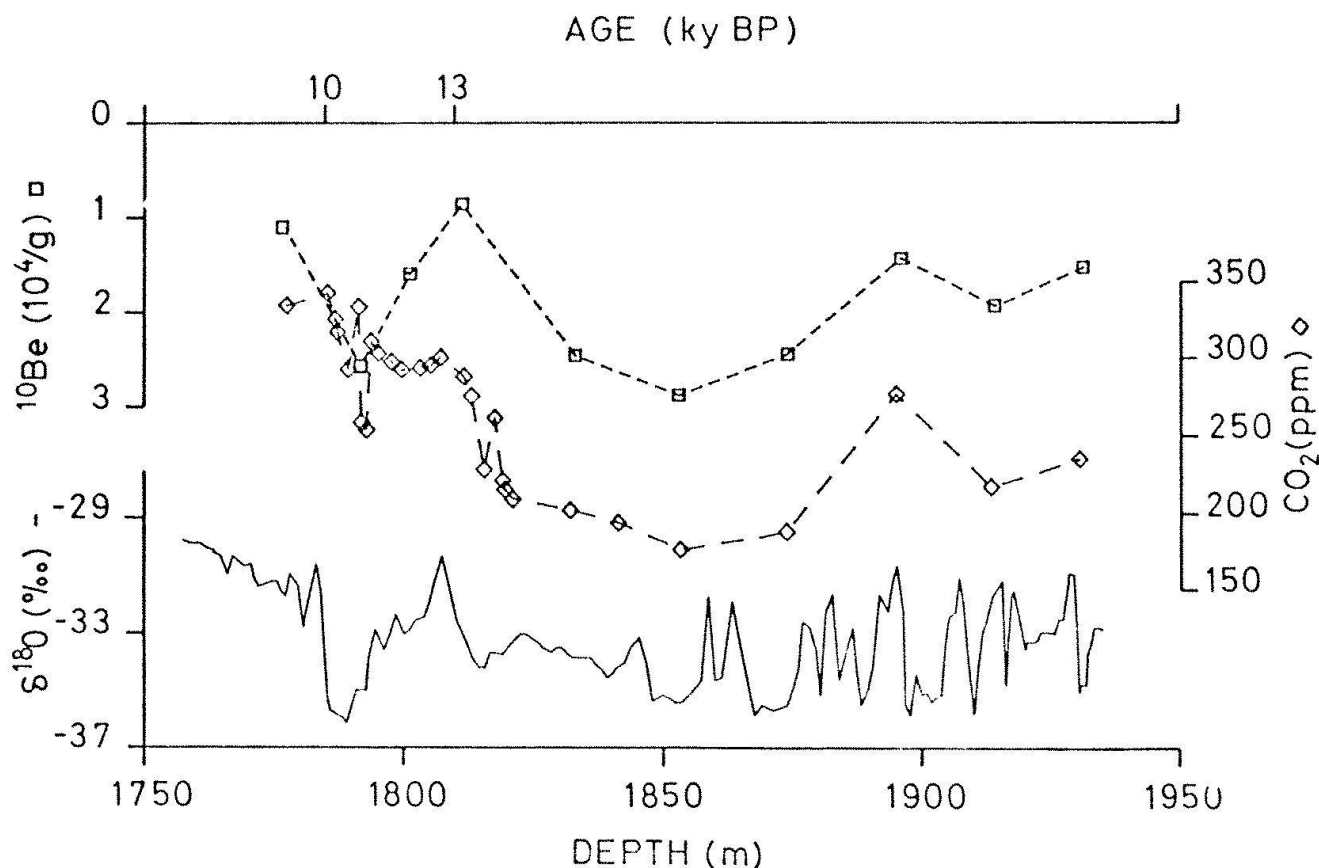
ten jedoch zumindest eine grobe Abschätzung ermöglichen. Die Kenntnis des Bereichs des vorindustriellen CO_2 -Pegels und des Verlaufs des CO_2 -Anstiegs ist von grundlegender Bedeutung auch für die Frage, ob sich ein durch den CO_2 -Anstieg induzierter globaler Temperaturanstieg schon heute nachweisen lässt.

Abschliessend gilt die Aussage, dass der CO_2 -Pegel seit Mitte des letzten Jahrhunderts wahrscheinlich etwa um einen Faktor 1,2 bis 1,3 von ca. 265 ppm auf 340 ppm angestiegen ist. Dass der Anstieg anthropogen ist, darf als praktisch gesichert bezeichnet werden.

Gab es auch natürliche CO_2 -Schwankungen?

Die Möglichkeit, frühere atmosphärische CO_2 -Konzentrationen auf Grund von Eisbohrkernmessungen zu rekonstruieren, bleibt natürlich nicht auf die letzten 1000 Jahre beschränkt. Es interessiert uns vor allem die Frage, ob drastische Klimaschwankungen wie z. B. Übergänge zwischen Eiszeiten und Zwischeneiszeiten mit Änderungen des atmosphärischen CO_2 -Gehalts verknüpft waren und ob somit Anzeichen dafür

vorliegen, dass CO_2 -Schwankungen in der Vergangenheit eine Rolle im Klimageschehen gespielt haben. In Bern und Grenoble wurden Eisproben aus der letzten Eiszeit mit Proben aus der Nacheiszeit bezüglich CO_2 -Gehalt der eingeschlossenen Luft verglichen. Sowohl die grönländischen wie die antarktischen Proben zeigen, dass am Ende der Eiszeit die CO_2 -Konzentration von Werten im Bereich 180–200 ppm auf nacheiszeitliche Werte im Bereich 260–300 ppm angestiegen ist. Figur 9 zeigt die Werte für die CO_2 -Konzentration zusammen mit den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten. Tiefe $\delta^{18}\text{O}$ -Werte repräsentieren Kaltphasen, höhere Werte Warmphasen. Der rapide Anstieg von $\delta^{18}\text{O}$ von -36‰ auf -30‰ in einer Tiefe von 1785 m entspricht dem Pleistozän-Holozän-Übergang vor ca. 10 000 Jahren, genauer ausgedrückt, dem Übergang von der Jüngeren Dryas-Kaltphase in das deutlich wärmere Präboreal. Der Anstieg der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte bei 1815 m Tiefe weist auf eine erste Erwärmung am Ende der letzten Eiszeit hin und entspricht wahrscheinlich dem Übergang von der ältesten Dryas-Kaltphase in das relativ warme Bölling, der aufgrund von ^{14}C -Messungen an Torfmooren vor etwa 13 000 Jahren er-



Figur 9: CO_2 -Konzentration und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte gemessen am Bohrkern von Dye 3 (Südgrönland) 1981.

folgte (Oeschger et al., 1984). Dieser unerwartete Befund löst folgende Fragen aus:

- Wie ist eigentlich der atmosphärische CO_2 -Gehalt bestimmt? Wie kann es zu Änderungen um einen Faktor 1,5 in einigen Jahrzehnten bis wenigen Jahrhunderten kommen?
- Ist der atmosphärische CO_2 -Gehalt ein wesentlicher Faktor bei drastischen Klimaveränderungen wie Übergängen zwischen Eiszeiten und Zwischeneiszeiten?

Wichtig im Zusammenhang mit der ersten Frage ist die Feststellung, dass die Atmosphäre nur mit der jeweiligen Oberflächenschicht der Meere bezüglich Gasaustausch im Gleichgewicht ist. Die CO_2 -Konzentration der Atmosphäre entspricht deshalb dem Mittel des CO_2 -Partialdruckes im Ozeanoberflächenwasser, welcher seinerseits durch den totalen CO_2 -Gehalt des Wassers und dessen Alkalinität bestimmt ist. Der CO_2 -Partialdruck von tiefem Ozeanwasser entspricht etwa 1000 ppm. In Wasser, welches aus den Ozeantiefen die Oberfläche erreicht, bilden sich dank dem hohen Nährstoffgehalt Organismen, die in tiefere Schichten sinken. Durch diesen Prozess verändert sich die chemische Zusammensetzung des Oberflächenwassers. So stellen sich CO_2 -Partialdrücke ein, die angenähert der jeweiligen CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre entsprechen. Würden alle Nährstoffe in der Oberflächenschicht, im wesentlichen Phosphate und Nitrate, durch Organismen konsumiert, entspräche der mittlere CO_2 -Partialdruck einem atmosphärischen CO_2 -Gehalt von etwa 200 ppm. Je nach dem Sättigungsgrad der biosphärischen Aktivität in der Ozeanoberfläche liegt somit ein relativ grosser Spielraum für den mittleren CO_2 -Partialdruck und damit die atmosphärische CO_2 -Konzentration vor. Änderungen der Ozeanzirkulation, verknüpft mit unterschiedlicher Sättigung der biosphärischen Aktivität, wären somit eine mögliche Erklärung für rasche Änderungen der atmosphärischen CO_2 -Konzentration.

Im Zusammenhang mit der zweiten Frage interessiert, dass nach Modellabschätzungen eine CO_2 -Konzentrationserhöhung um einen Faktor 1,5 einer globalen Temperaturerhöhung von etwa $1,5^\circ\text{C}$ entspricht. Über den eisbedeckten Flächen wäre sogar noch eine stärkere Erwärmung zu erwarten. Wegen der relativ raschen Atmosphärendurchmischung ist die CO_2 -Erhöhung ein globales Phänomen und könnte daher einen wichtigen Kopplungsfaktor zwischen den

Hemisphären bei den Vorgängen darstellen, welche die letzte Eiszeit beendeten.

Diese Bemerkungen bezüglich der Bedeutung der beobachteten unerwarteten Änderung des atmosphärischen CO_2 -Gehaltes besitzen noch einen stark spekulativen Charakter. Sie nehmen jedoch einen wichtigen Raum in der CO_2 - und Klima-Diskussion ein und sind ein Beispiel für die Bedeutung der Studien der natürlichen Archive und Umweltvorgänge.

Das Klimasystem

Klima und Klimamechanismen

Unter dem Begriff Klima verstehen wir den über mehrere Jahre gewonnenen Gesamteindruck der Wetterabläufe. Eine objektive Charakterisierung ist schwierig. Wichtige Parameter sind Durchschnittswerte der Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Sonnenscheindauer und Niederschlagsrate über mehrere Jahre, aber auch das Ausmass und die Häufigkeit extremer Bedingungen, wie Perioden grosser Trockenheit oder Überschwemmungen. Eine grosse Zahl von Faktoren und Prozessen mit verschiedener Ausdehnung und Dauer bestimmen das Klima, und es ist unmöglich, das komplexe System in einer auch nur annähernd vollständigen Art zu simulieren. Die Klimatologen versuchen daher, die wichtigsten Mechanismen ausfindig zu machen und in Modellen unterschiedlicher Komplexität zu berücksichtigen.

Die wesentlichen das Klima der Erde beeinflussenden Faktoren lassen sich anhand eines Diagramms, das die Energieflüsse zwischen Weltraum, Atmosphäre und Erdoberfläche darstellt, veranschaulichen (Figur 10).

Der wichtigste die Erdtemperatur bestimmende Faktor ist die Sonnenstrahlung, die die Erdoberfläche aufheizt. Ohne Abstrahlung von Energie würde die Erdtemperatur ständig zunehmen, doch emittieren die Erdoberfläche und die Atmosphäre Wärmestrahlung mit einer zur vierten Potenz der absoluten Temperatur proportionalen Leistung. Daher erwärmt sich die Erde nur bis zu einer Temperatur, für die, gemittelt über die Zeit, die absorbierte Sonnenenergie durch die emittierte Wärmestrahlung kompensiert wird. Wie aus Figur 10 ersichtlich, werden 30% des einfallenden Sonnenlichts direkt in den Weltraum reflektiert, während 70% in der Atmosphäre und auf der Erdoberfläche

absorbiert werden. Im Strahlungsgleichgewicht muss die Erde somit Wärmestrahlung emittieren, die der Leistung dieser 70% des einfallenden Sonnenlichts entspricht. Aufgrund des Gleichgewichts kann mit dem Gesetz von Stefan-Boltzmann eine effektive Strahlungstemperatur der Erde berechnet werden. Sie beträgt 255°K oder -18°C.

Die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche liegt jedoch mit 15°C deutlich höher. Die Differenz von 33°C erklärt sich dadurch, dass die den Weltraum erreichende Wärmestrahlung nur zu einem Siebtel direkt von der Oberfläche stammt; der weitaus grösste Teil (sechs Siebtel) wird erst von höheren und damit auch kälteren Atmosphärenschichten abgestrahlt. Im Gegensatz zum Sonnenlicht, das die wolkenfreie Atmosphäre mit nur geringen Verlusten durchdringt, wird die von der Erdoberfläche emittierte Wärmestrahlung durch Wasserdampf, CO₂, O₃ und andere Spurengase stark absorbiert. Dadurch werden die unteren Atmosphärenschichten erwärmt und geben nun ihrerseits

Wärmestrahlung, zum Teil zurück auf die Erdoberfläche, ab. Zusätzlich zur Sonnenstrahlung empfängt so die Erdoberfläche in erheblichem Masse Wärmestrahlung. Daher liegt ihre Temperatur deutlich über der Strahlungstemperatur. Dieses Phänomen der Durchsichtigkeit der Atmosphäre für die Sonnenstrahlung, jedoch teilweisen Undurchsichtigkeit für die Wärmestrahlung, bezeichnet man oft als Treibhauseffekt.

Diese Zusammenhänge werden durch Figur 10 veranschaulicht: Auf die Erdoberfläche fällt sowohl Sonnenlicht als auch Wärmestrahlung ein. Der Anteil des Sonnenlichts beträgt 50 Einheiten, derjenige der von der Atmosphäre auf die Erdoberfläche emittierten Wärmestrahlung 95 Einheiten der auf die Erde einfallenden Sonnenleistung von 100 Einheiten. Insgesamt werden somit auf der Erdoberfläche 45 Energieeinheiten mehr pro Zeiteinheit umgesetzt als die Sonne auf die Erde einstrahlt. 30 Einheiten gibt die Erdoberfläche als fühlbare und latente Wärme durch Konvektion ab, 115 Einheiten

Erdoberfläche Atmosphäre Weltraum

Einfallende Sonnenstrahlung

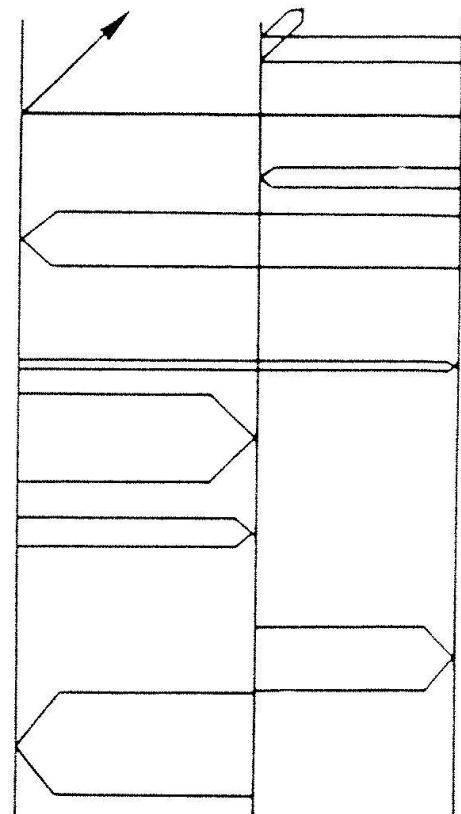
| | |
|--------------------------------|----|
| in der Atmosphäre reflektiert | 26 |
| auf der Oberfläche reflektiert | 4 |
| in der Atmosphäre absorbiert | 20 |
| auf der Oberfläche absorbiert | 50 |

Energieflüsse von der Erdoberfläche

| | |
|--------------------------------------|-----|
| direkt in den Weltraum emittierte IR | 10 |
| in der Atmosphäre absorbierte IR | 105 |
| Konvektion | 30 |

von der Atmosphäre emittierte IR

| | |
|------------|----|
| nach oben | 60 |
| nach unten | 95 |



Figur 10: Die wichtigsten Energieflüsse zwischen Weltraum, Atmosphäre und Erdoberfläche. Im Gleichgewicht kompensieren sich die Zu- und die Abflüsse. Die einfallende Sonnenstrahlungsleistung in den obersten Atmosphärenschichten wird auf 100 Einheiten (units) normiert. IR bedeutet Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung).

durch Wärmestrahlung. Nach dem Stefan-Boltzmann'schen Gesetz für die Strahlungsleistung einer beinahe schwarzen Oberfläche entspricht dies der Strahlungsleistung bei einer Temperatur von 15°C (288°K).

Wärmestrahlung im Wellenlängenbereich von 9 bis $15\text{ }\mu\text{m}$ wird von Wasserdampf nicht, von CO_2 , O_3 und anderen Spurengasen nur unvollständig absorbiert. Ein atmosphärischer CO_2 -Anstieg aber würde die Durchlässigkeit in diesem Spektralbereich reduzieren, damit den Treibhauseffekt verstärken und so zu höheren Oberflächentemperaturen führen. Andererseits zeigen Abschätzungen, dass der Treibhauseffekt ohne CO_2 um etwa 12%, entsprechend 4°C , geringer wäre. Wegen der tieferen Temperatur würde sich auch ein niedrigerer Wasserdampfanteil in der Atmosphäre einstellen. Es käme zu einer positiven Rückkoppelung, welche die Abkühlung um etwa einen Faktor 2 (8°C) verstärken würde.

Klimamodelle

Die einfachsten Modelle beschreiben die Erde als eine isotherme Kugel, bedeckt von einer Atmosphäre. Etwas komplexere berücksichtigen die Breiten- und Höhenabhängigkeit der Temperatur, die Schnee- und Eisbedeckung und den Wärmetransport durch die Atmosphären- und die Ozeanzirkulation. Mit den höchst entwickelten Modellen, den General Circulation Models (GCM), werden für über die Erde verteilte Gitterpunkte wichtige Klimafaktoren, wie Monatsmittelwerte der Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlagsraten oder Schneebedeckung, berechnet. Sie berücksichtigen die Verteilung der Kontinente und der Meere, sowie die wichtigsten physikalischen Gegebenheiten der Erdoberfläche.

Modelle des Wärmestrahlungsdurchgangs durch die Atmosphäre ergeben, dass für eine Verdoppelung der CO_2 -Konzentration im globalen Mittel der nach unten gerichtete Wärmestrahlungsfluss um 4 Wm^{-2} (Augustsson und Ramanathan 1977) ansteigt. Auf die ganze Erde bezogen entspricht dies einem zusätzlichen Energiefluss auf der Erdoberfläche von $2000 \times 10^{12}\text{ W}$. Diese indirekte Aufheizung als Folge des Treibhauseffekts kann mit der direkten Erwärmung als Folge der Energienutzung, die heute etwa $8 \times 10^{12}\text{ W}$ beträgt, verglichen werden. Im globalen Maßstab ist somit die di-

rekte Erwärmung viel geringer als die durch eine Verdoppelung der CO_2 -Konzentration bewirkte.

Um den Temperaturanstieg als Folge erhöhter atmosphärischer CO_2 -Konzentrationen abschätzen zu können, muss man, neben der durch das CO_2 veränderten Strahlungsbilanz, auch eine Reihe von Rückkoppelungsmechanismen (Feedbacks) berücksichtigen. Ein starker positiver Feedback ist der Anstieg der absoluten Luftfeuchtigkeit, der mit der Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Atmosphärenschichten verknüpft ist. Die kombinierte Temperaturerhöhung für höhere Konzentrationen von CO_2 und Wasserdampf ist das zwei- bis dreifache derjenigen von CO_2 allein. Ein anderer positiver Feedbackeffekt besteht in der Änderung des Reflexionsvermögens der Erdoberfläche (Albedo) durch die Abnahme der Schnee- und Eisbedeckung in den Polargebieten bei einer Erwärmung. Dieser positive Feedback erhöht die globale Erwärmung um einen Faktor 1,2–1,4.

Die Wirkung der Wolken ist schwer zu modellieren. Einerseits führt eine erhöhte Wolkenbedeckung zu einer erhöhten Albedo, aber andererseits auch zu einer Erhöhung der Absorption und Rückstrahlung der von der Erde emittierten Wärmestrahlung. Die beiden Effekte kompensieren sich teilweise. Auch ist heute noch nicht bekannt, ob eine höhere Erdtemperatur zu einer Veränderung der Wolkenbedeckung führen wird.

Berechnungen mit Klimamodellen verschiedener Komplexität weisen für eine CO_2 -Verdoppelung auf einen mittleren Anstieg der Erdtemperatur um $1,5$ bis $4,5^{\circ}\text{C}$ (WMO 1979) hin. Dabei wird angenommen, dass sich die Energieflüsse auf der Erdoberfläche gegenseitig aufheben und somit ein thermisches Gleichgewicht herrscht.

Einfache Klimamodelle liefern Abschätzungen der Grössenordnung der durch den CO_2 -Anstieg zu erwartenden Veränderungen und gestatten es, spezifische Einflüsse und Prozesse zu untersuchen. Zur Abschätzung der für die verschiedenen Gebiete der Erdoberfläche zu erwartenden neuen klimatischen Bedingungen werden General Circulation Models entwickelt. Figur 11 zeigt den Anstieg der mittleren Temperaturen für eine Vervierfachung des atmosphärischen CO_2 -Gehalts (Manabe und Stouffer, 1980) (die Temperaturerhöhungen für eine Verdoppelung sind etwa halb so gross wie für eine

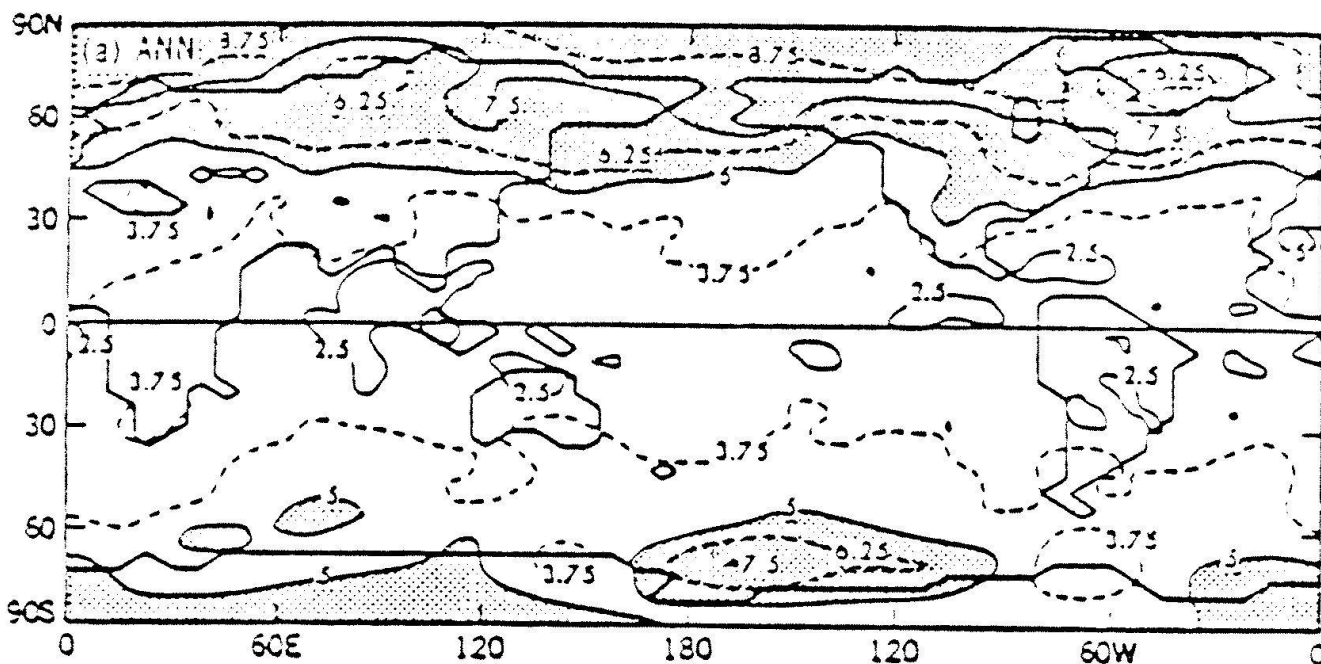
Vervierfachung). In den äquatorialen Gebieten beträgt die Erwärmung etwa 3°C und nimmt mit höherer Breite zu. Für 45° Grad nördliche Breite beträgt sie etwa 5°C . Die Verstärkung in den Polargebieten wird teilweise durch den erwähnten Schnee-Albedo-Feedback verursacht. In grossen Breiten ergibt das Modell zudem eine ausgeprägte saisonale Asymmetrie mit starken Temperaturveränderungen hauptsächlich im Winter.

Die Temperatur ist nur einer der interessierenden Klimaparameter; Veränderungen der Niederschlags- und Verdunstungsrate sind ähnlich wichtig. Die Resultate von Manabe und Stouffer weisen auf erhöhte Niederschläge in hohen Breiten hin, doch sind die Probleme bei der Simulation des Wasserkreislaufes noch gross.

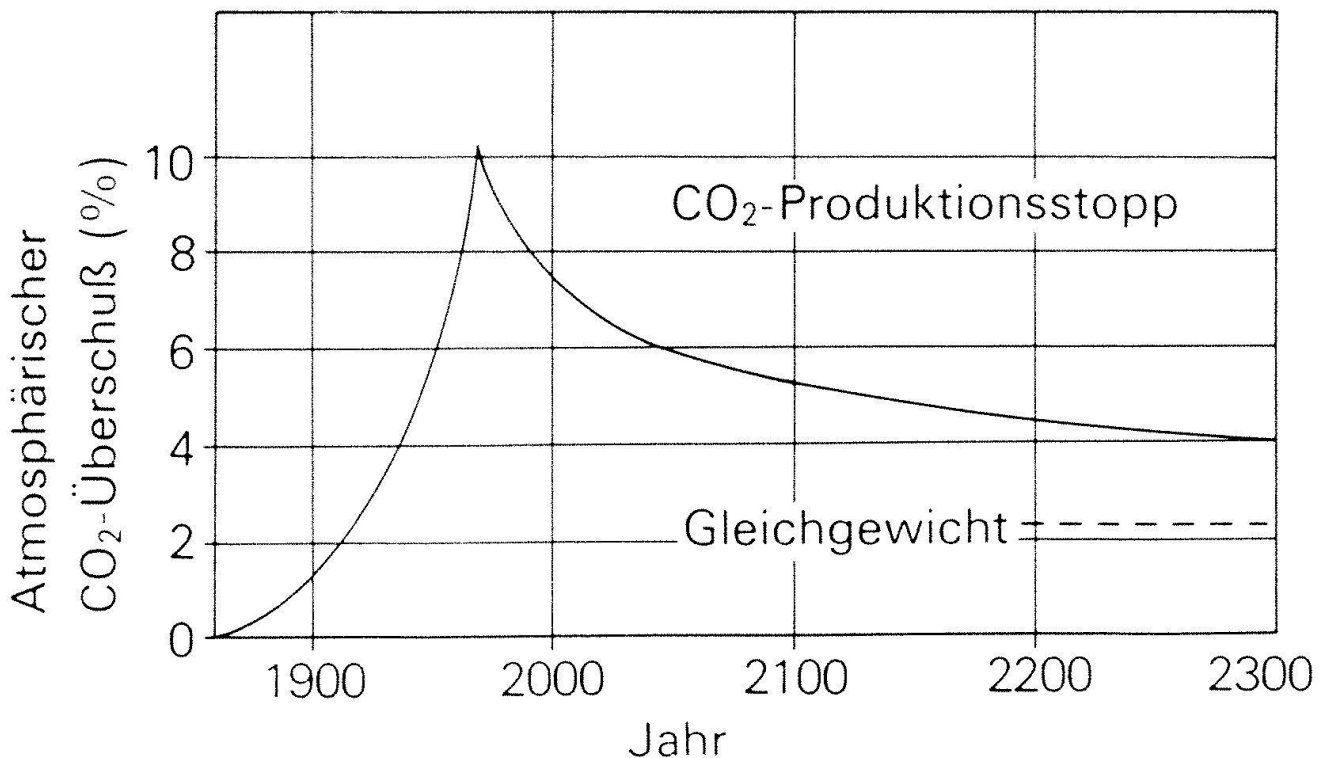
Der Einfluss der Wärmekapazität des Ozeans

Der Ozean spielt ähnlich, wie er an der Aufnahme von fossilem CO_2 beteiligt ist, auch eine Rolle beim Einspielen neuer Strahlungsverhältnisse auf der Erdoberfläche. Die Klimamodelle, die bisher diskutiert wurden, setzen voraus, dass sich auf der Oberfläche neue Wärmestrahlungsgleichgewichte eingestellt haben. In Wirk-

lichkeit kann sich der Ozean wegen seiner grossen Wärmekapazität nicht sofort an die neuen Strahlungseigenschaften der Atmosphäre anpassen. Er muss zuerst mehr Wärmestrahlung aufnehmen als abgeben, um sich auf eine Temperatur zu erwärmen, bei der er soviel Strahlung emittiert, wie es das neue Gleichgewicht erfordert. Für einen exponentiellen CO_2 -Anstieg, der einem Wachstum von 4–5% pro Jahr entspricht, ergibt sich eine Verzögerung des Temperaturanstieges um 15–20 Jahre oder anders ausgedrückt, beträgt die jeweilige Temperaturerhöhung nur die Hälfte der den Gleichgewichtsverhältnissen entsprechenden. Auch ist zu erwarten, dass die maximale CO_2 -bedingte Temperaturexkursion durch die thermische Trägheit des Ozeans auf etwa 70–80% reduziert wird. Der Wärmetransport durch Ozeanströmungen ist, wie es der Einfluss des Golfstroms auf Europa zeigt, eine wichtige Komponente der Klimaverteilung auf der Erdoberfläche. Um die möglichen Auswirkungen des CO_2 -Anstiegs zu untersuchen, werden, ähnlich wie für die Atmosphäre, General Circulation Ocean Models entwickelt. Die Verhältnisse sind beim Ozean jedoch noch komplexer und Aussagen über regionale Veränderungen der Ozeanströmungen noch in weiter Ferne.



Figur 11: Geographische Verteilung der Zunahme der Oberflächentemperatur für eine Vervierfachung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration, berechnet mit einem General Circulation Model. Die ausgezogenen Linien markieren die Kontinente. Eine Verstärkung der Erwärmung in hohen Breiten und eine Nord-Süd-Asymmetrie sind erkennbar (Manabe und Stouffer 1980).



Figur 12: Modellvorhersage der atmosphärischen CO₂-Konzentration für einen hypothetischen Produktionsstopp im Jahr 1970.

Prognosen der zukünftigen Entwicklung der atmosphärischen CO₂-Konzentration und der Erdtemperatur

Aufgrund der gewonnenen Kenntnisse über den Kohlenstoffkreislauf können wir Aussagen über den Einfluss von CO₂-Emissionen auf die atmosphärische CO₂-Konzentration machen.

CO₂-Produktionsstopp

Zuerst interessiert uns die Frage, ob und in welchem Zeitraum das zusätzliche CO₂ nach einem Produktionsstopp verschwinden würde. Dies wird in Figur 12 veranschaulicht, in der der CO₂-Abfall nach einem hypothetischen Produktionsstopp im Jahr 1970 gezeigt wird, simuliert mit einem typischen CO₂-Kreislaufmodell (Oeschger et al., 1975). Der Abfall erfolgt anfänglich relativ rasch, in 30 Jahren auf 70% und in etwa 100 Jahren auf 50% des maximalen Konzentrationsanstiegs: Der neue Gleichgewichtswert, der etwa 25% über dem früheren liegt, wird erst nach vielen hundert Jahren angenähert erreicht. Ein weiteres Absinken durch die Wechselwirkung mit den Sedimenten würde sich erst nach Jahrtausenden bemerkbar ma-

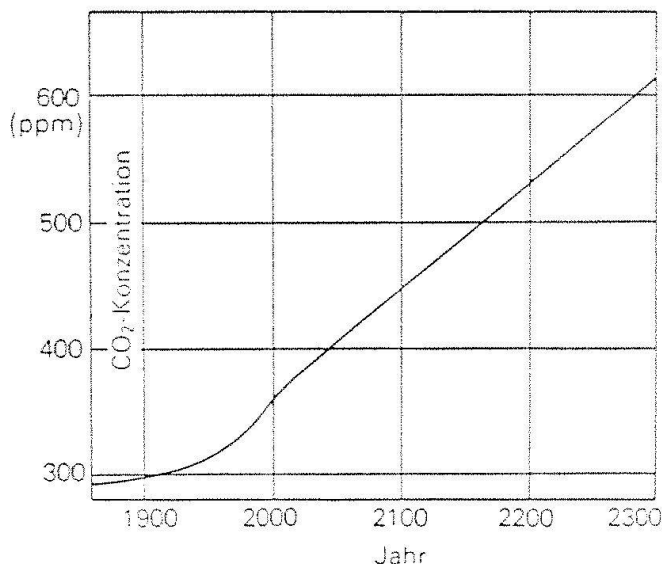
chen. Im Gegensatz zur Staubbelastung der Atmosphäre, bei der kurze Zeit nach einem Produktionsstopp die ursprüngliche Situation wieder erreicht würde, handelt es sich somit bei der CO₂-Belastung um ein praktisch irreversibles Phänomen.

Konstante CO₂-Produktion

Als nächstes nehmen wir eine konstante CO₂-Produktion, wieder mit Beginn im Jahr 1970, an. Auf Grund einer oberflächlichen Betrachtung würde man annehmen, dass sich ein neues Gleichgewicht einstellt, bei dem sich Produktion und Abfluss gerade kompensieren. Figur 13 zeigt nun aber, dass auch in diesem Fall der CO₂-Pegel weiter ansteigt und rund 50% der integrierten Emission in der Atmosphäre zurückbleibt.

Prognosen zukünftiger atmosphärischer CO₂-Konzentrationen und kombinierter Erdtemperaturen

CO₂-Prognosen erfordern Schätzungen der zukünftigen CO₂-Produktion, bezüglich derer grosse Unsicherheit herrscht.



Figur 13: Modellvorhersage der atmosphärischen CO₂-Konzentration für eine ab dem Jahr 1970 als konstant angenommene CO₂-Produktion.

Zuerst betrachten wir ein Szenarium, das eine obere Grenze der CO₂- und Klimaexkursion darstellt (Figur 14). Gemäss einer logistischen Funktion werden die heute bekannten Reserven der Fossilenergie genutzt. Die CO₂-Produktion nimmt im Jahr 2060 einen maximalen Wert an und wird ca. das Elffache der heutigen betragen. Der CO₂-Gehalt steigt etwa auf das Vierfache des vorindustriellen Werts und nimmt darauf, selbst nach dem Stopp der Fossilenergienutzung, nur langsam ab (Figur 14). In Figur 14 ist die entsprechende globale Temperaturerhöhung abgeschätzt nach einem Modell von Augustsson und Ramanathan (1977). Die Gleichgewichtstemperatur steigt bis zum Jahr 2100 um etwa 7°C und bleibt dann lange etwa 6°C höher als heute. Wird die Wärmeträgheit des Systems infolge der Wärmekapazität des Ozeans mitberücksichtigt, steigt die Temperatur «nur» um etwa 5°C an und bleibt dann für lange Zeit konstant. Figur 15, a und b, zeigt ein Szenario, bei dem im Maximum ein CO₂-Anstieg von 50% zugelassen wird (Siegenthaler und Oeschger, 1978). Die CO₂-Produktion dürfte bis zur Jahrhundertwende noch schwach wachsen, müsste dann aber wieder abnehmen und den heutigen Wert um die Jahre 2030–2040 erreichen. Bei diesem Szenarium würde die Temperaturzunahme unter 2°C bleiben.

Ist die CO₂-bedingte Erwärmung schon messbar?

Nach den Rechnungen mit Klimamodellen sollte die globale Temperatur bereits heute als

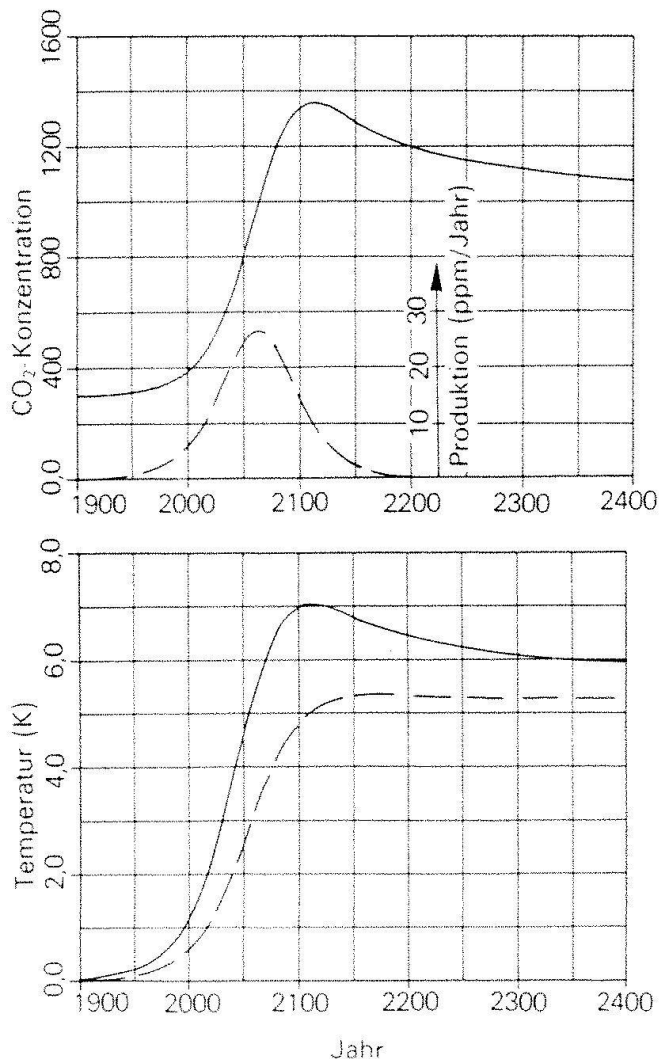
Folge des CO₂-Anstiegs um einige Zehntelgrade erhöht sein. Es ist schwierig, einen solchen Temperaturanstieg von den immer vorhandenen natürlichen Temperaturschwankungen zu unterscheiden. Figur 16 zeigt den Versuch von Hansen und seinen Mitarbeitern (Hansen et al., 1981), den Temperaturverlauf der letzten hundert Jahre auf den Einfluss von CO₂, Vulkanausbrüchen und Schwankungen der Strahlungsleistung der Sonne zurückzuführen. Schwierigkeiten bereitet der Abkühlungstrend zwischen 1940 und 1965, in einer Zeit mit Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration. Es ist möglich, dass durch Rodungen freigesetzte CO₂-Mengen bereits um die Jahrhundertwende zu einem Temperaturanstieg geführt haben.

Heute können noch keine klimatischen Konsequenzen des CO₂-Anstiegs mit Sicherheit nachgewiesen werden, es erscheint jedoch einigen Wissenschaftlern als wahrscheinlich, dass der CO₂-Anstieg zur Erwärmung um 0,4°C der letzten 100 Jahre beigetragen hat. Andere geben sich wegen der Tragweite und Schwierigkeiten solcher Aussagen verständlicherweise sehr zurückhaltend.

Klimaeffekte und Auswirkungen auf die Gesellschaft

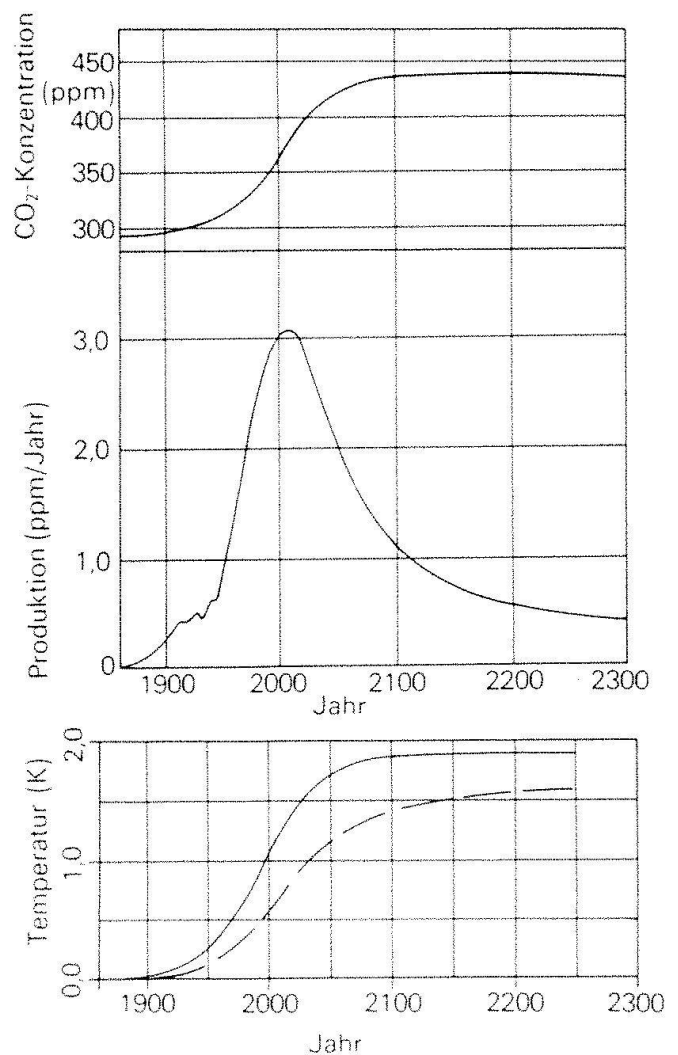
Störungen des Klimasystems führen zu Klimaänderungen, die sich grob in drei Typen unterteilen lassen:

1. Relativ kleine Störungen führen zu linearen Effekten; die Klimaparameter wie Temperatur und Niederschlagsrate verändern sich kontinuierlich; die Klimagürtel verschieben sich in höhere Breiten.
Die meisten Klimamodelle befassen sich mit Veränderungen dieses Typs, zu dem wohl auch die bisher durch den CO₂-Anstieg bewirkten Effekte (wahrscheinlich eine Temperaturerhöhung um 0,4°C) gehören.
2. Bei grösseren Störungen stellen sich diskontinuierliche Effekte ein, hauptsächlich Veränderungen des Musters der Atmosphärenzirkulation; die Klimaparameter verändern



Figur 14: Maximalszenario: alle Reserven von fossilen Brennstoffen werden verbrannt.

- a) Angenommene CO_2 -Produktion (gestrichelte Linie) und die berechnete atmosphärische CO_2 -Konzentration (ausgezogene Linie).
 b) Entsprechende Zunahme der globalen Temperatur unter der Annahme von Strahlungsgleichgewicht (ausgezogene Linie), unter Berücksichtigung der Wärmekapazität des Ozeans (gestrichelte Linie).



Figur 15: 50%-Szenario: Die maximale atmosphärische CO_2 -Konzentration soll 150% des vorindustriellen Werts nicht übersteigen.

- a) Angenommener Konzentrationsverlauf (oben) und die berechnete CO_2 -Produktion (unten).
 b) Entspr. Zunahme der globalen Temperatur unter der Annahme von Strahlungsgleichgewicht (ausgezogene Linie) und unter Berücksichtigung der Wärmekapazität des Ozeans (gestrichelte Linie).

sich rasch und zeigen dann wieder grössere Stabilität.

Die Modelle zeigen grundsätzlich die Existenz dieser Phänomene, sind jedoch noch weit davon entfernt, für Prognosen benützbare Information (z. B. Schwellenwerte für das Umklappen von Zirkulationsmustern) zu liefern. Die Existenz solcher Phänomene wird auch durch die Klimageschichte belegt.

3. Starke Strömungen führen zu drastischen, langfristigen Effekten; Beispiele sind das Verschwinden des arktischen Meereises im Sommer, verknüpft mit starken Veränderungen von Albedo, Temperatur und Luftfeuchtigkeit, und das Abschmelzen von Kontinen-

taleis, welches starke Veränderungen von langfristigen Klimaparametern und das Ansteigen des Meeresspiegels zur Folge hat.

Wie früher erwähnt, zeigen Klimamodellexperimente für eine CO_2 -Verdoppelung mittlere globale Temperaturanstiege im Bereich von $1,5^\circ\text{C}$ bis $4,5^\circ\text{C}$. Der mittlere globale Temperaturanstieg nimmt angenähert logarithmisch mit der CO_2 -Konzentration zu (eine Vervierfachung des CO_2 -Gehalts führt zu einem doppelt so grossen Temperaturanstieg wie eine CO_2 -Verdoppelung).

Einen Eindruck von der Grössenordnung der Klimaveränderungen, die den obenerwähnten zu erwartenden Temperaturanstiegen entspre-

chen, liefert der Vergleich mit historischen Analoga:

- Ein globaler Temperaturanstieg von ungefähr 1°C entspricht warmen Jahren der heutigen Zeit und der mittelalterlichen Warmzeit. Ein Temperaturanstieg von ungefähr $1,5^{\circ}\text{C}$ wäre mit dem klimatischen Optimum der Jahre 8000 bis 4500 vor heute zu vergleichen. Klimaänderungen in diesem Bereich entsprechen den obenerwähnten Typen 1 und 2. Drastische Effekte (Typ 3) zeigen den Vergleich mit weiter zurückliegenden Klimaten:
- Ein globaler Temperaturanstieg von 2 bis $2,5^{\circ}\text{C}$ wird für das letzte Interglazial vor ungefähr 125 000 Jahren abgeschätzt. Während dieser Warmzeit war der Meeresspiegel um 5 bis 6 m höher als heute; als Ursache wird angenommen, dass eines oder mehrere der Polar-Eisschilder (Westantarktis, eventuell auch Südgrönland) deutlich kleiner waren als heute. Als Folge der CO_2 -bedingten Erwärmung muss auf längere Frist auch mit einem Abschmelzen der Eisschilder gerechnet werden.

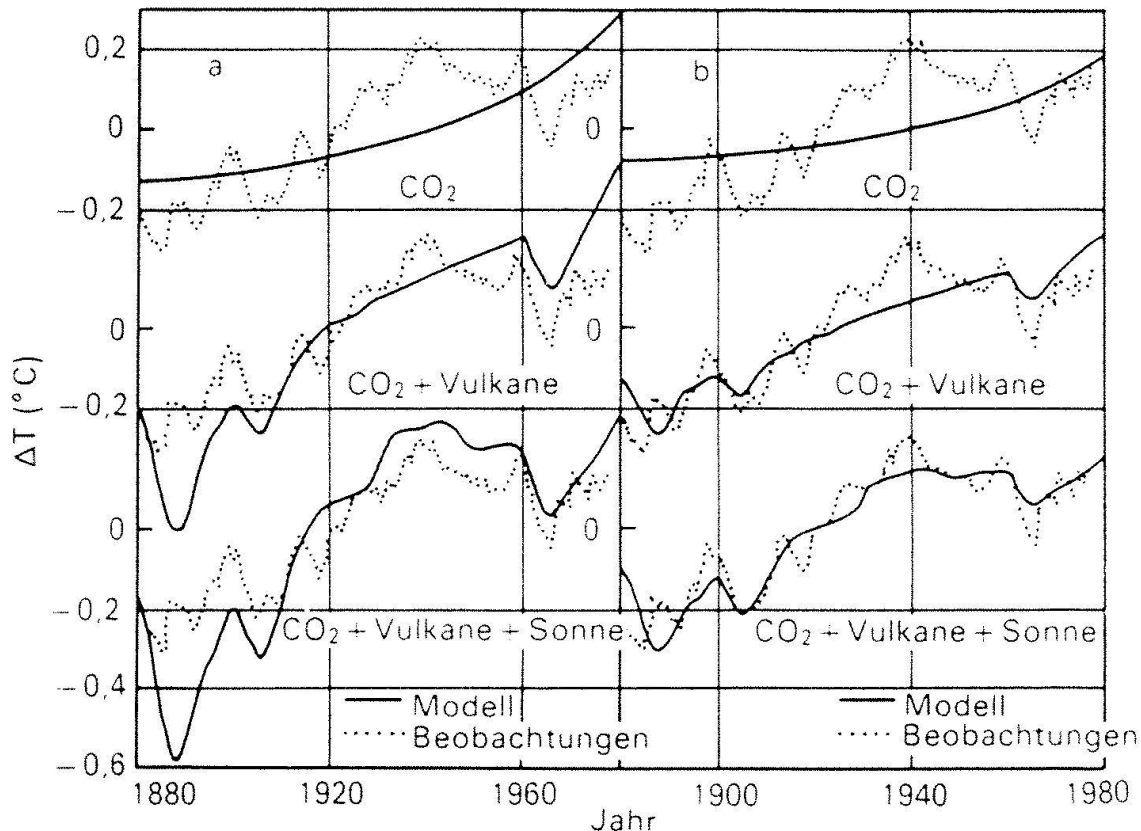
- Einem globalen Temperaturanstieg von etwa 4°C entsprechen Warmzeiten, die mehrere Millionen Jahre zurückliegen.

Vorstellungen bezüglich der Lebensmöglichkeiten der Menschheit auf einer um 2 bis 3°C wärmeren Erde lassen sich aufgrund der Aussagen von Klimamodellen und Vergleichen mit der Vergangenheit gewinnen. Auch wenn die Gewinne an besiedel- und anbaubarer Fläche die Verluste kompensieren oder sogar übertreffen mögen, sagt dieser Vergleich, nicht nur wegen der Unsicherheit der Prognosen, wenig aus über den eigentlichen Problemkomplex. Dieser tritt erst zutage, wenn man sich mit der Phase der Anpassung an die neuen Gegebenheiten auseinandersetzt.

In der Vergangenheit hat der Mensch Klimaveränderungen als Naturkatastrophen hingenommen und versucht, sich anzupassen oder in Gegenden mit bessern klimatischen Bedingungen auszuwandern.

Bei der CO_2 -bedingten Klimaveränderung sind jedoch völlig neuartige Aspekte im Spiel:

Es handelt sich um einen von Menschen be-



Figur 16: Der globale Temperaturtrend 1880–1980 im Vergleich mit den Resultaten eines Klimamodells, das verschiedene Einflüsse berücksichtigt (nach Hansen et al., 1981) (a und b beziehen sich auf verschiedene Darstellungen des Ozeans).

wirkten Vorgang, der sich innerhalb der Prognosen mit ihrem Unsicherheitsbereich abspielen wird. Dies wird weniger durch die detaillierten Effekte als durch das Gesamtbild der Ereignisse sichtbar werden. Die Bevölkerung von hoch entwickelten Ländern und Regionen, wie zum Beispiel Nordamerika, mit Gebieten, die sich bei einer Erwärmung wahrscheinlich neu für die Landwirtschaft erschliessen lassen werden, mag die Anpassungsphase ohne allzu schwere Auswirkungen überstehen können. Für Länder und Regionen ohne jegliche Elastizität der Lebensbedingungen, wo die Bevölkerung an Unterernährung leidet und Klima-anomalien schon heute schwerwiegende Konsequenzen zeigen, wird jedoch eine zusätzliche Beanspruchung zum Überlebenskampf.

Es wird Gewinner und Verlierer geben. Die Hauptproduzenten von CO_2 werden kaum identisch mit den Verlierern sein; bei der Bedeutung des Standes der technischen Reserven für die Anpassung scheint das Gegenteil wahrscheinlicher. Dies wird die weltpolitischen Spannungen (Nord-Süd-Problem) noch verschärfen.

Zusammenfassung

Es ist eines der Hauptanliegen dieser Arbeit darauf hinzuweisen, dass die Natur ungemein aufschlussreiche Experimente durchführt und die Information darüber auf perfekte Art und Weise archiviert. Faszinierende Beispiele sind die Schwankungen der Modulation der kosmischen Strahlung durch die Magnetfelder des variierenden solaren Plasmaflusses, die durch ^{10}Be -Konzentrationen im Eis der Polarkappen aufgezeichnet sind, oder die sich parallel zur ^{10}Be - auch verändernde ^{14}C -Produktion, welche sich in den resultierenden $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Schwankungen in Baumringen widerspiegelt. Nicht minder bedeutungsvoll ist, dass Polareis praktisch unverfälschte Luftproben vergangener Zeiten enthält, welche die Messung früherer CO_2 -Konzentrationen ermöglichen. Erstaunlich ist das Ineinanderspielen physikalischer, chemischer und biologischer Vorgänge. So kontrollieren die biologischen Prozesse im Ozean weitgehend den CO_2 -Gehalt der Atmosphäre und damit den Treibhauseffekt der Erde, der zu einer globalen Erdoberflächentemperatur von 15°C führt. Ohne biologische Prozesse im Ozean

würde der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre auf einen dreimal höheren Wert ansteigen, verknüpft mit einer Erhöhung der Erdtemperatur um einige $^\circ\text{C}$.

Physikalische und chemische Methoden, die ursprünglich zur Erarbeitung grundlegender Gesetzmässigkeiten in Laboratoriumsversuchen an künstlich vereinfachten Systemen entwickelt wurden, erweisen nun auch der Erforschung der komplexen natürlichen Systeme grosse Dienste. Im weiteren hat sich gezeigt, dass es in gewissen Fällen gelingt, selbst sehr komplexe Naturvorgänge mit relativ einfachen mathematischen Modellen zu simulieren. Dabei wächst das Vertrauen in die Modelle mit ihrer Fähigkeit, Modellantworten für verschiedenartige Störungen zu simulieren.

Neben den sichtbaren Umweltbedingungen, z. B. durch Strassen- und Städtebau oder Rodungen und neue landwirtschaftliche Methoden, greift der Mensch heute, auch mit seinen Sinnen nicht wahrnehmbar, durch die Emission chemischer Stoffe wie CO_2 und Spurengase in die komplexen physikalischen, chemischen und biologischen Naturprozesse ein. Es kommt zu in den Anfängen kaum erkennbaren, langfristig jedoch signifikanten Umweltveränderungen mit Auswirkungen auf die Lebensbedingungen in den verschiedenen Regionen der Erdoberfläche. Das Verständnis der Umweltvorgänge, die Möglichkeit, die Reaktion der Umweltsysteme auf menschliche Eingriffe vorauszusagen, ist im Hinblick auf die zunehmende Interferenz zwischen den technischen und den natürlichen Systemen ein dringendes Anliegen. Umweltsystemmodelle müssen in die Zukunftsplanung miteinbezogen werden. Sie dienen dazu, einerseits Technologien Priorität zuzuordnen, die zu relativ geringen Umweltveränderungen führen, und andererseits für nicht mehr vermeidbare anthropogene oder auch natürliche Umweltveränderungen rechtzeitige Anpassungsmassnahmen zu ermöglichen.

Um im technischen Zeitalter ein neues Gleichgewicht mit der Natur zu erreichen, das auf Jahrhunderte hinaus bestehen kann, ist das Verständnis der komplexen Wechselwirkung im System Mensch-Technik-Umwelt in globalem Maßstab erforderlich. Grosses Gewicht wird mit Recht den technischen Anstrengungen beigemessen. Die Erforschung der natürlichen Systeme wurde lange stark vernachlässigt und verdient, was die grundlegende Erkenntnisse versprechenden Projekte anbelangt, heute eine

intensive Förderung. Für die Zukunft der Menschheit spielt es jetzt eine wichtige Rolle, ob Kenntnisse über die Wirkung menschlicher Eingriffe in Umweltvorgänge fünf oder zehn Jahre früher oder später erarbeitet werden.

Literatur

- Augustsson T., Ramanathan V. (1977): A radiative convective study of the CO₂ climate problem. *J. Atmos. Sci.* 34: 448–451.
- Beer J. et al. (1983): Temporal ¹⁰Be Variations. Eingereicht für die Cosmic Ray Conference, Bangalore, Indien, August 1983.
- Bennet C.L., Benkens R.P., Gove H.E., Liebert R.B., Litherland A.E., Purser K.H., Sondheim W.E. (1977): Radiocarbon dating using electrostatic accelerators. Negative ions provide the key. *Science* 198: 508–510.
- Hansen J., Johnson D., Lacis A., Lebedeff S., Lee P., Rind D., Russel G. (1981): Climate impact of increasing atmospheric CO₂. *Science* 213: 957–966.
- Houtermans F.G. (1953): Determination of the age of the earth from the isotopic composition of meteoritic lead. *Nuovo Cimento* 10: 1623–1633.
- Libby W.F. et al. (1947): Natural Radiocarbon from Cosmic Radiation. *Phys. Rev.* 72, No 10: 931–936.
- Manabe S., Stouffer R.J. (1980): Sensitivity of a global climate model to an increase of CO₂ concentration in the atmosphere. *J. Geophys. Res.* 85: 5529–5554.
- Muller R.A. (1977): Radioisotope Dating with a Cyclotron. *Science* 196: 489–494.
- Oeschger H., Siegenthaler U., Schotterer U., Gugelmann A. (1975): A box diffusion model to study the carbon dioxide exchange in nature. *Tellus* 27: 168–192.
- Oeschger H., Siegenthaler U., Heimann M. (1980): The Carbon Cycle and its Perturbation by Man. W. Bach, J. Pankrath, and J. Williams (eds), *Interactions of Energy and Climate*: 107–127.
- Oeschger H. (1984): The Contribution of Radioactive and Chemical Dating to the Understanding of the Environmental System. ACS Symposium Series, No 176, Nuclear and Chemical Dating Techniques: Interpreting the Environmental Record.
- Oeschger H. et al. (1982): Late-Glacial Climate History From Ice Cores. Eingereicht für das 1982 Ewing Symposium, Climate Processes: Sensitivity to Solar Insolation and CO₂, Columbia University/Lamont-Doherty Geological Observatory, Palisades, N.Y., October 1982.
- Siegenthaler U., Oeschger H. (1978): Predicting future atmospheric carbon dioxide levels. *Science* 199: 380–395.
- Siegenthaler U. (1982): Modelling the dynamics of the global carbon cycle and other natural systems. Habilitationsschrift, Universität Bern.
- Stuiver M., Quay P.D. (1980): Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable sun. *Science* 207: 11–19.
- Urey H.C. (1948): Oxygen Isotopes in Nature and in the Laboratory. *Science* 5: 491.
- WMO (1979): Report of the meeting of CAS working group on atmospheric carbon dioxide, Boulder, Colo. Nov. 1979. World Meteorological Organization, Geneva.

Addendum

Das Manuskript wurde im Februar 1983 eingereicht. In diesem sich rasch entwickelnden Forschungsgebiet liegen heute wichtige, nicht mehr berücksichtigte neue Resultate vor, die die Grundgedanken der Arbeit bestätigen.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. Hans Oeschger
Physikalisches Institut
der Universität Bern
Sidlerstrasse 5
CH-3012 Bern

La conversion de l'énergie solaire par des systèmes photosynthétiques artificiels

Pierre Cuendet

Zusammenfassung

Die Photoanalyse eines sauberen und stabilen Brennstoffs aus anorganischer Materie (wie zum Beispiel Wasser) stellt eine interessante Art der Umwandlung von Sonnenlicht dar. Einige Formen dieser Energieumwandlung werden allgemein diskutiert. Speziell wird auf die Möglichkeiten der bio-photochemischen Energieumwandlung hingewiesen. Zusammenhänge zwischen der Photosynthese und künstlichen Strukturen der Energieumwandlung werden diskutiert. Hybrid-Systeme, biomimetische und künstliche Systeme werden an Hand von Beispielen erklärt.

Résumé

La production d'un vecteur énergétique stockable et propre synthétisé à partir de la lumière et de composés inorganiques tels que l'eau représente une voie intéressante de conversion de l'énergie solaire. Quelques idées générales concernant le rôle possible de ce type de conversion sont tout d'abord discutées. Quelques systèmes biophotochimiques convertisseurs d'énergie sont ensuite décrits, ainsi que les analogies qui peuvent être mises en évidence entre la photosynthèse et les systèmes artificiels. Enfin, plusieurs exemples de systèmes hybrides, biomimétiques et artificiels sont présentés.

Introduction

Ces lignes n'ont pas le prétention de présenter une vision complète du problème de la conversion de l'énergie solaire par les systèmes biophotochimiques. Elles se contentent de donner une idée générale des différentes possibilités qui sont étudiées actuellement, en mettant plus par-

ticulièrement l'accent sur les similitudes existant entre nombre de systèmes artificiels et le processus naturel de la photosynthèse. Auparavant, quelques élucubrations tentent de justifier l'importance accordée au sujet présenté, élucubrations qu'on voudra bien me pardonner.

Sous l'influence, en particulier, d'un flux continu d'énergie provenant du soleil, des systèmes thermodynamiques dissipatifs de plus en plus complexes sont apparus au cours des âges à l'interface terre/atmosphère et ont permis l'émergence de structures organisées qui peu à peu se sont diversifiées et multipliées jusqu'à épuiser les ressources énergétiques alors à disposition. Grâce à la photosynthèse, un processus efficace de conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique apparu à ce moment de l'évolution, le captage du flux photonique solaire s'est considérablement amélioré, assurant ainsi une nouvelle étape de la croissance et de la diversification de ces systèmes, étape pendant laquelle de grandes quantités d'énergie chimique ont été stockées dans le sous-sol de notre planète.

Enfin, il y a peu, des formes supérieures d'organisation basées principalement sur l'utilisation des réserves énergétiques fossiles se sont développées au sein des sociétés humaines sous la forme de structures socio-économiques nouvelles, plus complexes, qui tendent à modifier les conditions de vie et le paysage – même de la planète. Comme pour les systèmes précédents, le maintien et le développement du fonctionnement de ces structures nécessitent un flux continu d'énergie que les réserves fossiles ne pourront bientôt plus assurer. Quelle que soit l'évolution de ce type d'organisations socio-économiques, et leur plus ou moins large implantation à la surface de la terre, il est prévisible que des besoins énergétiques de plus en plus considérables seront nécessaires. Pour répondre à ces besoins, plusieurs options peuvent être envisagées. L'une d'entre elles consiste à accroître encore l'efficacité de la conversion des pho-

tons solaires qui atteignent la surface de notre planète en énergies thermique ou chimique directement utilisables dans les activités multiples qui caractérisent la communauté humaine actuelle.

Il faut remarquer qu'une amélioration du rendement de conversion de l'énergie solaire semble tout à fait réalisable: La consommation annuelle mondiale d'énergie ne représente qu'environ une heure du flux solaire total atteignant la surface de la terre. D'autre part, la conversion naturelle de cette énergie radiante par le monde végétal ne se fait qu'avec un rendement de l'ordre de 0.1 % en moyenne annuelle.

Parmi les moyens qui permettraient d'intensifier le captage de l'énergie photonique incidente, une utilisation plus performante des processus de la photosynthèse reste une voie extrêmement prometteuse.

De nombreuses recherches, dont certaines ne pourront aboutir qu'à long terme, doivent être entreprises, tant dans l'étude d'une domestication plus efficace de ce processus propre au règne végétal que dans le développement de techniques nouvelles s'inspirant de près ou de loin du phénomène naturel. Quelles que soient les voies que la recherche empruntera à l'avenir, il existe de nombreux domaines dans lesquels les sciences botaniques peuvent et doivent apporter leur contribution, afin de se mettre une fois encore au service de la communauté.

Bioconversion de l'énergie solaire

L'apparition de l'agriculture fut le premier pas accompli par l'homme en direction d'une domestication de la photosynthèse. Au cours des millénaires, les techniques culturales se sont affinées, et de nouvelles variétés végétales ont été sélectionnées, ce qui permit l'accroissement des rendements de fixation photosynthétique du carbone et la production différenciée de nourriture, de matériaux (fibres, etc.) ou d'énergie. Il faut cependant remarquer que rarement des plantes ont été cultivées en vue de la seule production d'un vecteur énergétique. La chaleur était obtenue par la combustion de résidus de la biomasse, ou par un prélèvement effectué sur des ressources végétales naturelles, telles nos forêts.

Depuis quelques années, de nombreuses recherches sont consacrées soit au développement d'une agriculture spécifiquement tournée vers

la production de composés riches en énergie, soit vers la valorisation de la biomasse par sa transformation en produits plus facilement intégrables dans les circuits énergétiques modernes (production de méthane, d'alcools, etc.).

Cet «energy farming» est appelé à connaître une extension considérable. Que ce soit par la culture de plantes traditionnelles, tel la canne à sucre, ou par celle d'espèces nouvelles, tel certaines variétés d'Euphorbiacées adaptées aux régions semi-arides, ou encore d'algues, une variété de systèmes bioconvertisseurs sont actuellement étudiés en vue d'une production intensive de biomasse, d'hydrocarbures, d'alcools, d'ammoniaque, etc. Parmi les inconvénients majeurs qui doivent être considérés lors d'une éventuelle application de ce genre de procédés de conversion, il faut noter tout d'abord le risque de compétition entre les différents types d'agricultures pour l'occupation des surfaces terrestres disponibles. D'autre part, il faut s'assurer que les rendements énergétiques globaux soient réellement favorables. De ce point de vue, la photosynthèse réalisée «in vivo» n'est pas un processus d'une très grande efficacité: la quantité d'énergie stockée par les plantes ne dépasse généralement pas 1 % de l'énergie incidente totale mesurée sur une année. Cette efficacité peut cependant atteindre 3 à 5 % dans des conditions optimales et sur de courtes périodes. Cependant, un tel rendement est encore bien inférieur aux valeurs théoriques que l'on peut escompter d'un processus photosynthétique qui ne serait pas soumis aux contraintes imposées par les mécanismes physiologiques qui régissent la vie et le mort des organismes végétaux. En effet, il peut être montré qu'un rendement de conversion de près de 12-13 % (ou plus, en couplant deux systèmes absorbants dans des régions complémentaires du spectre) peut être envisagé pour la transformation des photons solaires en énergie chimique.

D'où l'intérêt de chercher à développer des systèmes artificiels capables de convertir l'énergie photonique d'une façon plus efficace, plus durable et plus rentable que leur équivalent naturel.

Une des réactions les plus attractives qui puisse être envisagée dans ce but est la décomposition de l'eau en ses constituants à l'aide de la lumière. Une telle réaction, appelée photolyse, présente un grand intérêt tant sur les plans technique qu'écologique. Elle produit en effet à partir d'un substrat abondant, l'eau, et d'une

source primaire d'énergie inépuisable, le rayonnement solaire, un vecteur énergétique stockable de grande valeur, l'hydrogène, dont la combustion, réalisée d'une façon contrôlée, ne redonne que le produit de départ.

Un effort considérable de recherche doit bien évidemment être entrepris avant qu'une application pratique d'un tel système de conversion puisse être envisagée. Il faut cependant noter que sa généralisation, si elle s'avérait possible, représenterait une évolution nouvelle du fonctionnement des systèmes évoluant à la surface de la terre: A côté des cycles de l'eau, du carbone, de l'azote, etc., qui caractérisent la biosphère, prendrait place un cycle parallèle, basé sur la décomposition de l'eau par les radiations incidentes, qui contribuerait à assurer en même temps que d'autres types de convertisseurs (transformation de biomasse, production solaire d'électricité et de chaleur, etc.) le maintien du flux d'énergie grâce auquel les sociétés humaines pourront continuer à s'organiser, se complexifier et se diversifier.

De remarquables analogies existent entre le processus naturel de la photosynthèse et nombre de systèmes artificiels étudiés actuellement. La première étape de la réaction biologique — dont le siège est la membrane thylakoidale — consiste en effet précisément en cette dissociation de la molécule d'eau sous l'effet de la lumière (figure 1), et en la formation d'espèces de bas potentiel redox qui, dans une deuxième série de réactions biochimiques (B) vont permettre la fixation du gaz carbonique, puis sa conversion en sucres. Huit photons sont utilisés dans le chloroplaste pour l'oxydation de deux molécules d'eau et la production d'une molécule d'O₂:



La plus grande partie du spectre solaire visible contient des photons suffisamment énergétiques pour effectuer ce type de photodissociation. Dans les systèmes artificiels (figure 2), les équivalents réducteurs formés lors de l'oxydation de l'eau sont utilisés pour réduire les protons par l'intermédiaire de catalyseurs spécifiques (B')



Ainsi donc, dans de tels systèmes, les mécanismes complexes de la fixation du carbone sont

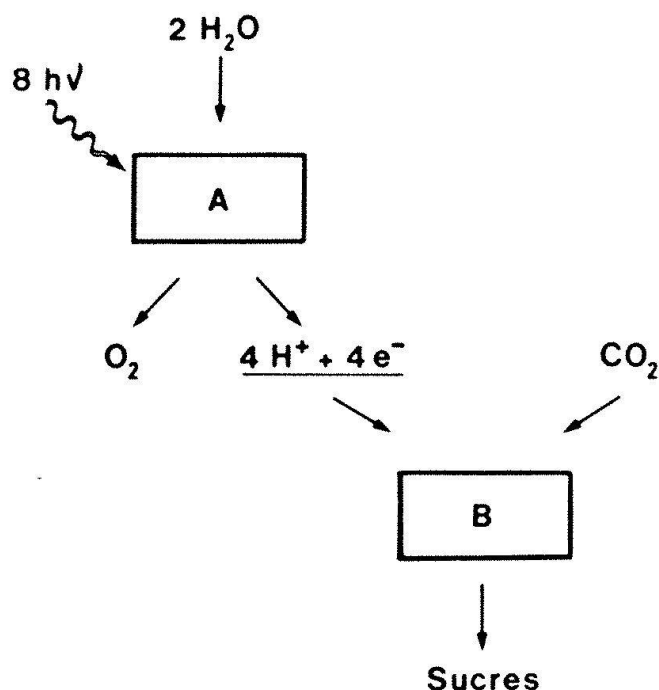


Figure 1. Les deux réactions de la photosynthèse

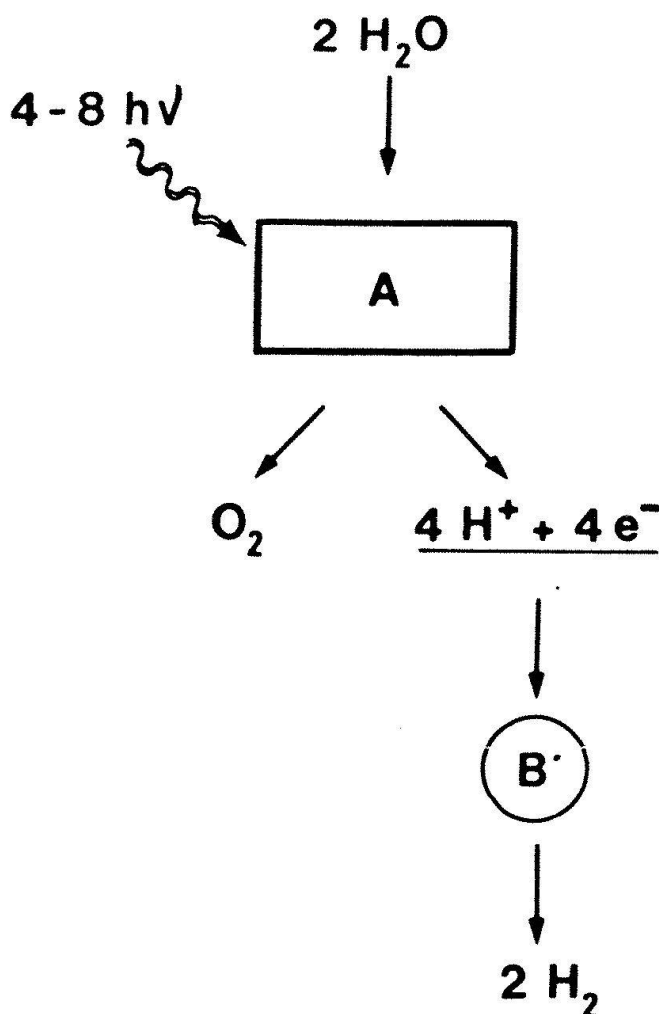


Figure 2. Photolyse de l'eau

remplacés par une réaction redox unique. De plus, la photophosphorylation obtenue dans le chloroplaste par une dissipation contrôlée d'un gradient de concentration de protons n'est pas réalisée.

Il existe des équivalents biologiques au catalyseur B' dont il est question ci-dessus. Il s'agit des hydrogénases et des nitrogénases que l'on rencontre dans certaines algues ou cyanobactéries. Plusieurs laboratoires étudient actuellement les conditions de cultures qui favorisent une photo-production optimale d'hydrogène par ces organismes.

La photolyse de l'eau n'est pas la seule réaction réalisable grâce aux systèmes artificiels. D'autres substrats que l'eau peuvent être utilisés comme donneurs d'électrons, et d'autres produits peuvent être formés. Différentes applications, qui vont de la synthèse organique à la production d'ammoniaque, en passant par la génération d'électricité s'ouvrent donc pour les systèmes photosynthétiques artificiels.

Quelques exemples de systèmes artificiels

Trois différentes phases réactionnelles, représentées sur la figure 3, peuvent être mises en

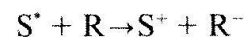
évidence dans tous les systèmes convertisseurs d'énergie photonique en énergie chimique.

1. Capture des photons. Cette première étape fait intervenir une espèce chimique colorée, le sensibilisateur S, capable d'absorber une certaine partie du spectre visible. Cette molécule doit posséder d'autre part, des états excités S* dont le potentiel chimique est tel qu'après absorption d'un photon, elle soit capable d'être soit un donneur, soit un accepteur d'électron.



L'appareil photosynthétique des plantes supérieures réalise cette capture des photons avec une très grande efficacité. Plusieurs centaines de molécules de chlorophylle associées en un complexe, l'antenne, absorbent la lumière, en compagnie d'autres pigments secondaires, et transfèrent ensuite l'énergie ainsi collectée à des centres réactionnels qui agiront comme donneurs d'électrons. Aucun système artificiel n'est capable actuellement d'imiter un piège à photons d'une telle complexité, mais de nombreux sensibilisateurs, porphyrines ou complexes métalliques par exemple, ont été étudiés en photochimie en vue d'une telle conversion de l'énergie photonique en potentiel chimique, et sont actuellement utilisés dans nombre de systèmes artificiels.

2. Séparation de charge. La deuxième étape du processus est constituée par le transfert de l'électron depuis le sensibilisateur excité à une molécule voisine, appelée relais (R) ou médiateur (seul ce type de transfert, appelé quenching oxydatif sera considéré ici), puis en la stabilisation des espèces chargées ainsi formées:



Cette stabilisation revêt une importance cruciale puisque c'est d'elle que dépend pour une grande part le rendement du système. En effet, l'utilisation efficace dans les étapes ultérieures du potentiel chimique accumulé lors de la séparation de charges (formation d'un couple redox) n'est possible que si la recombinaison de S⁺ et R⁻, qui occasionne la dissipation sous forme thermique de l'énergie captée, est fortement inhibée. Cette stabilisation d'un couple redox représente en fait une étape tampon entre les processus photochimiques qui se déroulent sur une échelle de temps de l'ordre de la nanoseconde,

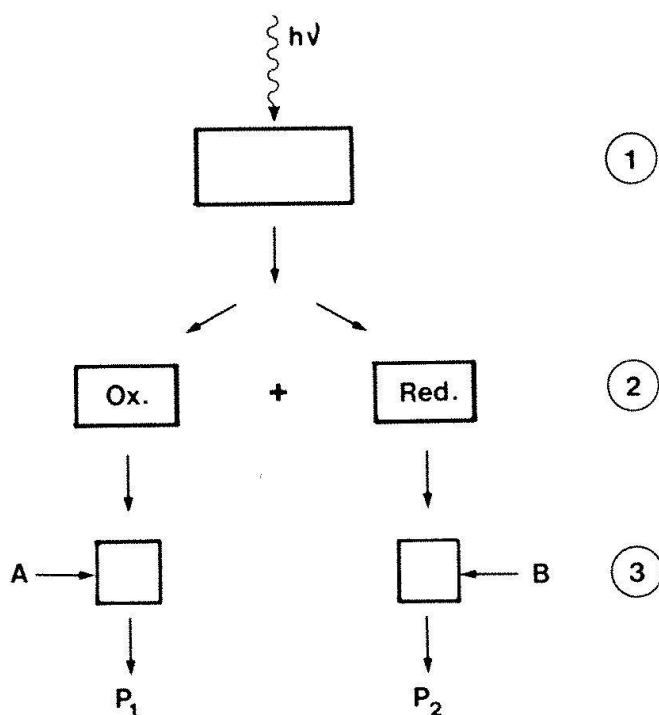


Figure 3. Les trois étapes de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique.

Ici encore, l'appareil photosynthétique est plus performant que les systèmes artificiels développés à ce jour. La séparation de charge est réalisée dans les deux photosystèmes par l'intermédiaire d'une succession de plusieurs composés donneur/accepteur d'électrons associés aux centres réactionnels. Les espèces oxydantes et reductrices ainsi créées sont de plus situées de part et d'autre de la membrane thylakoidale, qui forme écran à la recombinaison.

Des catalyseurs redox artificiels, formés généralement d'aggrégats colloïdaux de métaux nobles ou de leurs oxydes ont aussi été développés en vue de réaliser les oxydations et réductions par lesquels se termine le processus de la conversion de l'énergie lumineuse.

a) Les systèmes hybrides

De tels systèmes présentent l'inconvénient d'une durée de vie limitée à quelques heures à cause de l'inactivation de certains composants membranaires. De plus, la production d'hydro-

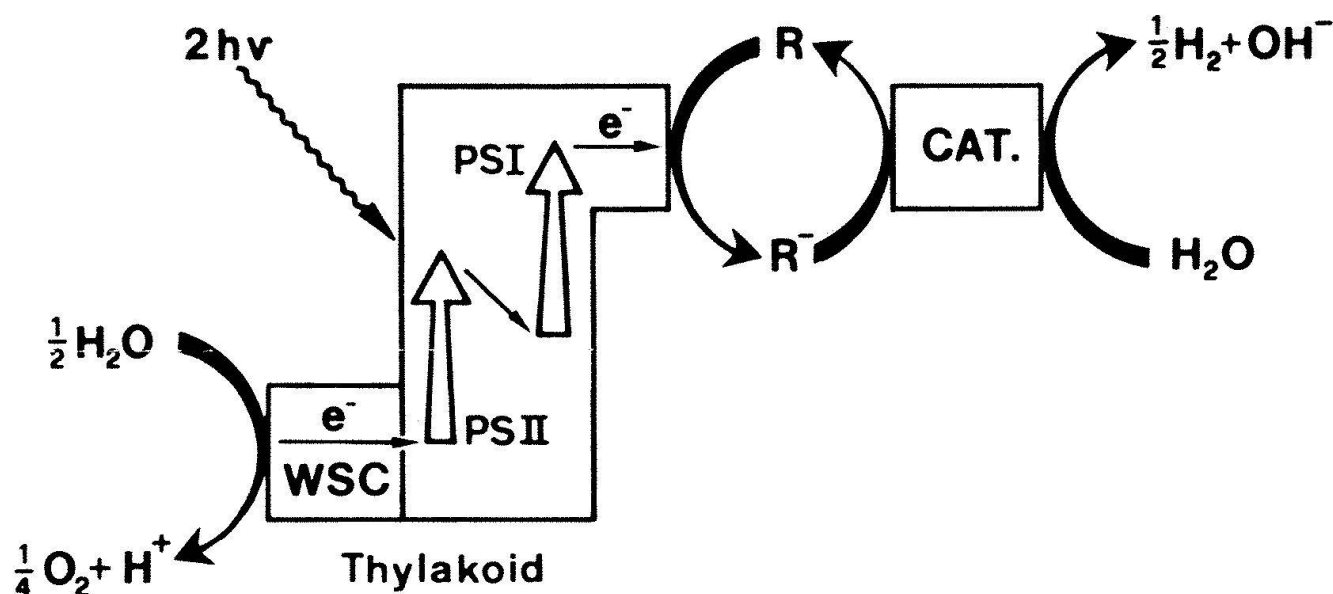


Figure 4. Un exemple d'un système hybride.

gène que l'on peut en tirer reste bien inférieure à la capacité réductrice des thylakoides. Ces systèmes facilitent cependant la compréhension des relations redox entre la surface négativement chargée de la membrane et les différents relais qui sont actuellement étudiés.

D'autres types de systèmes hybrides présentent un grand intérêt. Il ne sera fait mention ici que des essais d'incorporation de centres réactionnels dans des vésicules artificielles, ou de l'adsorption de ces mêmes centres à la surface d'électrodes, en vue de la réalisation de cellules biophotoélectrochimiques.

b) Les systèmes biomimétiques

Sous cette dénomination peuvent être rangés les systèmes dans lesquels on tente de reconstituer l'organisation de l'appareil biologique. En particulier, l'utilisation de molécules amphiphiles permet de réaliser des assemblages moléculaires tels que les micelles, les vésicules ou les micro-émulsions qui comportent une interface séparant une phase lipophile du milieu extérieur aqueux. Une telle disposition reproduit le micro-environnement caractérisant la membrane photosynthétique. L'incorporation de sensibilisateurs ou de relais adéquats permet de contrôler le transfert d'électrons induit par la lumière, et d'assurer une séparation de charge du même type que celle qui est produite dans le thylakoïde.

c) Les systèmes artificiels

Il existe enfin une classe de convertisseurs photochimiques qui présentent peu de similitudes avec les processus biologiques, tout en respectant le schéma réactionnel décrit plus haut. Parmi eux, on peut citer tout d'abord les systèmes homogènes dans lesquels n'existe aucune compartimentalisation. Seuls le jeu d'interactions de type électrostatiques, par exemple, entre les différentes espèces, la diffusion, et l'utilisation de catalyseurs très actifs peuvent alors empêcher la réaction inverse de recombinaison des couples oxydants/réducteurs de dissiper thermiquement l'énergie absorbée.

Une seconde espèce de systèmes totalement artificiels fait actuellement l'objet de recherches intensives. Dans ce dernier cas, la séparation de charge est assurée grâce à un phénomène physique entièrement différent puisqu'il fait intervenir la structure de bande des états électroniques dans les semiconducteurs. Ce type de système se compose donc d'une suspension de particules semiconductrices sur lesquelles ont été déposés les catalyseurs. La figure 5 montre un exemple d'un tel système: un sensibilisateur S injecte un électron dans la bande de conduction du semiconducteur, lequel électron peut alors migrer jusqu'à la surface du catalyseur où se produit la réduction de l'eau. Un second catalyseur peut ensuite reconverter S^+ par l'oxydation du même substrat. Plusieurs variantes de l'utilisation de particules semiconductrices sont actuellement

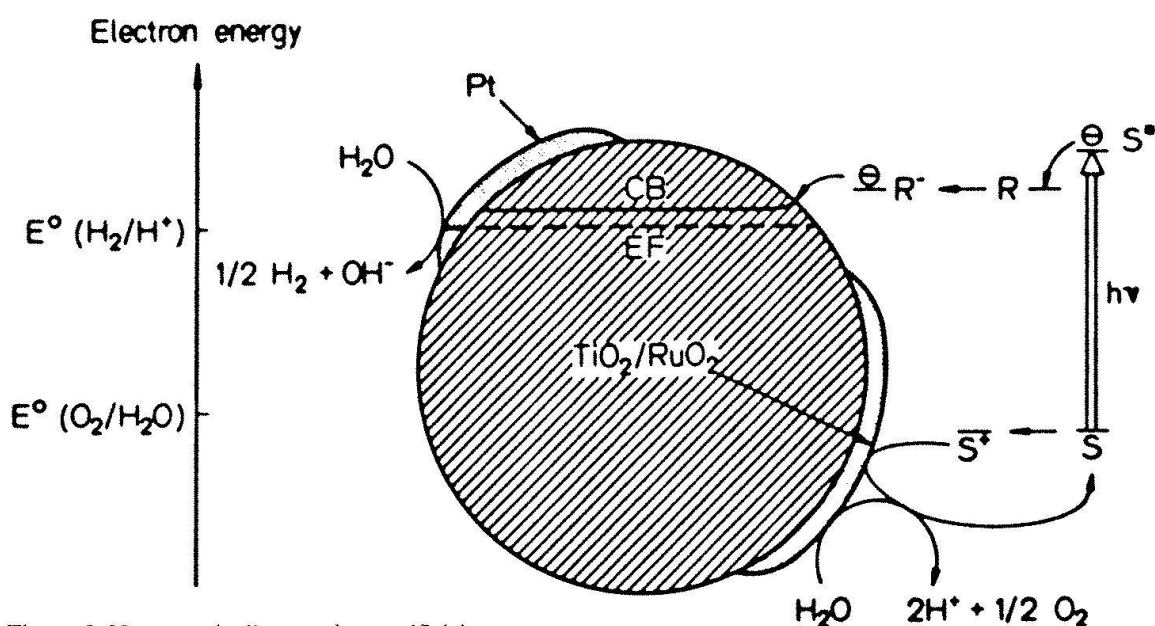


Figure 5. Un exemple d'un système artificiel.

étudiées. Parmi elles, on trouve des systèmes qui ne contiennent rien d'autre que le semiconducteur: le sensibilisateur devient inutile lorsque la largeur de la bande interdite du matériau utilisé est assez étroite pour que les photons visibles puissent induire la création de paires électrons/trous directement dans la particule.

De grandes possibilités de développement semblent se dessiner pour ce type de convertisseur artificiel de l'énergie solaire. La simplicité des systèmes, les surfaces importantes d'interface milieu/solide qui caractérisent les suspensions (cette surface peut atteindre plusieurs centaines de m² par litre de solution dans le cas de semiconducteurs colloïdaux), la variété des réactions qui peuvent être photoinduites donnent de grands espoirs pour l'avenir. La recherche dans ce domaine n'est cependant vraiment active que depuis quelques années. Il est donc encore trop tôt pour prévoir les développements futurs et de décider lesquels des systèmes artificiels, biomimétiques, ou naturels permettront un nouvel essor de la conversion photosynthétique.

Conclusion

Plusieurs méthodes photobiologiques de production d'un vecteur énergétique à partir de la lumière et de composés inorganiques tels que l'eau sont actuellement envisageables. Aucune de ces méthodes n'est cependant mûre pour une application technologique immédiate, tant à cause de notre manque de connaissances fondamentales des processus qui entrent en jeu que du peu de maîtrise technique que nous avons de ce domaine de la photoconversion de l'énergie solaire. Nous nous trouvons, semble-t-il, dans la même situation que celle du monde occidental à la veille de la mise au point de la machine à vapeur par J. Watt, en 1769. A cette époque, une grande partie de la communauté scientifique était convaincue qu'une force énorme pouvait être tirée de la vapeur, mais il a fallu attendre Watt pour que des nombreux systèmes alors étudiés émerge enfin l'engin qui allait être la cause de la révolution industrielle que l'on sait. De même, nous nous trouvons actuellement devant le problème vital de la fourniture d'énergie

à l'ensemble des sociétés humaines et nous savons les potentialités que représente le flux solaire. Aucun des types de conversion actuellement connu ne peut cependant prétendre être celui qui sera le plus adéquat. Il n'est donc pas possible de prévoir si les méthodes photochimiques faisant appel soit à des organismes vivants, soit à des systèmes biomimétiques ou totalement artificiels pourront rivaliser avec les processus issus de voies différentes. Mais l'importance du but à atteindre est telle que de nombreux efforts doivent être entrepris dans toutes les directions. Les sciences biologiques ont ici un rôle particulièrement important à jouer. Aussi bien la biochimie, la biophysique, la physiologie, la botanique que la génétique, la microbiologie et un vaste domaine de la chimie sont engagés dans cet effort. La recherche scientifique entreprise dans un tel contexte est une aventure passionnante. Elle fait appel en effet aux connaissances les plus récentes dans les domaines de la biologie, de la physique et de la chimie. De plus, cette recherche d'une production rentable, propre et décentralisée de l'énergie dont nos sociétés ont besoin donne tout son sens au travail du chercheur. En effet, l'accès à cette énergie, ainsi qu'à des ressources alimentaires suffisantes et à la liberté fondent les conditions nécessaires à la dignité de l'homme et à sa survie.

Je tiens à remercier ici le Nationaler Energie-Forschungs-Fonds (NEFF) qui a subsidié une partie des travaux de l'Institut de Chimie-physique de l'EPFL consacrés à l'étude de systèmes hybrides, ainsi que le Professeur M. Grätzel, directeur de cet institut, qui a bien voulu relire ce travail.

Addendum

Plus de trois ans se sont écoulés entre la rédaction de cet article et sa sortie de presse. Sur le plan scientifique, une telle durée représente une évolution notable des idées, de même que la publication de nombreux résultats expérimentaux nouveaux, particulièrement dans un domaine aussi récent que celui de la photosynthèse artificielle. Le lecteur intéressé par le sujet trouvera une mise au point plus à jour dans «Energy resources through photochemistry and catalysis», M. Grätzel, ed., Academic Press, New York, 1983, ou dans «Interfacial electron transfer in colloidal metal and semiconductor dispersions and photodecomposition of water», Kalyanasundaram et al., Coordination Chemistry Reviews, in press.

Bibliographie

1. Barber, J., ed., 1979, Photosynthesis in relation to model systems. Topics in Photosynthesis, vol. 3, Elsevier, Amsterdam.
2. Demeyer, A., Jacob, F., Jay, M., Menghy, G. and Perrier, J., 1981, La conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies. Techniques et Documentation, Paris.
3. Grätzel, M., Kalyanasundaram, K. and Kiwi, J., 1982, Visible light induced cleavage of water into hydrogen and oxygen in colloidal and microheterogeneous systems, in: Structure and Bonding, vol. 49, Springer Verlag.
4. Mislin, H. and Bachofen, R., eds., 1982, New trends in research and utilization of solar energy through biological systems. Experientia supplementum, vol. 43, Birkhäuser Verlag, Basel.
5. San Pietro, A., ed., 1980, Biochemical and photosynthetic aspects of energy production, Academic Press, New York.

Adresse de l'auteur :

Pierre Cuendet
Dr ès sciences
Institut de Chimie-physique
Ecole polytechnique fédérale
CH-1015 Lausanne

Prospects and problems in biotechnology

Julian Davies

Many commercially important products have been made from microorganisms for thousands of years (Table 1) and biotechnology, in the form of food and beverage production, must rank as one of the oldest industries (1). In more recent times, industry has capitalised on the ability of microorganisms to produce pharmacologically – active compounds such as antibiotics, which combined with techniques for large scale fermentation and extraction had led to the development of the antibiotic industry. This represents one of the best examples of advanced methods of organism manipulation leading to controlled growth and production. Thus biotechnology is not a new field; the recent excitement in this area comes from the application of modern concepts and experimental developments in molecular genetics and biochemistry. New methods for the manipulation of microorganisms *in vivo* and *in vitro* have provided scientists with a variety of methods to (a) improve the yield of a known product from a microorganism or (b) to use microorganisms as cellular factories to produce large amounts of rare (mostly human) proteins. As examples of the latter, it is now possible to produce highly purified human growth hormone, insulin, interferons and other proteins in microorganisms, in gram amounts (2). Previously, these materials were not available in amounts sufficient for extensive pharmacological testing and therapeutic

application. The *prospects* for the new applications of biotechnology are enormous and much has been written about the things that can and will be done (3).

The many predictions presented the first *problem* of biotechnology since, in terms of the organisms to be manipulated, products to be made, and the time taken to accomplish them, the goals were overly-optimistic. This led to expectations in the scientific and business world that have generally been disappointed; an unfortunate situation because the “new” biotechnology will succeed given sufficient time. The main predictions in the beginning came largely from the over-optimism of the press, and that same press is now criticising the failure of biotechnology to come up with dramatic cancer cures and new energy sources. The introduction of new human therapeutic agents takes much time, largely because of governmental regulatory processes that have to be followed to ensure efficacy and safety. For most new drugs, from discovery to sale may take as long as 10–20 years. Human interferon was cloned and produced in bacteria in 1980 and will probably be on the market for some indications in 1984–85; this is probably close to the lower limit in terms of time for new drug registration. Human insulin made in bacteria has taken about the same length of time from cloning to market (4). One must also be clear about the “so-called” large amounts of money invested in biotechnology. Apart from internal efforts of the giant pharmaceutical and chemical companies the investment has not been as large as most people seem to imagine, especially when one realises that the yearly research budget of a medium sized pharmaceutical company may far exceed the value of some of the biotechnology companies! Too much was expected, too soon, from a relatively small investment.

However the prospects remain bright. The technical possibilities in the application of recombinant DNA technology to the production of bio-

Table 1: Products of biotechnology

| Organism | Product |
|-----------------------------------|-----------------|
| <i>Saccharomyces cerevisiae</i> | bread, wine |
| <i>Lactobacillus</i> sp. | yoghurt |
| <i>Penicillium roquefortii</i> | blue cheese |
| <i>Clostridium acetobutylicum</i> | acetone/butanol |
| <i>Aspergillus niger</i> | citric acid |
| <i>Corynebacterium glutamicum</i> | lysine |
| <i>Bacillus</i> sp. | proteases |
| <i>Penicillium chrysogenum</i> | penicillin |
| <i>Streptomyces griseus</i> | streptomycin |

logical products for commercial use are realistic, but it is neither useful nor practical to set time scales for developments. To give one very good example, alcohol production from biomass has been considered one of the primary goals for the biotechnology industry (5). What could be simpler? Organisms such as yeasts give good sugar-alcohol conversion rates; yeasts grow well on simple substrates on the large scale and the fermentation technology is largely established. The production of alcohol in Brazil has been mentioned often as a model of what can be done. However, this is a government subsidised programme and a convenient, easily *metabolised* carbohydrate source is readily available in the country. Even under these circumstances the programme is clearly not a commercial or industrial success and its future is in jeopardy.

The production of large amounts of fuel and feedstock alcohol from biomass in Europe and the U.S., without heavy government subsidy is unlikely in the short term. Fossil fuel reserves are still available and prices are remaining firm; in economic terms alone, alcohol production cannot compete. However, should fossil fuel sources become limiting, the expensive development of biomass fermentation would be warranted to provide replacement fuel, not because it would be cheaper, but because it would be the best available alternative especially in view of the controversy surrounding nuclear power generation. Table 2 indicates some of the difficulties to be anticipated in developing industrial processes for alcohol production from biomass using recombination organisms. In the West Indies, a good source (sugar cane) is available that is easily metabolised and limited transport would be necessary. However, the engineering problems are still considerable; the removal of alcohol requires energy and the most efficient

microorganism has yet to be found. The use of thermophilic strains has often been suggested, but this would impose an additional set of engineering problems. The production of alcohol from biomass is a complex metabolic situation – it is not like making interferon in bacteria. The metabolism of the chosen industrial organism has to be channeled into alcohol production without dissipating metabolic energy into other products. As more complex lignocellulose-carbohydrate sources are considered (such as wood or corn wastes) additional microbiological and environmental complications will be encountered since most microorganisms metabolise these sources very poorly; pretreatment of the biomass will add to the overall cost. The engineering of a recombinant microorganism capable of breaking complex carbohydrates into simple sugars and thence into alcohol, at high efficiency and in the presence of substantial contaminants such as lignin, will be a formidable task. It will be done, but only when there is a need for it.

Thus we can see a pattern in recent developments in biotechnology – provided that we concentrate on “simple” cloning – the manipulation of eukaryotic genes with prokaryotic expression systems – the accomplishments have been impressive. Over one hundred eukaryotic genes have been cloned in bacteria and a number of them have been expressed and developed to a stage where their commercial application can be foreseen in the near future (Table 3). However, because of the need for appropriate registration, commercial gains from these products have been slower than expected. By contrast, complex cloning-expression for such ap-

Table 2: Production of alcohol from biomass – problems to be solved

1. Requirement for mixed cultures for combination of degradative enzymes
2. Inhibitory action of lignin and other components of biomass
3. Requirement for metabolic channeling in organism
4. Inhibitory action of alcohol
5. Cost of biomass and its transport
6. Process engineering – alcohol removal – energy requirements

Table 3: Some eukaryotic genes cloned in microorganisms

| Gene | Application |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Interferons | antiviral, anti-tumour agents |
| Insulin | antidiabetic |
| Growth Hormones | human congenital defects animal growth promotant |
| Urokinase | } anti-blood clotting agents |
| Plasminogen activator | |
| Foot & Mouth disease virus antigens | } vaccines |
| Hepatitis B antigens | |
| Rabies virus antigens | |
| Histocompatibility antigens | diagnostic reagents |

plications as antibiotics, alcohol, and chemical feedstocks is still being developed and until the appropriate host-vector systems are available and the background biochemistry sufficiently well understood, we cannot expect dramatic changes in the industrial production of such products in the near future. The situation with respect to plant genetic engineering is probably even more long term.

In addition to problems associated with over-optimistic predictions of the commercial development and application of the "new" biotechnology industry, there are a whole host of scientific problems that are much more interesting and challenging. Although the cloning process has been developed technically to a fine art to enable genes to be found in large chromosomal "libraries" using the knowledge of limited polypeptide or nucleotide sequences (6), there exist difficulties associated with the expression, secretion and purification of the required product. Simply put, why is it that foreign gene expression in a microorganism such as *E. coli* occasionally fails? Why are there difficulties in transcription, translation, processing, etc.? Table 4 lists some of the technical difficulties encountered in attempts to obtain the efficient expression of eukaryotic genes in microorganisms. There is a variety of solutions to these problem situations. For example, if a particular

eukaryotic gene has codon usage pattern incompatible for the tRNA complement of the needed host microorganism, the gene (or parts of it) can be synthesized replacing the "true" codons with those more appropriate to the host in question. This does not appear to be a major problem for *E. coli* since several eukaryotic genes containing (apparently) rare *E. coli* codons can be expressed at high level. However, rare codons may slow down translation and thereby influence secretion, proteolysis, folding, etc. The most obvious example of codon usage difficulties would be likely to apply when the yeast *Saccharomyces cerevisiae* is used as the host microorganism (7). However, yeast as a host vector system is still in a relatively early stage of development compared to *E. coli* and with the success of high level gene expression in *E. coli*, yeast expression systems do not appear to offer many advantages for eukaryotic protein production at the moment.

Table 4: Some potential problems in gene cloning and expression in microorganisms

| | |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Cloning: | Finding the gene, rare sequence, rare messenger RNA, uncharacterized protein |
| Expression: | Transcriptional loop-back, nucleases, ineffective codon usage, lethal protein |
| Processing: | Proteases, insolubility |
| Activity: | Lack of post-translational modification, co-factor requirements |

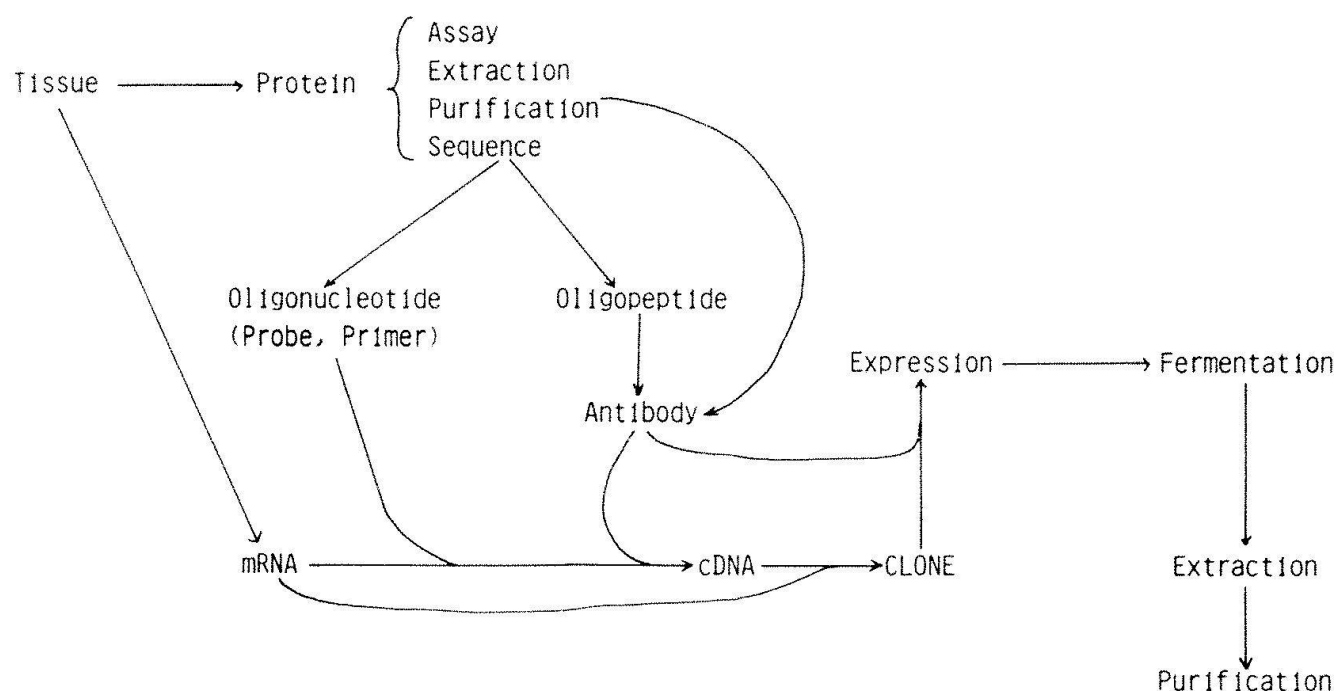


Figure 1. An outline of the steps involved in the cloning, expression and processing of a mammalian gene and its product.

On the other hand, mammalian cell expression systems (8) may prove to be effective alternatives especially when post translational modifications have been identified as critical for the activity of a given protein. Modifications such as glycosylation and amidation do not seem to be common in bacteria or yeast and in fact do not seem to be essential, since at least for β -interferon the non-glycosylated form appears to retain full anti-viral and anti-proliferative activity (9). The difficulties may come when blood proteins are to be made (such as clotting factors) or when the antigenic and protective activity of a viral coat protein is dependent on appropriate post-translational modification. A substantial amount of work on the development of expression vectors and large scale culture with cheap medium components will be needed before we can expect the practical, commercial realisation of protein production in mammalian cells.

Thus, in spite of the fact that gene cloning has become almost a by-word, continued development and innovation will be necessary to guarantee the success of recombinant DNA techniques in the commercial production of human proteins. As a final thought we must not forget that protein chemistry is the beginning and end of all recombinant DNA procedures (Figure 1). Knowledge of protein sequence and biological activity is necessary at the start of every project. The development of methods to

release and purify mammalian proteins made in large amounts from microbes, in fully active but non-toxic or non-immunogenic forms will remain a priority as a prospect and a problem for all biotechnology industries.

References

1. H. J. Phaff. *Scientific American* 245, 52 (1981).
2. K. E. Davies. In "Genetic Engineering 3" (ed. R. Williamson) Academic Press. 1982, p. 143.
3. "Impacts of Applied Genetics". Office of Technology Assessment. 1981.
4. A. J. K. Clark *et al.* *Lancet* 1982 (ii) p. 354.
5. C. D. Callihan and J. E. Clemmer in "Microbial Biomass" (ed. A. H. Rose). Academic Press. 1979. p. 271.
6. K. Itakura *et al.* in "Recombinant DNA" (ed. A. G. Walton) Elsevier 1981. p. 273.
7. H. Grosjean and W. Fiers. *Gene* 18, 199 (1982).
8. D. H. Hamer in "Genetic Engineering" (eds. J. K. Setlow and A. Hollaender). Plenum Press. 1980. Volume 2. p. 83.
9. E. Knight jr. and D. Fahey. *J. Interferon. Res.* 2 421 (1982).

Address of the author:

Prof. Dr. Julian Davies
Département des Biotechnologies
Institut Pasteur
78, rue du Dr Roux
F-75724 Paris-Cedex 15

Natur und Chemie

Karl Heusler

Natur und Chemie. Oder sollte es nicht eher heissen: Natur oder Chemie? Oder ist vielleicht die Chemie eine Erscheinungsform der Natur und sind viele natürliche Abläufe und Vorgänge nicht letztlich durch chemische Reaktionen verursacht, gesteuert oder überhaupt erst möglich? Wenn wir uns über Naturforschung im Dienste des Gemeinwohls unterhalten wollen, dann gehören solche Fragen genau so sehr zum Thema wie die heute so sehr viel populärere Assoziation mit rauchenden Kaminen, Umweltverschmutzung und Gesundheitsschädigungen durch Chemikalien.

Es scheint mir deshalb gerechtfertigt, die Beziehungen zwischen Natur und Chemie oder zwischen Naturwissenschaft und Chemie unter drei verschiedenen Gesichtspunkten zu betrachten: Zuerst wollen wir uns mit der sich wandelnden Stellung der Chemie in der Naturwissenschaft auseinandersetzen, dann soll das Janusgesicht der Chemie als wissenschaftliche Disziplin einerseits und als Technologie andererseits betrachtet werden und schliesslich werden wir uns kurz mit Fragen nach dem Sinn der Fortsetzung der naturwissenschaftlichen Forschung, insbesondere der chemischen Forschung in unserer Zeit und unserer Gesellschaft beschäftigen.

Die Stellung der Chemie in der Naturwissenschaft

Das Wort Chemie soll aus dem Ägyptischen stammen und «das Schwarze» bedeuten. Diesen Ruf der «schwarzen Kunst», des Geheimnisvollen, Unheimlichen und Gefährlichen, der keiner andern Naturwissenschaft anhaftet, hat die Chemie nie ganz ablegen können. Es ist eine nicht auszurottende Erbschaft der Alchemie, die sich als eine auf Mystik begründete Weltanschauung mit allerlei Symbolik umgab und sich die Suche nach dem «Stein der Weisen» zur Aufgabe machte. Dieser «Stein» sollte unedle

Metalle in edle verwandeln und sein Besitz verlieh ewiges Leben. Die heutige Chemie hat mit dieser Alchemie nichts gemeinsam und im Bereich der Wissenschaften hat die auf Experiment und Beobachtung basierende neue Chemie bereits im 18. Jahrhundert das alchemistische Denken völlig verdrängt. Dennoch ist im Denken vieler Zeitgenossen Chemie immer etwas Unheimliches und Gefährliches geblieben, wozu die allerdings auf rationaler Basis beruhende, aber für den Laien schwer verständliche Formelsprache des Chemikers das ihrige beiträgt.

In einem Lexikon aus dem Jahre 1945 werden die Naturwissenschaften als «Gesamtheit der Wissenschaften definiert, die sich mit den in der belebten und unbelebten Natur beobachtbaren und nicht durch den menschlichen Geist bedingten Gegebenheiten und Vorgängen beschäftigen». Unter den umfassten Gebieten findet sich die Chemie in guter Gesellschaft mit der Physik, der Botanik, der Zoologie, der Medizin und vielen anderen Wissenschaften. Die Mathematik wird in eine Sonderklasse verwiesen und als «Hilfsmittel und Voraussetzung für eine verfeinerte Naturwissenschaft» bezeichnet. Ob dies in einer Stadt, die mit den Bernouillis und mit Euler im 17. und 18. Jahrhundert entscheidend zur Entwicklung dieser Wissenschaft beigetragen hat, akzeptiert werden kann, soll offen bleiben. Tatsache ist aber, dass in den letzten Jahrzehnten die Grenzen zwischen den einzelnen Disziplinen der Naturwissenschaft verwischt worden sind: Namen wie Biophysik, Biochemie, Immunchemie, physikalische Chemie usw. sind Anzeichen dieser Grenzüberschreitungen. Noch etwas muss bei der Betrachtung der Bedeutung der Naturwissenschaften beachtet werden: In keinem Fach erfolgen die Entdeckungen und Entwicklungen stetig in einer regelmässigen Folge über viele Jahre. In jeder Wissenschaft gibt es Zeiten, in denen die Entwicklung stürmisch erfolgt, in denen bahnbrechende Neuentwicklungen das Gesicht eines

Fachs grundlegend verändern und die Erkenntnisse innert 10–15 Jahren in steilem Anstieg auf ein höheres Niveau anheben. Die Entwicklungen der physikalischen Messtechnik, der Quantenphysik und der gleichzeitigen Entwicklung der Computeranwendungsmöglichkeiten haben der Chemie in den 50er und 60er Jahren dieses Jahrhunderts eine solche steile Entwicklung erlaubt. Der heutige Wissensstand der Chemie erlaubt es nun, die Erkenntnisse, insbesondere auch auf dem Gebiet der Makromoleküle, für andere Naturwissenschaften nutzbar zu machen. Dieser Wandel in einer «Frontwissenschaft», von einer führenden Stellung zu einer unterstützenden zum allgemeinen Fortschritt der Naturwissenschaften beitragenden Disziplin mag für die Chemie schwerer zu verdauen sein als für die Mathematik, deren Hilfsfunktion offenbar bereits 1945 (oder schon früher) lexikon-notorisch war. Die Verdrängung vom Rampenlicht einerseits, in dem heute die Biologie und die Genetik stehen, die der Natur wesentlich näher zu sein scheinen und vielleicht darum eine weit grössere Anziehungskraft auf die jungen Naturwissenschaftler ausüben, und andererseits der Ruf als «böse», schädliche Disziplin stellen die Chemie heute vor ernsthafte Nachwuchsprobleme. Meines Erachtens hat die Chemie dies nicht verdient, weil die Chemie zu den Entwicklungen der modernen Molekularbiologie, der Molekulargenetik und vielen anderen Disziplinen Wesentliches beigetragen hat und noch heute beiträgt und auf diese Weise massgebend an den Resultaten, die aus diesen Wissenschaften zur Förderung des Gemeinwohls hervorgehen, beteiligt ist.

Das Janusgesicht der Chemie

Die Skepsis unserer Zeit richtet sich wohl nicht primär gegen die Chemie als Wissenschaft, sondern gegen das zweite Gesicht der Chemie: die chemische Technologie, wie sie ihren Ausdruck in der chemischen Industrie und ihren Produkten findet. Und doch ist dies nur eine Seite der Chemie und es lohnt sich, auf die andere näher einzugehen.

Bis ins 19. Jahrhundert hinein hielt man es für unmöglich, Verbindungen, welche von Pflanzen und Tieren erzeugt wurden, künstlich mit chemischen Methoden herzustellen. Die lebendige Natur und die Chemie, die sich mit der

toten Materie auseinandersetzen, waren zwei verschiedene Dinge, zwischen denen es keine Verwandtschaft gab. Natürliche Verbindungen verdankten ihre Entstehung dem Wirken der besonderen «vis vitalis». Umgekehrt konnten die «rohen und gemeinen unorganischen Kräfte», welche die Umsetzungen der anorganischen Materie bestimmen, in der lebenden Natur keine Rolle spielen. Erst 1824 mit der Synthese von Oxalsäure, dem Inhaltstoff der Blätter des Sauerklees, aus Dicyan und 1828 mit der Synthese von Harnstoff aus Ammoniumcyanat schlug Friedrich Wöhler die Brücke zwischen Chemie und belebter Natur. Die Rolle der Chemie in der Natur wurde in der Folge Schritt um Schritt besser erfasst und verstanden.

Die Chemie als Lehre von den Grundstoffen und Verbindungen, aus denen sich die tote und lebendige Materie aufbaut, ihren Eigenschaften und ihrer Fähigkeit, miteinander gegenseitig Verbindungen einzugehen, umgibt uns täglich, überall sowohl in der toten, wie in der belebten Natur. Steine, Mineralien, natürliche und künstliche Baustoffe sind entstanden durch chemische Reaktionen und stellen wunderbare und komplizierte Strukturen dar, die der Chemiker in Formelbildern darstellt, deren Symbolik jedem Laien sonderbar erscheinen muss. Aber auch die belebte Natur vom Einzeller bis zur Pflanze oder zum Säugetier bedient sich chemischer Substanzen und Reaktionen im Zusammenhang mit der Fortpflanzung, zur Erhaltung und Regulation der Funktionen und zum Aufbau artspezifischer Strukturen. Dies gilt für den subzellulären, den Organ-Bereich und für die Gesamtorganismen. Es war übrigens ein Basler, Friedrich Miescher, der vor mehr als 100 Jahren Entscheidendes zur Entdeckung der beiden chemischen Grundstoffe, auf die sich die Biotechnologie, insbesondere das Genetic Engineering abstützt (nämlich die DNA und die Proteine), beigetragen hat: er isolierte nicht nur die Nukleinsäuren aus Leukozyten, sondern aus dem damals in Basel reichlich vorhandenen Salm auch basische Proteine, obwohl er den Zusammenhang zwischen den beiden Substanzklassen in keiner Weise vorausahnen konnte. Vor fast 100 Jahren (1885) gründete Miescher übrigens das sich unmittelbar neben diesem Gebäude befindliche Vesalianum, das erste Physiologische Institut der Schweiz.

Es sind auch chemische Strukturen in den Zellwänden, die für die in der Immunologie so

wichtigen Reaktionen zwischen Antigenen und Antikörpern bestimmend sind, und ihre Kenntnis verspricht für die kommenden Jahre neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Vakzine und der Chemotherapie, längerfristig wohl auch der Krebstherapie.

Die Natur bedient sich allgemein zur Informationsvermittlung, zur Steuerung biologischer Reaktionen, chemischer Signale: Hormone und andere Messenger-Substanzen. Selbst bei einzelligen Organismen, z. B. bei Braunalgen, lösen chemische Substanzen Ereignisketten aus, die ein zielgerichtetes physiologisches Verhalten einleiten, das schliesslich dazu führt, dass die Geschlechtszellen ihren Partner finden können. Bakterien sprechen auf chemische Signale empfindlich an und richten ihre Vermehrung entsprechend ein. Wird eine Pflanze verletzt, so muss die Wasserzufuhr zur Wunde gedrosselt werden, damit kein allzugrosser Flüssigkeitsverlust entsteht. In gewissen Fällen scheinen chemische Signalstoffe, nämlich Polysaccharide, die durch die Verletzung freigesetzt werden, die notwendigen Reaktionen auszulösen. Die Signale, die bei Insekten die Verpuppung einleiten, sind chemische Verbindungen, die zur vorbestimmten Zeit freigesetzt werden. Zur Anziehung der Partner verwenden viele Insekten artspezifische Duftstoffe (Pheromone), deren chemische Struktur in vielen Fällen bekannt ist. Bei Säugetieren und beim Menschen übernehmen meist Proteine und Peptide, oder niedrig molekulare chemische Substanzen, wie die Katecholamine und Prostaglandine, Signalfunktionen, deren Auslösung durch Regelkreise oder äussere Einflüsse erfolgen kann. Die in Streßsituationen auftretende Ausschüttung von Adrenalin aus der Nebenniere, die die Abwehrbereitschaft steigern soll, gehört in diese Kategorie. Auch für das situationsgerechte Verhalten, für unsere Gefühlslage und Stimmung, Schmerzempfindung und Freude, ist eine komplizierte Abstimmung der Signalübertragung im menschlichen Nervensystem erforderlich, die durch eine grosse Zahl bekannter «Neurotransmittoren» reguliert wird.

Warum erzähle ich Ihnen dies alles? Um Ihnen zu zeigen, dass in ganz wesentlichen Teilen und in hohem Masse die Natur Chemie ist, dass Naturforschung ohne Chemie undenkbar ist. Sollen wir aber darüber die anderen Erscheinungsformen der Chemie, ihre industrielle Anwendung, aber auch die unheimliche, gefährliche, schädliche Seite vergessen? Sicher nicht!

Behördliche Verordnungen zum Schutz der Bevölkerung vor schädlichen Einflüssen existierten in Basel bereits 1853: Die Fabrikation chemischer Produkte bedurfte einer Konzession des Kleinen Rates und diese wurde nur erteilt, wenn die geplanten Betriebe in baulicher, feuerpolizeilicher und sanitärer Hinsicht zu keinen Beanstandungen Anlass gaben. Die Konzession, die Alexander Clavel zum Betrieb seiner Anilinfabrik zwischen Klybeckstrasse und Unterem Rheinweg, dem heutigen Areal der CIBA-GEIGY, am 8. Juni 1864 erhielt, umfasste spezifische Vorschriften für den Schutz der Arbeiter und Nachbarn vor gesundheitsschädigenden Einflüssen. Klagen über verpestete Luft und Flurschäden wurden vom «öffentlichen Chemiker» und vom Stadtphysiker in jedem einzelnen Fall gewissenhaft geprüft und es wurden Empfehlungen an die Regierung ausgearbeitet, wie solche Belästigungen und Schäden vermieden werden könnten. Die Einsicht, dass nicht nur die Erforschung neuer Verfahren zur Herstellung von Produkten, sondern ebenso der Schutz der Umwelt zu den Aufgaben der naturwissenschaftlichen Forschung gehört, ist ebenfalls nicht eine Erkenntnis der letzten Jahrzehnte. Schon 1864 rief die Regierung aus Anlass einer Brunnenvergiftung durch Chemikalien im Kleinbasel anerkannte Experten zu einer Untersuchung nach Basel: Prof. A. Escher von der Linth aus Zürich und Prof. H. von Fehling aus Stuttgart. Sie unterbreiteten Vorschläge zur Behebung der Schäden und zur Verbesserung der Fabrikeinrichtungen, um solche Fälle in Zukunft zu verhindern.

Umweltschutz war also schon vor mehr als 100 Jahren eine der Aufgaben der chemischen Forschung. Eine Intensivierung der Anstrengungen in dieser Richtung unter Einsatz der modernsten Methoden sowohl zur Diagnose der schädlichen Einflüsse als auch zu ihrer Behebung ist sicher notwendig. Viel wurde in letzter Zeit z. B. über die «bedenkliche» Zunahme des Kohlendioxyd-Gehalts der Luft geschrieben, der durch den gesteigerten Verbrauch fossiler Brennstoffe durch Verkehr, Haushalt und die Industrie zustandekommt. In alarmierenden Artikeln wurde uns die Umwandlung unseres Planeten in ein Riesentreibhaus mit den Konsequenzen tiefgreifender klimatischer Veränderungen, dem langsamen Abschmelzen der Eisdecken des Nord- und Südpols und dem Anstieg des Meeresspiegels vor Augen geführt. Die sorgfältigen Untersuchungen, an denen Prof. H. Oeschger

aus Bern massgeblich beteiligt ist, bestätigen zwar einen Zusammenhang zwischen der CO_2 -Zunahme in der Biosphäre und einem Temperaturanstieg von etwa $0,4^\circ\text{C}$ in den letzten 100 Jahren. Aber verschiedene andere Faktoren bewirken, dass diese Temperaturzunahme (die übrigens in der Erdgeschichte keineswegs einmalig ist) nicht stetig erfolgt. Ebenso wenig sind die Konsequenzen der beobachteten Veränderungen mit Sicherheit voraussagbar. Zur Erklärung der Phänomene sind nicht nur ein Verständnis des gesamten Umweltsystems, sondern auch weitere sorgfältige Untersuchungen zur Erarbeitung einer soliden Wissensgrundlage notwendig. Extrapolationen ohne Berücksichtigung aller Faktoren können zu falschen oder übertriebenen Voraussagen führen. Häufig tritt übrigens die Natur selbst als Regulationsfaktor auf.

Auch die Chemie kann an solchen Regulationen beteiligt sein: Ende der 50er Jahre wurde aufgrund der damaligen Geburten- und Sterberaten für das Jahr 2000 eine Weltbevölkerung von 7,5 Milliarden Menschen vorausberechnet. In einem kürzlichen Bericht des Bevölkerungsfonds der Vereinten Nationen wurde diese Voraussage auf 6,1 Milliarden korrigiert: fast 20% weniger als die erste Extrapolation. Viele Faktoren haben zu dieser Veränderung beigetragen, vor allem auch erzieherische und soziale. Der Einfluss der Pille kann dabei aber nicht ausser acht gelassen werden.

Wertlos sind solche Extrapolationen dennoch keineswegs. Sie sollen uns warnen und frühzeitig auf mögliche Gefahren aufmerksam machen, sollen uns aber auch anregen, Gegenmassnahmen zu ergreifen. Niemand kann bestreiten, dass die Umwelt, die Luft und das Wasser, durch Schadstoffe, die die Industrie produziert, deren Produkte wie freizügig konsumieren und benützen, belastet wird. Aber genauso wenig wie die Extrapolation der Werte des CO_2 -Gehalts alle Aspekte berücksichtigt, genauso wenig dürfen wir ähnliche Extrapolationen bei der Umweltbelastung vornehmen. Wie Prof. Oeschger in einem Vortrag vor der Berner Chemischen Gesellschaft kürzlich dargestellt hat, stammen zu einem grossen Teil die Schadstoffe, die heute an die Umwelt abgegeben werden, aus Anlagen, die technisch überholt sind und die, gemäss seinen Worten «aus der industriellen Pfahlbauerzeit» stammen. Es ist eine vornehme Pflicht der Naturforschung, an der Verbesserung und am Ersatz solcher An-

lagen unablässig zu arbeiten. Chemie kann und soll dazu ihren Beitrag leisten. Die wissenschaftlichen Voraussetzungen dafür sind gegeben. Wir, als Bürger und Konsumenten, müssen auch dafür sorgen, dass die ökonomischen Voraussetzungen vorhanden sind. Die Verbesserung des Nutzen-Risiko-Verhältnisses durch die chemische Forschung ist übrigens keineswegs eine Aufgabe der Chemie, die erst in unserem Jahrhundert erfunden oder erkannt wurde. Vor 100 Jahren entwickelte z. B. Prof. Schwarzenbach in Bern die ersten ungiftigen, d. h. phosphorfreien Zündhölzer, was schon damals als grosser Fortschritt betrachtet wurde.

Auf die Beiträge, die chemische Produkte zur Befriedigung unserer täglichen Bedürfnisse in Kleidung und im Wohnkomfort liefern, kann im Zusammenhang mit dem Thema dieses Symposiums nicht eingegangen werden.

Der grosstechnische Einsatz von Mikroorganismen für die Herstellung von chemischen Produkten, ohne Einsatz fossiler Rohstoffe, z. B. die Gewinnung von Zitronensäure, Glutaminsäure, und von Antibiotika, ist bekannt. Weniger bekannt ist hingegen der mikrobiologische Bergbau (2) als energiesparende Alternative zur Verhüttung von Erzen. Mehr als 10% der amerikanischen Kupferproduktion wird auf diese Weise gewonnen. Dabei wird minderwertiges Erz mit angesäuertem Wasser begossen. Während das Wasser durch die Ablagerung sickert, wächst der im sulfidhaltigen Gestein ubiquitäre *Thiobacillus ferrooxidans*, der das Gestein auflöst und dabei Eisen⁺²- in Eisen⁺³-Ionen umwandelt. Diese wiederum oxidieren die Sulfidminerale und bilden dabei Kupfersulfat, das gelöst wird, und aus dem ausfliessenden Wasser kann schliesslich Kupfer gewonnen werden. Dass diesem Bakterium und seinen Verwandten (wie etwa dem *Sulfolobus acidocaldarius*) weder die Säure noch die Temperatur, die bis gegen 80° erreichen kann, etwas anhaben können, ist bemerkenswert.

Man mag sich zur Verwendung chemischer Düngemittel, zur Verwendung von Pestiziden und Herbiziden stellen wie man will. Es bleibt eine Tatsache, dass ohne den Einsatz dieser Mittel die Ernährungslage der Weltbevölkerung wesentlich prekärer wäre und noch mehr Menschen Hunger leiden müssten. Es ist gedanklich unrichtig, von natürlicher und chemischer Düngung zu sprechen. Stickstoffassimilation ist eben auch ein chemischer Vorgang; aber es ist verhängnisvoll, die Möglichkeiten der

Chemie in der Natur nicht in die Gesamtbeurteilungen einzubeziehen und z. B. die Steigerung der Stickstoffassimilation durch geeignete, biologische Systeme zur Verminderung der Stickstoffdüngung durch anorganische Dünger zu vernachlässigen. Wenn in Indien zeitweise bis zu einem Drittel der Ernte bei der Lagerung durch Schädlinge (z. B. Ratten) zerstört wird, so wird wohl kaum jemand dies als «natürlich» und deshalb «gut» bezeichnen. Dass unter anderem zum Schutz der Ernte auch chemische Mittel eingesetzt werden, solange andere z. B. hygienische und bauliche Massnahmen nicht zum Erfolg führen, scheint sinnvoll, solange das Risiko der Schädigung von Mensch und Tier gering ist im Vergleich zum Nutzen durch die verbesserte Ernährungssituation.

Auch bei der Verwendung von Pestiziden und Herbiziden steht heute die Nutzen/Risiko-Betrachtung eindeutig im Vordergrund. Es ist das Privileg der naturwissenschaftlichen Forschung, aus Fehlern der Vergangenheit zu lernen und bessere Lösungen zu finden. Auch hier gilt nicht Natur oder Chemie, sondern viel eher Chemie *und* Natur, d.h. möglichst optimale Ausnutzung, Förderung und Nachahmung natürlicher chemischer Vorgänge, leicht biologisch abbaubare Insektenlockstoffe, Regulatoren der Vermehrung der Schädlinge, die durch das (nicht für sie bestimmte) Überangebot an Nahrung ausser Kontrolle geraten sind, sind Zielrichtungen der modernen Forschung. Ich zweifle allerdings daran, dass es uns in unserer überbevölkerten Welt gelingen wird, ohne Eingriffe zu einem ökologischen Gleichgewicht zurückzukehren. Zu weit haben wir uns von diesem Ideal-Zustand entfernt und die Mehrheit der Bewohner der industrialisierten Welt wäre kaum bereit, die Einbussen an Komfort in Kauf zu nehmen, die mit der Rückkehr zu diesem «Ideal-Zustand» verbunden wären.

Die enge Beziehung zwischen Gesundheit und Natur rechtfertigt auch einige Worte zum Einfluss der Chemie auf unsere Gesundheit. Niemand wird den positiven Einfluss, den Produkte der pharmazeutischen Industrie auf die Gesundheit in der industrialisierten Welt gehabt haben, bezweifeln und jedermann wird bedauern, dass es bis heute nicht gelungen ist, die Entwicklungsländer in gleichem Masse an diesem Fortschritt teilhaben zu lassen. Auch dieser Fortschritt kann nicht ohne Risiko sein, wobei wir uns sowohl bei der Bestimmung des Nutzens als auch des Risikos hüten müssen, vom

Einzelfall ausgehend, unbesehen zu verallgemeinern. Sicher hat z. B. die Zahl der Krebskranken in den letzten 25 Jahren stark zugenommen. Sorgfältige Untersuchungen der Amerikanischen Cancer Society und die Regierungsstatistiken zeigen aber, dass das Krebsrisiko in den USA in den letzten 25 Jahren schwach abgenommen hat, wenn man die durch die längere Lebensdauer und den vermehrten Zigarettenkonsum verursachte Zunahme in Rechnung stellt. Der oft zitierte Satz, dass «90% der Krebsfälle durch die Umwelt verursacht sind» stimmt nur dann, wenn wir unter Umwelt die gesamte Umwelt verstehen. In einer sorgfältigen Untersuchung haben die zwei englischen Epidemiologen Doll und Peto (3) festgestellt, dass die drei wichtigsten Ursachen von Krebskrankheiten Rauchen, unrichtige Ernährung und Infektionen sind, die zusammen für etwa $\frac{3}{4}$ der Erkrankungen verantwortlich sind. Ihrer Meinung nach tragen Umweltverschmutzungen, Medikamente, Nahrungsmittelzusätze und andere industrielle Produkte nur etwa 5% bei. Diese Daten sind nicht unwidersprochen geblieben, aber auch andere Autoren sind mit Doll und Peto der Überzeugung, dass Rauchen, falsche Ernährung und extensive Sonnenbestrahlung weit gefährlicher sind als Chemikalien.

«Nichts ist ohne Gift» sagte vor fast 500 Jahren Paracelsus, der auch in dieser Stadt lehrte und er schloss dabei die Natur keineswegs aus. In der Tat sind die stärksten der uns bekannten Gifte, die schon in Bruchteilen von Milligrammen für den Menschen tödlich wirken, Naturprodukte, wie z. B. das Gift des japanischen Pufferfischs (Tetrodotoxin) oder dasjenige aus einem südamerikanischen Frosch (Batrachotoxin) oder die noch etwa 100000mal giftigeren Botulinus-Toxine aus Bakterien der Art *Clostridium botulinum*. Viel wurde in den letzten Jahren über die Schädlichkeit synthetischer Lebensmittelfarbstoffe und Arzneimittelfarbstoffe diskutiert und ihr Ersatz durch natürliche Farbstoffe gefordert. Unter diesen wurde, insbesondere in Japan, Karamel, gebrannter Zucker, genannt. Genaue Untersuchungen ergaben dann, dass beim Erhitzen des Zuckers mutagene Stoffe entstehen, die wahrscheinlich gefährlicher sind als die synthetischen Farbstoffe. Dass unsere eigene Speichelflüssigkeit zu Zeiten beträchtliche Mengen Nitrit enthält, welches Nahrungsmittel-Bestandteile im Magen in carcinogene Nitrosamine umwandelt, sei nur als weitere Illustration erwähnt.

Es kann also keineswegs so sein, wie es leider oft dargestellt wird, dass das Natürliche harmlos und risikofrei, Chemisches gefährlich und giftig ist. Vergessen wir nicht, dass die Drogen wie Alkohol, Marihuana, Cocain, Morphin und andere, die unserer Gesellschaft heute so viele Sorgen bereiten, ebenfalls Naturprodukte sind. Dass ein so komplizierter Mechanismus wie derjenige des Menschen sich der ständigen Bedrohung durch schädliche Einflüsse durch Chemikalien, natürliche und synthetische, in den allermeisten Fällen erfolgreich erwehren kann, sollte uns mit Bewunderung erfüllen. Die Kräfte, die dieses Wunder vollbringen, zu erforschen und gegebenenfalls durch geeignete Massnahmen zu unterstützen, ist Teil der faszinierenden Aufgabe der naturwissenschaftlichen Forschung.

Zum Sinn wissenschaftlicher Forschung

Ist nun diese wissenschaftliche Forschung sinnvoll, sinnvoll im Dienste des Gemeinwohls?

Dies ist keine wissenschaftliche Frage. Das Ziel eines Wissenschaftlers, des Naturwissenschaftlers und des Chemikers ist es, primär die Erkenntnis zu mehren und zu verstehen, welchen Sinn Einzelercheinungen und Substanzen als Teile eines funktionierenden Ganzen besitzen. Die Rolle des Chlorophylls in der Photosynthese der Pflanzen, die Rolle der Pheromone für die Fortpflanzung der Insekten, die Rolle der Gene für die artspezifische Entwicklung macht die Erforschung dieser Stoffe sinnvoll. Dabei geht der Biologe und Chemiker stillschweigend davon aus, dass biologische Systeme optimierte, zweckmässige Systeme ohne nutzlose Teile sind.

Nach Max Planck «ist die Forderung an den Wissenschaftler, er solle die möglichen Folgen seiner Arbeit voraussehen und im voraus sittlich verantworten, prinzipiell unerfüllbar». Für den Wissenschaftler ist Erkenntnis immer gut. Allerdings ist die Anwendung von Erkenntnis in der Praxis immer ambivalent und die Beurteilung einer technischen Leistung nach gut und böse hängt vom jeweiligen Standpunkt und vom Zeitpunkt ab, von den Rahmenbedingungen und vom ideologischen oder ethischen Vorurteil. Der Konflikt zwischen Erkenntnis und Glaubenswahrheiten oder politischen Ideologien ist deshalb unvermeidlich. Politische Ideo-

logien verzichten absichtlich auf Objektivität und Wahrheit. Sie weisen Informationen ab und suchen den rationalen Dialog nicht. Dies hat schon Hans Mohr, Professor für Allgemeine Biologie und Botanik in Freiburg i. Breisgau festgestellt. Er sagt: «Ein standfester Ideologe akzeptiert Information nur dann, wenn sie in sein vorgeprägtes Überzeugungsmuster passt». Sie alle erinnern sich an die Geschichte des russischen Pflanzengenetiklers Trofim Denisovich Lysenko (1898–1976). Seine Theorie, dass die äussere Umwelt die Erbeigenschaften, insbesondere bei Pflanzen, vermutlich aber bei allen Lebewesen, verändern kann, stützte die Marxistische Theorie und wurde deshalb unter Josef Stalin und Nikita Chruschtschew zum Dogma erklärt. Während mehr als 30 Jahren verhinderte Lysenko als Präsident der Lenin-Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der UdSSR jegliche echte Forschung auf dem Gebiet der Genetik. Russische Wissenschaftler, die an Lysenkos Theorien zweifelten, wurden in die Verbannung geschickt. Erst nach Chruschtschews Sturz 1964 verschwand auch Lysenko in der Versenkung. Die unselige Episode Lysenko hat die russische Forschung auf dem Gebiet der Genetik und Biotechnologie um Jahre zurückgeworfen und der Rückstand ist noch heute deutlich fühlbar. Obwohl in unseren westlichen Demokratien keine Dogmen dem Dialog zwischen Wissenschaften einerseits und den Politikern andererseits entgegenstehen, ist das Gespräch zwischen dem Forscher und dem Ideologen keineswegs immer leicht.

Es ist deshalb unsere Aufgabe als Forscher und Naturwissenschaftler, diesen Dialog immer wieder zu suchen. Weil wir dank unserer Ausbildung die Möglichkeit haben, sowohl positive als auch negative Folgen unserer wissenschaftlichen Tätigkeit zu erkennen, ist es unsere Pflicht, im Rahmen unserer Möglichkeiten zur Optimierung der positiven und zur Minimierung der negativen Folgen beizutragen.

Lassen Sie mich mit einem Zitat aus einem Artikel des oben zitierten H. Mohr schliessen, dem ich mich voll anschliesse: «Die eigentliche Gefahr für unser Weiterleben liegt nicht in der Bedrohung durch die äusseren Ereignisse – so schwierig die Dinge auch liegen – sondern im Erlahmen unserer geistig-moralischen Kraft, den Herausforderungen unserer Zeit sinnvoll und kraftvoll zu begegnen... In einem Punkt sollte aber Konsens bestehen. Die Zukunft ist

nicht determiniert. Die technische Entwicklung unserer Zeit ist kein Naturprozess, der sich der menschlichen Steuerung und unserer Verantwortung entzöge. Die Umstände lassen uns vielmehr einen weiten – wenn auch keinen beliebigen – Spielraum der Freiheit, in dem wir konstruktiv denken und mutig handeln können. Wir müssen es nur wollen. Wir dürfen von der Überzeugung nicht lassen, dass *wir* die Zukunft formen. Wir dürfen nicht die Bequemlichkeit des Denkens kultivieren, die verlogene alternative Versagung, die Lust am Nein-Sagen, die Freude an der Angst».

Literatur

1. L. Jaeniker und W. Boland: Angew. Chemie 94, 659–670 (1982).
2. C. L. Brierley: Scientific American, August 1982, 42–51.
3. R. Doll und R. Peto: J. of the National Cancer Institute, Juni 1981.

Adresse des Autors:

Dr. Karl Heusler
CIBA-GEIGY
CH-4000 Basel

Inhalt

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>T. A. Freyvogel (Schweizerisches Tropeninstitut, Basel)</i> Rudolf Geigy zum 80. Geburtstag | 55 |
| <i>A. Aeschlimann (Université de Neuchâtel), S. Schneeberger (Université de Neuchâtel), K. Pfister (Université de Berne), W. Burgdorfer (National Institute of Allergy and Infectious Diseases, Hamilton, Montana, USA), et A. Cotty (Université de Neuchâtel)</i> Données nouvelles sur les Tiques Ixodides du canton du Tessin (Suisse) et sur la présence d'agents rickettsiens dans leur hémolymphe | 58 |
| <i>W. Burgdorfer, A. G. Barbour, S. F. Hayes, O. Péter (National Institute of Allergy and Infectious Diseases, Hamilton, Montana), A. Aeschlimann (University of Neuchâtel, Switzerland)</i> Erythema chronicum migrans – a tickborne spirochetosis | 70 |
| <i>N. Weiss (Schweizerisches Tropeninstitut, Basel)</i> Die Bedeutung der Immunologie für die Diagnose und die Bekämpfung parasitärer Krankheiten | 79 |
| <i>H. Hecker (Schweizerisches Tropeninstitut, Basel)</i> Blutverdauung bei Insekten | 83 |
| <i>L. Jenni (Schweizerisches Tropeninstitut, Basel)</i> Tsetse-Fliegen, Trypanosomen und Schlafkrankheit | 86 |
| <i>A. A. Degrémont (Schweizerisches Tropeninstitut, Basel)</i> Bilharziose et réalités de terrain: Réflexions sur son épidémiologie et son contrôle. | 88 |

Rudolf Geigy zum 80. Geburtstag

Thierry A. Freyvogel

Sehr geehrte Damen und Herren,
liebe Kolleginnen und Kollegen,

in diesem Kreis erübrigt es sich, Prof. Rudolf Geigy vorzustellen. Wer heute in diesem Saal sitzt, bekundet dem Jubilaren seine Anerkennung, Hochachtung oder Verbundenheit, für seine frühen, wegweisenden Arbeiten auf dem damals sich neu entfaltenden Gebiet der Entwicklungsphysiologie, für seine Beiträge an die Kenntnisse um die Übertragung tropischer Krankheitserreger, für seine mannigfaltigen Leistungen zugunsten des Naturschutzes im In- und Ausland, für seine aktive Beteiligung an den Bestrebungen der Schweizerischen Naturforschenden und anderer wissenschaftlicher Gesellschaften oder auch für früher genossenen Unterricht, dem viele unter uns ein gutes Stück Natur-Begeisterung bis zum heutigen Tag verdanken. Ein Leben also der «Naturforschung im Dienste des Gemeinwohls»!

Sie wissen es: am 20. Dezember 1982 wird Herr Geigy die Vollendung seines 80. Lebensjahres begehen können. Ihm im Hinblick auf diesen Markstein unsere Glückwünsche mitzugeben, haben wir uns versammelt. Der «Zufall» will es, dass die SNG, deren Jahrespräsident er 1970 war und dessen Senat er während 12 Jahren angehörte, just heuer wieder in Basel tagt. Wie hätten wir diese Gelegenheit ungenützt verstreichen lassen sollen? – Die Auswahl der Themen und der Redner fiel allerdings schwer. Wenn es hätte darum gehen können, Herrn Geigys Tätigkeit und Ausstrahlung umfassend darzustellen, hätten ebenso Insekten-Spezialisten, Ornithologen, Tiergärtner, Ökologen, Entwicklungshelfer, Filmschaffende und noch manche andere, meiner eigenen und bereits der nachfolgenden Forscher-Generation, zu Worte kommen müssen. Doch schon nur aus zeitlichen Gründen waren Grenzen zu setzen; so beschränkten sich die Veranstalter des heutigen Anlasses auf das, was im Wirken Prof. Geigys im Zentrum stand, nämlich auf «Erreger und

Überträger tropischer Krankheiten» (Geigy und Herbig 1955), wobei auch dieses Thema fachlich, räumlich und sprachlich noch weit genug gefächert ist.

Lieber Ruedi!

10 Jahre sind seit Deinem Rücktritt vom Posten eines Instituts-Vorstehers vergangen. 20 Jahre sind seit Deiner Rektoratsrede «Der Sprung in die Selbständigkeit» (Geigy 1962) verflossen. Und nahezu 40 Jahre sind es, seit Du das Schweizerische Tropeninstitut ins Leben riefst. Die 10 Jahre seit der Emeritierung nütztest Du zunächst, um Dein Forscherwerk abzurunden. Ein Dutzend wissenschaftlicher Veröffentlichungen fügtest Du den bereits vorhandenen 120 Publikationen bei, worunter die originellen Untersuchungen zur Möglichkeit der Trypanosomen-Übertragung durch blutsaugende Fliegenmaden (Geigy und Kauffmann 1977) und die für Deine praxisorientierte Fragestellung so bezeichnenden Arbeiten über die Bedeutung von Wasserdurchlässen unter Strassen in afrikanischen Wildgebieten für die Epidemiologie der Schlafkrankheit (Geigy et al. 1976). Dass Feldarbeiten die Liste Deiner wissenschaftlichen Veröffentlichungen krönen, dürfte wiederum kein Zufall sein; Du hast damit das Tropeninstitut und die biomedizinische Forschung überhaupt an einen Weg erinnert, der vielleicht zu lange vernachlässigt wurde.

Sodann landetest Du fast unbemerkt unter den Verfassern von Kriminalgeschichten. Auf «Siri – Top Secret» (Geigy 1977), was als signalfarbener Coup de théâtre Aussenstehenden Dein début d'écrivain verkündete, folgten allerhand Geschichten von Curchows, Orangs, Sandflöhen, auf Ballonfahrten, einsamen Inseln oder selbst in Venusfähren. Doch kam der Zeitpunkt, da Dein Doppelgänger «Schlumberger» wusste, «dass ihm etwas (Neues) auferlegt war:

Geduldig in sich selber ruhen; fernen und näheren Geräuschen lauschen; vom schmalen, blütenreichen Garten hereinströmende Düfte einatmen; die hin- und herflitzenden Vögel mit dem Blick verfolgen, in der Nähe auch die Bienen, Schwebefliegen und Hummeln, welche die bald welkenden Glyzinien mit einem an Torchlusspanik erinnernden Eifer penetrant heimsuchen» (Geigy 1978). Solcher Intensität verinnerlichten Schauens und ehrfürchtigen Stauens ist wohl nur derjenige fähig, der im Laufe seines Lebens vieles genau beobachtete und festhielt. Dass Dir, Ruedi, dieses erfüllende *Otium cum dignitate* in so reichem Masse beschert wird, gereicht auch uns zur grössten Freude.

Vor 20 Jahren hieltest Du in der Martinskirche zu Basel, als Rektor der Universität, Deine Rede «Der Sprung in die Selbständigkeit – Entwicklungshilfe und Menschheitsproblem» (Geigy 1962). Es war dies ein Jahr, nachdem wir mit Hilfe der Basler Stiftung zur Förderung von Entwicklungsländern unsere Lehrtätigkeit in Ifakara aufgenommen hatten, knapp ein Jahr, nachdem das damalige Tanganjika die politische Unabhängigkeit erlangt, und rund zehn Jahre, nachdem «Entwicklungshilfe» im Bewusstsein der Öffentlichkeit Fuss zu fassen begonnen hatte. Man könnte heute, angesichts der bedrückend schlechten ökonomischen Entwicklung der Mehrzahl der Entwicklungsländer und angesichts der drohenden Balkanisierung zahlreicher afrikanischer Staaten, der Versuchung leicht erliegen, die Idee der «Entwicklungshilfe» als eine wohlgemeinte Illusion bitteren Herzens (oder auch höhnischen Sinnes) abzuschreiben. In solcher Lage mag der Rückgriff auf Gedanken helfen, die man zu Beginn der fraglich gewordenen Unternehmung hegte, und mag es tröstlich sein, sich Deiner warnenden Worte zu erinnern, mit welchen Du sagtest: «Wir stehen erst am Anfang und es wäre vermessen, ein Urteil darüber abzugeben, wie dieses grosse Experiment ausgehen wird. Indem wir daran teilnehmen, müssen wir ohne Angst vor Risiko oder Misserfolg jederzeit bereit sein, uns vor Unerwartetem zu beugen und uns zurückzuziehen, oder aber, wer kann es sagen, uns mitzufreuen über neue Akzente, welche die heute aufstrebenden Völker in das Getriebe der Welt bringen werden. Die Zukunft ist keineswegs ohne Hoffnung, und leuchtende Säume überstrahlen die dunklen Wolken ...» (Geigy 1962). – Leuchtende Säume: Was anderes be-

deutet es, dass heute in Ifakara mehr Backsteinhäuser stehen, als je zuvor? Was anderes, dass wir heute in der Lage sind, mit einem District Medical Officer kollegial zusammenzuarbeiten? Und was anderes, wenn es gelingt, die ortsansässige Bevölkerung zur eigenständigen Selbsthilfe anzuspornen? – Unerwartetes mag kommen, gewiss; wir aber glauben nach wie vor und gewissermassen dem Schein zum Trotz an den Wert einer richtig verstandenen Entwicklungszusammenarbeit, an den Wert der Beziehungen von Mensch zu Mensch, von Schwarz zu Weiss, und damit auch an die Zukunft.

Nächstes Jahr werden es 40 Jahre her sein, seitdem Du als Sekretär des Initiativkomitees mit der versuchsweisen Gründung eines Schweizerischen Tropeninstituts beauftragt wurdest (Schweiz. Tropeninstitut, 1943). Dass sich dieses Institut hielt und dass es zu einem ansehnlichen Betrieb schweizerischen Forscher- und Unternehmungsgeistes heranwuchs, schulden wir, Ruedi, vor allem Dir. Dafür, wie es sich weiterentwickeln wird, werden vor allem die Qualität der erbrachten Leistung und die Zusammenarbeit, institutsintern und -extern, massgebend sein. Darüber hinaus aber wird das Institut in den kommenden Jahren in ganz besonderem Masse auf das Verständnis der Behörden angewiesen bleiben; ohne Geld kann auch die best motivierte Mannschaft nicht forschen! In der Zwischenzeit gewährt uns die von Dir errichtete und nach Dir benannte Stiftung eine unschätzbare Bewegungsfreiheit. Es sei deshalb bei der heutigen Gelegenheit auch Deiner materiellen Grosszügigkeit in Dankbarkeit gedacht.

Mit diesem fragmentarischen Rückgriff auf Dein Wirken wollte ich Dir, Ruedi, zeigen, wie hoch wir Deine frühere Tätigkeit auch heute einschätzen. Mehr noch: Dein Werk wird von vielen fortgeführt, die sich vielleicht wie ich als Akteure der *einen* Menschheits-Geschichte sehen, von den Vor- und Nachfahren allein durch die Zeit getrennt. Lassen Sie mich diese unsere Verbundenheit am einfachsten ausdrücken, indem wir wiederholen, was wir Herrn Geigy bereits vor 10 Jahren zuriefen: «Tunakupenda, Bwana Ngiri!» (Acta Tropica 1972), frei übersetzt: «Mir händ Di immer no gärn, Bwana Ngiri (Herr Warzesau)!»

Literatur

- Acta Tropica, 1972: Bwana Ngiri, Sonderheft zur Feier des 70. Geburtstages von Herrn Professor Rudolf Geigy am 20. Dezember 1972, Verlag für Recht und Gesellschaft, Basel.
- Geigy, R., Herbig, A., 1955: Erreger und Überträger tropischer Krankheiten. Acta Tropica Supplementum 6, Verlag für Recht und Gesellschaft, Basel.
- Geigy, R. 1962: Der Sprung in die Selbständigkeit. Basler Universitätsreden 48. Heft, Helbing & Lichtenhahn, Basel.
- Geigy, R., Boreham, P. F. L., Beglinger, R., Kauffmann, M. und Müller, R. 1976: Culverts and trypanosome transmission in the Serengeti National Park (Tanzania), Acta Tropica 33, 53–87.
- Geigy, R. 1977: Siri – Top Secret, Schwabe & Co., Basel.
- Geigy, R. und Kauffmann, M. 1977: Experimental mechanical transmission of Trypanosoma brucei by Auchmeromyia larvae. Protozoology, III, 103–107.
- Geigy, R. 1978: Kriminelles. Unveröffentlicht.
- Schweizerisches Tropeninstitut in Basel, Jahresbericht 1943.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. Thierry A. Freyvogel
Schweizerisches Tropeninstitut
Socinstrasse 57
CH-4051 Basel

Données nouvelles sur les Tiques Ixodides du canton du Tessin (Suisse) et sur la présence d'agents rickettsiens dans leur hémolymphe

André Aeschlimann, Sylvie Schneeberger, Kurt Pfister, Willy Burgdorfer et Alexandre Cotty

Résumé

- 1) En 1980, six espèces d'Ixodides ont été récoltées dans la Vallée Maggia au Tessin: *D. marginatus*, *I. ricinus*, *H. punctata*, *I. hexagonus*, *Rh. sanguineus* et *I. trianguliceps*.
- 2) En 1980 comme en 1967, *D. marginatus* et *I. ricinus* restent largement répandus dans la région et sont récoltés en grand nombre à l'état libre et sur les chèvres.
- 3) *H. punctata*, espèce bien représentée en 1967, ne se retrouve plus qu'en petit nombre et de façon très localisée en 1980.
- 4) Les immatures des espèces inventoriées sous 1), *I. hexagonus* et *Rh. sanguineus* exceptés, ont été récoltés sur rongeurs.
- 5) Parmi les reptiles, seuls les lézards ont fourni des larves et des nymphes d'*I. ricinus*.
- 6) *I. hexagonus* (sur chiens) et *I. trianguliceps* (sur rongeurs) sont signalés pour la première fois dans la Vallée et *Rh. sanguineus* (sur chiens) pour la première fois au Tessin.
- 7) *H. sulcata* et *Rh. bursa*, trouvés en 1967, semblent avoir disparu de la région tessinoise, aucun spécimen de ces espèces n'ayant pu être récolté en 1980.
- 8) *D. marginatus* et *I. ricinus* se sont révélés infectés par des rickettsies. Les résultats semblent indiquer qu'il existe deux types de rickettsies au Tessin, l'une liée à *D. marginatus*, l'autre à *I. ricinus*.
2. Nel 1980 come nel 1967, *D. marginatus* e *I. ricinus* rimangono largamente sparse nella regione e sono raccolte in gran numero allo stato libero oppure sulle capre.
3. *H. punctata*, specie ben rappresentata nel 1967, si ritrova solo in numero ridotto e in modo molto localizzato nel 1980.
4. Le forme immature delle specie inventariate sotto il punto 1., tranne *I. hexagonus* e *Rh. sanguineus*, sono state raccolte su dei rosicanti.
5. Fra i rettili, le uniche ad avere fornito larve e ninfe d'*I. ricinus*, sono le lucertole.
6. *I. hexagonus* (sul cane) e *I. trianguliceps* (sui rosicanti) sono state segnalate per la prima volta nella Valle e *Rh. sanguineus* (sul cane), per la prima volta in Ticino.
7. *H. sulcata* e *Rh. bursa*, trovate nel 1967, sembrano scomparse della regione ticinese, poiché nessun esemplare di queste specie è stato raccolto nel 1980.
8. *D. marginatus* e *I. ricinus* si sono rivelate infestate con delle rickettsiae. I risultati sembrano indicare che esistono due tipi di rickettsiae in Ticino, una in relazione con *D. marginatus*, l'altra in relazione con *I. ricinus*.

Summary

- 1) In 1980, 6 Ixodide species have been collected in the Valle Maggia (Ticino): *D. marginatus*, *I. ricinus*, *H. punctata*, *I. hexagonus*, *Rh. sanguineus* et *I. trianguliceps*.
- 2) In 1980 as in 1967, *D. marginatus* and *I. ricinus* were still widely spread throughout the region and a large number of them were collected on goats or off-hosts.
- 3) *H. punctata*, a species well represented in 1967, was found in 1980 only in small numbers and was very localized.

Riassunto

1. Nel 1980, 6 specie d'Ixodidae sono state raccolte nella Valle Maggia in Ticino: *Derma-centor marginatus*, *Haemaphysalis punctata*, *Ixodes ricinus*, *I. hexagonus*, *I. trianguliceps*, e *Rhipicephalus sanguineus*.

- 4) The immatures of the species mentioned under point 1), except *I. hexagonus* and *Rh. sanguineus*, were collected on rodents.
- 5) Among the reptiles, only lizards carried *I. ricinus* larvae and nymphs.
- 6) *I. hexagonus* (on dogs) and *I. trianguliceps* (on rodents) were mentioned for the first time in the Valle Maggia and *Rh. sanguineus* for the first time in Ticino.
- 7) *H. sulcata* and *Rh. bursa*, which were found in 1967, seemed to have disappeared from the Ticino region; no individual of either species was caught in 1980.
- 8) *D. marginatus* and *I. ricinus* were demonstrated to be infected by rickettsiae. The results seemed to reveal 2 kinds of rickettsiae in Ticino, one associated with *D. marginatus* the other with *I. ricinus*.

Introduction

Comme partout dans le monde, les tiques sont en Suisse les vecteurs de microorganismes pathogènes pour l'homme et les animaux domestiques ou sauvages (Aeschlimann *et al.*, 1969 et 1979; Burgdorfer *et al.*, 1983). L'inventaire des espèces, la connaissance précise de leur distribution géographique et de leur spécificité parasitaire, l'étude des fluctuations des populations au cours des saisons et des années sont un préalable indispensable à un meilleur contrôle de ces ectoparasites.

Une première enquête dans le canton du Tessin (Aeschlimann *et al.*, 1968), dont il faut rappeler la situation méridionale par rapport à l'arc alpin suisse (Fig. 1), avait permis de récolter cinq espèces d'Ixodides sur la végétation et sur les animaux domestiques: *Dermacentor marginatus*, *Haemaphysalis punctata*, *Haemaphysalis sulcata*, *Ixodes ricinus* et *Rhipicephalus bursa*. Certaines de ces espèces sont des vecteurs potentiels de virus, de rickettsies, de babésies et de filaires.

Les babésies du Tessin ont déjà fait l'objet d'une publication (Brossard et Aeschlimann, 1975). Quant au virus de l'encéphalite à tiques, aucune souche n'a encore pu être isolée des tiques de ce canton (Matile, 1982). Il en va de même pour les spirochètes et les filaires.

Ce sont sans doute les rickettsies qui posent actuellement le problème le plus intéressant en

Suisse. Récemment, Aeschlimann *et al.*, 1979), puis Burgdorfer *et al.* (1979) ont démontré la présence d'une rickettsie particulière dans les *I. ricinus* du Nord des Alpes. Ce microorganisme, momentanément baptisé «rickettsie suisse» (= RS), sous réserve d'une identification définitive, semble différent des autres espèces du genre. Il est toutefois sérologiquement apparenté à *Rickettsia rickettsii* (USA), *R. slovaca* (Tchécoslovaquie), *R. sibirica* (URSS) et *R. conorii* (pourtour méditerranéen et régions tropicales) comme l'ont démontré Peter *et al.* (1981). En Europe centrale, *R. slovaca* est associée à *D. marginatus* (Urvölgyi et Brezina, 1976; Burgdorfer *et al.*, 1979).

Soulignons qu'*I. ricinus* est la tique la plus répandue de Suisse, que ce soit au nord ou au sud des Alpes (Aeschlimann, 1972). *D. marginatus* se récolte rarement au nord des Alpes; il est cependant endémique dans la Regio basiliensis, en particulier près de Bâle sur la rive allemande droite du Rhin. Il est également installé au Valais (Cotty *et al.*, 1986) et se rencontre fréquemment au sud des Alpes (Immler *et al.*, 1970). *H. punctata*, sauf information contraire, ne se rencontre que de manière localisée au sud des Alpes et en Valais (Cotty, thèse en préparation). *H. sulcata* et *Rh. bursa*, espèces méditerranéennes, sont absents de la Suisse. Au Tessin, ils n'ont été trouvés qu'en petit nombre en 1968 (Aeschlimann *et al.*).

Sur la base de ces anciennes données, nous avons décidé de mener en 1980 une nouvelle enquête au sud des Alpes avec comme double objectif:

- a) confirmer nos résultats de 1968 concernant les Ixodides du Tessin;
- b) déceler la présence de rickettsies dans les tiques de cette région.

Toutes les espèces évoquées ci-dessus colonisent au Tessin les mêmes biotopes et se nourrissent du sang des mêmes hôtes.

Matériel et méthodes

Nous avons limité nos recherches à la vallée Maggia, une des régions tessinoises des mieux prospectées par Aeschlimann *et al.*, en 1968. En 1980, nous avons organisé huit expéditions de mars à octobre. La récolte des tiques s'est faite selon les méthodes suivantes:

1. Tiques sur hôtes

1.1. Animaux domestiques. Durant les mois d'avril et de mai, nous avons mis l'accent sur le contrôle des chèvres et visité huit étables, dispersées entre Maggia et Fontana (Fig. 1), afin de repérer d'éventuels biotopes à haute densité numérique de tiques. Les bêtes ont été systématiquement déparasitées.

Dès le mois de juin, les contrôles se sont avérés plus difficiles, les chèvres, mises en liberté en altitude, ne rentrant plus aux étables. Néanmoins, en fin d'année, nous avons vérifié au total 456 chèvres.

Par ailleurs, 46 moutons ont été contrôlés au moment de la tonte (septembre et octobre).

Enfin, deux vétérinaires de Locarno nous ont fourni des tiques récoltées sur chiens et sur 1 chat.

1.2. Micromammifères. De mai à octobre, nous avons posé, dans différents biotopes, des séries de 25 pièges (trappes Sherman et trappes-cages en bois). Les pièges ont parfois été placés directement dans les étables ou aux alentours (Cortasel:zone 6 et Ronchi:zone 5). Les rongeurs capturés nous ont également permis de récolter des tiques, toutes des immatures. Nous avons

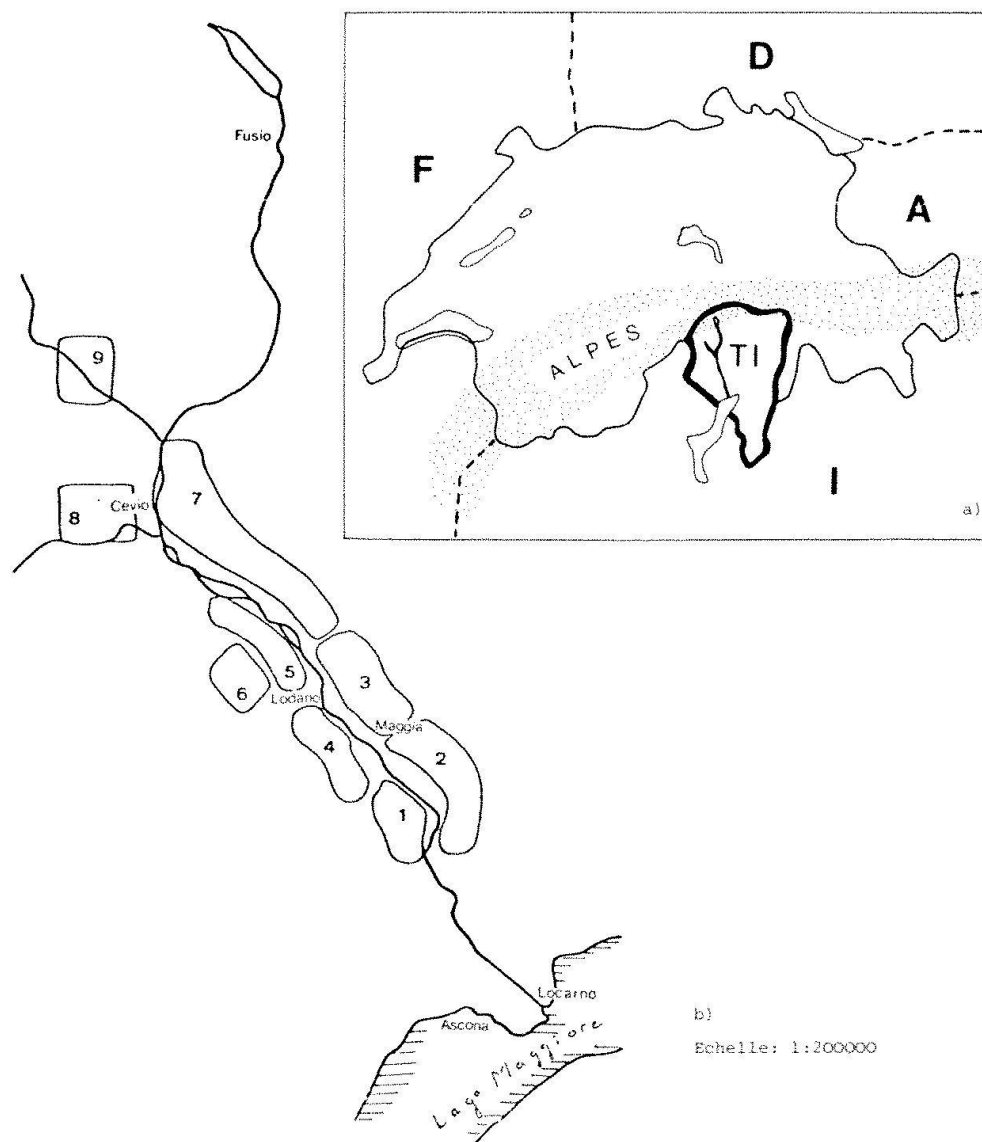


Figure 1

a) Situation de la Vallée Maggia dans le canton du Tessin (TI), au sud de la Suisse.

I = Italie, F = France, D = Allemagne, A = Autriche.

b) Localisation des biotopes et étables visités en 1980 dans la Vallée Maggia (la liste des biotopes et étables regroupés en 9 zones se trouve dans le tableau 1).

mis les larves gorgées en élevage afin de leur permettre de muer en laboratoire, la détermination des nymphes étant plus aisée que celle des larves. Les autres spécimens ont été conservés dans l'alcool à 70°.

- 1.3. Reptiles. A titre d'essai, nous avons également capturé les lézards et des serpents car les reptiles sont connus comme servant d'hôtes aux immatures d'*I. ricinus*.

2. Tiques libres

L'échantillonnage des tiques en phase libre (larves, nymphes et adultes) a été réalisé par la méthode dite du «drapeau» (Aeschlimann, 1972). On a «traîné le drapeau» sur la végétation de 35 biotopes différents, rassemblés en 9 zones (Tableau 1), sur une période allant de mars à octobre.

Tableau 1: Liste des biotopes et étables regroupés dans les 9 zones de la Vallée (voir Fig. 1).

| zones | biotopes | étables | coordonnées | altitudes |
|-------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------|-----------|
| 1. | Aurigeno-Dunzio | Streccia Dunzio-Capoli Dunzio Madonna | | |
| 2. | Ronchini-Avegno | Ronchini Gordevio-Dōmna Gordevio-Archeggio Avegno-Scaladri | | |
| 3. | Giumaglio-Maggia | Coglio-Curbazoi Maggia-Coglio Coglio Maggia Voipo | | |
| | | Lafranchi | 696850/124350 | 664 m |
| | | Caccia | 697300/123250 | 500 m |
| | | Guanchi | 697750/123200 | 515 m |
| | | Maggistochi | 697700/123200 | 520 m |
| | | Gianni | 698100/122950 | 530 m |
| | | Lolli | 698400/123700 | 733 m |
| | Giumaglio Giumaglio-Cp. di Cima | | | |
| 4. | Lodano-Aurigeno | Lodano-Moghegno Moghegno Aurigeno-Doledo Moghegno-Cortone | | |
| | | Rianda | 696900/122200 | 453 m |
| | | Yerly | 696500/121050 | 1100 m |
| 5. | Lodano-someo | Lodano (cascade) Lodano-Someo Ronchi | | |
| 6. | Erta | Soladino Solà Nagairom Erta Solada Cortasel | | |
| | | Mazzoni | 695750/122700 | 720 m |
| 7. | Giumaglio-Bignasco | Visletto Cevio-Bignasco Riveo Giumaglio-Someo Someo | | |
| 8. | Linescio | Cevio Linescio | | |
| 9. | Fontana | Fontana | | |
| | | Dalessi | 687800/135050 | 616 m |

3. Analyse du matériel

Les tiques récoltées sur chèvres et à l'état libre ont été déterminées et, dans la mesure où elles arrivaient vivantes à Neuchâtel, testées par analyse des hémocytes afin de déceler la présence de rickettsies (Burgdorfer, 1970). Lorsque certains résultats s'avéraient douteux, nous avons effectué un contrôle par immunofluorescence (Burgdorfer et Lackman, 1960).

Les immatures récoltés sur reptiles et rongeurs ont été déterminés puis placés dans l'alcool à 70°. Les adultes prélevés sur chiens et chats par les vétérinaires nous étaient directement fournis dans l'alcool.

Résultats

A. Faunistique

Tiques libres

Le détail des captures mensuelles dans les 35 biotopes visités au «drapeau» figure dans le Tableau 2. Seules 3 espèces d'Ixodides ont été retrouvées en 1980 dans la Vallée Maggia: *D. marginatus*, *I. ricinus* et *H. punctata*.

Remarques

- 1) Sur la Figure 2, on a tenté d'établir une comparaison des activités mensuelles de *D. mar-*

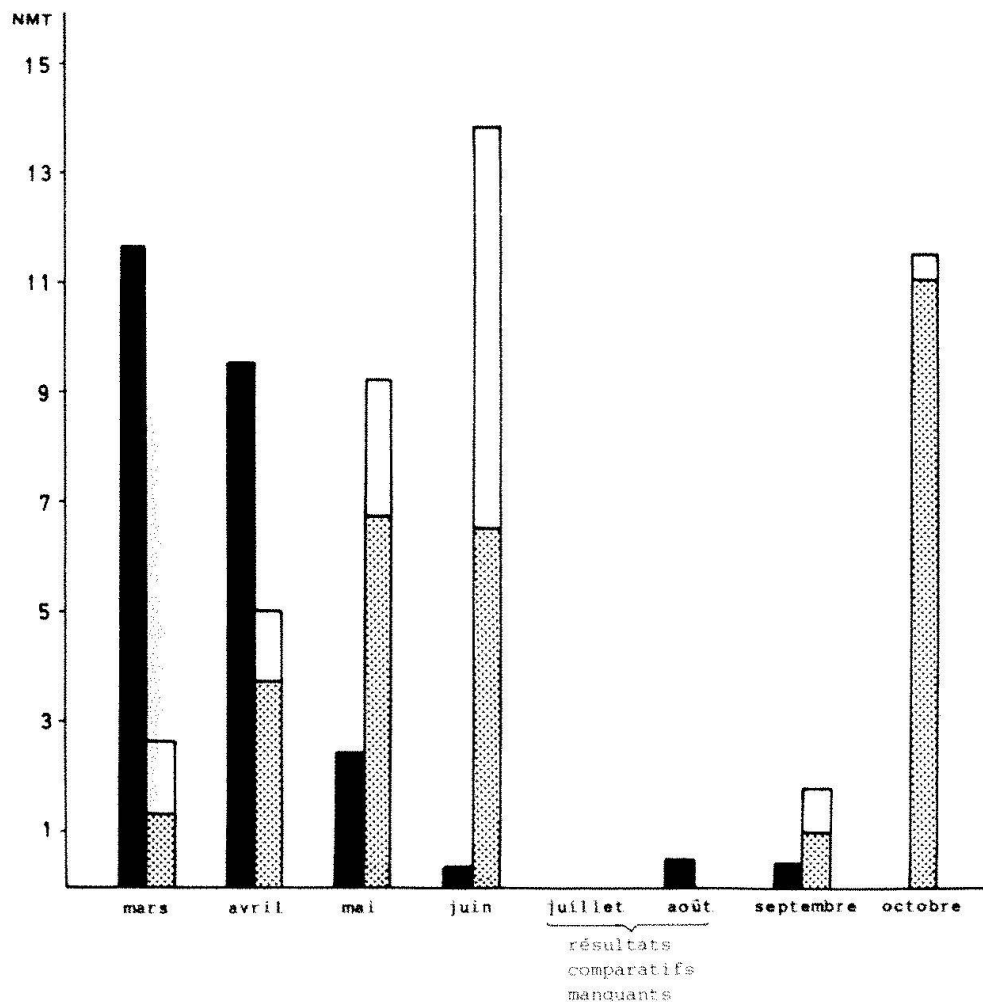


Figure 2: Comparaison des activités mensuelles de *D. marginatus* et *I. ricinus* en 1980 (captures au «drapeau», tiques libres)

- *D. marginatus* (adultes)
- ▨ *I. ricinus* (adultes)
- *I. ricinus* (nymphes)

NMT nombre moyen de tiques calculé en fonction du nombre de visites effectuées dans les biotopes.

(en juillet et août, seules 6 visites ont été effectuées. Les moyennes indiquées ne sont donc pas comparables à celles du reste de l'année).

Tableau 2: Tiques libres récoltées de mars à octobre 1980.

| zones | D. marginatus | I. ricinus | H. punctata |
|-----------------------|---------------|------------|-------------|
| 1. Aurigeno-Dunzio | 2 | 132 | 0 |
| 2. Ronchini-Avegno | 2 | 126 | 0 |
| 3. Giumaglio-Maggia | 143 | 129 | 36 |
| 4. Lodano-Aurigeno | 2 | 21 | 0 |
| 5. Lodano-Someo | 62 | 125 | 0 |
| 6. Erta | 11 | 22 | 0 |
| 7. Giumaglio-Bignasco | 31 | 4 | 0 |
| 8. Linescio | 28 | 22 | 0 |
| 9. Fontana | 0 | 4 | 0 |
| TOTAL | 281 | 585 | 36 |

ginatus et *I. ricinus*. Pour la période printanière, on constate pour *D. marginatus* une activité précoce (affût sur la végétation au début du mois de mars déjà), alors que la neige recouvre encore les endroits abrités et que la Vallée Maggia entière est soumise à de fortes giboulées. Puis l'activité de cette espèce diminue pour atteindre un minimum dès juin et disparaître en octobre. Seuls les adultes ont pu être récoltés au «drapeau».

Le phénomène contraire est observé pour *I. ricinus*. Le «pic d'automne» (Mermoud *et al.*, 1975), caractéristique de cette espèce à l'altitude moyenne du Plateau suisse (500 m environ), est également observable pour les adultes dans la Vallée Maggia. Les nymphes, ayant mué en été, tendent à disparaître en automne au profit des adultes.

- 2) Le Tableau 3 montre que certains biotopes livrent plus de matériel que d'autres. Certes, les conditions climatiques locales jouent un rôle non négligeable dans la survie d'une population de tiques et nous ne les avons pas

étudiées suffisamment en détail pour en tirer des conclusions valables. Néanmoins l'importance des populations dépend essentiellement de la présence d'un nombre suffisant d'hôtes adéquats. Il est donc significatif que les zones riches en tiques sont celles où sont situées de nombreuses étables à chèvres. Par contre, la différence enregistrée dans le rapport de populations *D. marginatus*/*I. ricinus* (zones 1 et 2) repose davantage sur les conditions écologiques locales: *I. ricinus* a besoin d'un couvert végétal important, généralement arborisé, avec une haute humidité relative de l'air (au moins 80%), alors que *D. marginatus* supporte des biotopes plus secs, à ciel ouvert, en association avec les genêts, etc. (Immler *et al.*, 1970). Notre travail était à l'impression quand nous est parvenu le texte de Gilot *et al.* (Acarologia, 24 (3), 1983) qui confirme de manière détaillée nos propres observations.

- 3) Nous n'avons récolté que 35 exemplaires d'*H. punctata* durant les mois de mars et avril et un seul individu au mois de juin. Toutes les captures provenaient, comme en 1966/67, de la zone 3.

Tiques sur hôtes

Les chèvres sont d'excellents révélateurs de la présence de populations de tiques. La semi-liberté dont elles jouissent et leurs pérégrinations incessantes dans la végétation assurent des infestations qui témoignent de l'activité des tiques. Confirmons d'abord ce que nous avons observé en 1966/67 (Aeschlimann *et al.*, 1968),

Tableau 3: Nombres moyens de tiques récoltées au «drapeau». Les moyennes sont calculées en fonction du nombre de visites effectuées dans chaque zone pendant les mois d'avril et mai 1980.

| zones | nombre de visites | D.m. récoltés | I.r. récoltés | nb moy D.m | nb moy I.r |
|-----------------------|-------------------|---------------|---------------|------------|------------|
| 1. Aurigeno-Dunzio | 4 | 1 | 61 | 0,3 | 15,3 |
| 2. Ronchini-Avegno | 3 | 2 | 73 | 0,7 | 24,3 |
| 3. Giumaglio-Maggia | 12 | 107 | 76 | 8,9 | 6,3 |
| 4. Lodano-Aurigeno | 3 | 2 | 8 | 0,7 | 2,7 |
| 5. Lodano-Someo | 4 | 60 | 37 | 15 | 9,3 |
| 6. Erta | 2 | 11 | 19 | 5,5 | 9,5 |
| 7. Giumaglio-Bignasco | 5 | 31 | 4 | 6,2 | 0,8 |
| 8. Linescio | 2 | 24 | 3 | 12 | 1,5 |

D.m: *D. marginatus*; nb moy: nombre moyen; I.r: *I. ricinus*

Tableau 4: Tiques récoltées sur chèvres (avril à octobre 1980).

| étables | chèvres contrôlées | D. marginatus | I. ricinus | H. punctata |
|-------------|--------------------|---------------|------------|-------------|
| Dalessi | 23 | 52 | 26 | 0 |
| Lafranchi | 1 | 0 | 20 | 4 |
| Caccia | 21 | 17 | 265 | 2 |
| Guanchi | 35 | 138 | 178 | 1 |
| Maggistochi | 24 | 109 | 134 | 1 |
| Gianni | 13 | 31 | 21 | 0 |
| Lolli | 13 | 23 | 120 | 0 |
| Rianda | 10 | 0 | 15 | 0 |
| Yerly | 266 | 9 | 19 | 0 |
| Mazzoni | 50 | 1 | 36 | 0 |
| TOTAL | 456 | 380 | 834 | 8 |

Tableau 5: Ixodides récoltés sur rongeurs dans la Vallée Maggia en 1980.

| Mois | Rongeurs capturés | Tiques récoltées | Mois | Rongeurs capturés | Tiques récoltées |
|---------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|
| COGLIO | | | AOUT | | |
| MAI | | | | | 1 N <i>D. marginatus</i> 3 L (indéterminable) |
| | <i>Apodemus sylvaticus</i> ♀ | 4 L <i>I. ricinus</i> | <i>A. flavicollis</i> ♀ | 10 L <i>I. ricinus</i> | |
| | <i>A. sylvaticus</i> ♂ | 2 L <i>I. ricinus</i> | | 2 N <i>I. ricinus</i> | |
| | <i>A. sylvaticus</i> ♂ | 8 L <i>I. ricinus</i> | | 8 N <i>D. marginatus</i> | |
| | <i>A. sylvaticus</i> ♀ | 4 L <i>I. ricinus</i> | | 1 L <i>H. punctata</i> | |
| | <i>A. sylvaticus</i> ♀ | 6 L <i>I. ricinus</i> | <i>A. flavicollis</i> ♀ | 4 L <i>I. ricinus</i> | |
| | <i>A. flavicollis</i> ♂ | 3 L <i>I. ricinus</i> | <i>A. flavicollis</i> ♀ | 1 N <i>D. marginatus</i> | |
| JUIN | | | <i>A. flavicollis</i> ♀ | — | |
| | <i>A. sp.</i> ♀ | — | <i>A. flavicollis</i> ♂ | 1 L <i>I. ricinus</i> | |
| | <i>A. sylvaticus</i> ♀ | 2 L <i>I. ricinus</i> 2 L <i>D. marginatus</i> | <i>Cl. glareolus</i> ♀ | 1 N <i>D. marginatus</i> | |
| | <i>A. sylvaticus</i> ♀ | 1 L <i>I. ricinus</i> | SEPTEMBRE | | |
| | <i>A. flavicollis</i> ♀ | 4 L <i>I. ricinus</i> 1 L <i>D. marginatus</i> 1 L <i>H. punctata</i> | <i>A. sp.</i> ♀ | — | |
| | <i>Clethrionomys glareolus</i> ♂ | — | <i>A. sylvaticus</i> ♀ | 1 L <i>I. ricinus</i> | |
| JUILLET | | | <i>A. flavicollis</i> ♀ | 1 L <i>I. ricinus</i> | |
| | <i>A. sp.</i> ♀ | — | <i>A. flavicollis</i> ♂ | 8 L <i>I. ricinus</i> | |
| | <i>A. sp.</i> ♀ | 1 L <i>I. ricinus</i> 1 L <i>D. marginatus</i> | <i>A. flavicollis</i> ♀ | 1 L <i>D. marginatus</i> | |
| | <i>A. sp.</i> ♂ | — | OCTOBRE | | |
| | <i>A. sp.</i> ♂ | 1 L <i>H. punctata</i> | <i>A. sp.</i> ♀ | — | |
| | <i>A. sp.</i> ♀ | — | <i>A. flavicollis</i> ♂ | 1 L <i>I. ricinus</i> | |
| | <i>A. sp.</i> ♂ | 1 L <i>I. ricinus</i> 2 L <i>D. marginatus</i> | TOTAL COGLIO | | |
| | <i>A. sylvaticus</i> ♀ | — | rongeurs capturés: 45 | rongeurs parasités: 30 | |
| | <i>A. flavicollis</i> ♀ | 1 L <i>I. ricinus</i> 1 L <i>D. marginatus</i> | | 95 <i>I. ricinus</i> | |
| | <i>A. flavicollis</i> ♀ | 1 L <i>I. ricinus</i> | | 23 <i>D. marginatus</i> | |
| | <i>A. flavicollis</i> ♂ | — | | 4 <i>H. punctata</i> | |
| | <i>A. flavicollis</i> ♂ | 4 L <i>I. ricinus</i> 1 L <i>D. marginatus</i> | | 4 ? | |
| | <i>A. flavicollis</i> ♀ | — | LODANO | | |
| | <i>A. flavicollis</i> ♀ | — | MAI | | |
| | <i>A. flavicollis</i> ♂ | — | <i>A. sylvaticus</i> ♂ | 2 L <i>I. ricinus</i> | |
| | <i>A. flavicollis</i> ♂ | 2 L <i>I. ricinus</i> | SEPTEMBRE | | |
| | <i>Cl. glareolus</i> ♀ | — | <i>A. flavicollis</i> ♀ | 2 L <i>I. ricinus</i> | |
| | <i>Cl. glareolus</i> ♀ | 2 L <i>I. ricinus</i> | <i>A. flavicollis</i> ♀ | — | |
| AOUT | | | CEVIO | | |
| | <i>A. flavicollis</i> ♂ | 14 L <i>I. ricinus</i> 1 N <i>I. ricinus</i> 1 N (indéterminable) | JUIN | | |
| | <i>A. flavicollis</i> ♂ | 6 L <i>I. ricinus</i> 3 L <i>D. marginatus</i> 1 L <i>H. punctata</i> | <i>A. sp.</i> ♀ | — | |
| | | | <i>A. sp.</i> ♂ | — | |
| | | | <i>A. sylvaticus</i> ♀ | 1 N <i>I. ricinus</i> | |
| | | | <i>A. sylvaticus</i> ♀ | — | |
| | | | <i>A. sylvaticus</i> ♀ | — | |
| | | | <i>A. sylvaticus</i> ♀ | — | |
| | | | <i>A. flavicollis</i> ♀ | — | |

| Mois | Rongeurs capturés | Tiques récoltées |
|------|-------------------|------------------------|
| JUN | | |
| | A. flavicollis | ♀ — |
| | A. flavicollis | ♂ — |
| | A. flavicollis | ♂ — |
| | Cl. glareolus | ♀ — |
| | Cl. glareolus | ♀ — |
| | Cl. glareolus | ♂ 1 L I. trianguliceps |

| | | |
|---------|----------------------|-----|
| OCTOBRE | | |
| | Crocidura suaveolens | ♂ — |
| | C. suaveolens | ♂ — |

| | | |
|-------------|-----------------------|-----------------------|
| TOTAL CEVIO | | |
| | rongeurs capturés: 15 | rongeurs parasités: 2 |
| | | 1 I. ricinus |
| | | 1 I. trianguliceps |

DUNZIO

| | | |
|-----|----------------|------------------|
| JUN | | |
| | A. sp. | — |
| | A. sp. | ♀ — |
| | A. flavicollis | ♀ — |
| | A. flavicollis | ♀ — |
| | A. flavicollis | ♀ 1 L I. ricinus |

CORTASEL

| | | |
|-----|----------------|------------------|
| JUN | | |
| | A. sylvaticus | ♀ 1 L I. ricinus |
| | A. flavicollis | ♂ — |
| | A. flavicollis | ♂ — |

JUILLET

| | | |
|--|----------------|------------------|
| | A. sp. | ♀ — |
| | A. sp. | ♂ — |
| | A. sylvaticus | ♀ — |
| | A. sylvaticus | ♂ — |
| | A. sylvaticus | ♂ 1 L I. ricinus |
| | A. flavicollis | ♂ — |
| | A. flavicollis | ♀ — |
| | Glis glis | ♂ 1 L I. ricinus |

| | | |
|-----------|----------------|---------------------|
| SEPTEMBRE | | |
| | A. sylvaticus | ♂ 1 L I. ricinus |
| | A. sylvaticus | ♂ 1 L I. ricinus |
| | A. sylvaticus | ♂ 2 L D. marginatus |
| | A. flavicollis | ♀ 3 L I. ricinus |

| Mois | Rongeurs capturés | Tiques récoltées |
|-----------|-------------------|------------------|
| SEPTEMBRE | | |
| | A. flavicollis | ♂ 2 L I. ricinus |
| | A. flavicollis | ♂ — |
| | A. flavicollis | ♀ 4 L I. ricinus |
| | A. flavicollis | ♂ 2 L I. ricinus |

| | | |
|----------------|-----------------------|------------------------|
| TOTAL CORTASEL | | |
| | rongeurs capturés: 19 | rongeurs parasités: 10 |
| | | 16 I. ricinus |
| | | 2 D. marginatus |

SOLADA

| | | |
|-----------|----------------|-------------------|
| SEPTEMBRE | | |
| | A. flavicollis | ♂ — |
| | A. flavicollis | ♂ — |
| | A. flavicollis | ♂ 4 L I. ricinus |
| | | 6 N D. marginatus |

RONCHI

| | | |
|-----------|---------------|------------------|
| SEPTEMBRE | | |
| | A. sylvaticus | ♂ 1 L I. ricinus |
| | A. sylvaticus | ♂ — |

GORDEVIO

Aucun rongeur capturé

FUSIO

| | | |
|-----------|---------------|-----|
| SEPTEMBRE | | |
| | Pitymys sp. | ♀ — |
| | Pitymys sp. | ♀ — |
| | Sorex araneus | ♂ — |
| | S. araneus | ♀ — |

TOTAL SUR L'ANNÉE:

| | |
|---------------------|---------------------|
| Rongeurs capturés: | 96 |
| Rongeurs parasités: | 47 |
| Tiques récoltées: | 122 I. ricinus |
| | 31 D. marginatus |
| | 4 H. punctata |
| | 1 I. trianguliceps |
| | 4 non déterminables |

Tableau 6: Liste des tiques récoltées sur chat et chiens.

| date | hôte | lieu | tiques | |
|---------|-------|-----------------|--------|----------------|
| 8.7.80 | chien | ? | 3 ♀ | Rh. sanguineus |
| 9.7.80 | chien | ? | 1 ♀ | Rh. sanguineus |
| 29.7.80 | chat | Ponte Brolla | 1 ♀ | I. ricinus |
| 8.80 | chien | ? | 46 N | Rh. sanguineus |
| | | | 8 L | Rh. sanguineus |
| | | | 2 N | ? |
| 13.8.80 | chien | Rossi-Tegna | 2 ♀ | I. hexagonus |
| 14.8.80 | chien | Solduno-Locarno | 1 ♀ | I. hexagonus |
| 9.80 | chien | Muralto | 1 ♀ | I. hexagonus |
| 29.9.80 | chien | Bellinzona | 1 ♀ | I. ricinus |

soit que *D. marginatus* s'observe surtout entre et à la base des cornes des bêtes, *I. ricinus* essentiellement aux aisselles, aux aines et sous la queue, *H. punctata* sur les oreilles, le museau et quelquefois dans la fourrure des flancs en compagnie de quelques rares *I. ricinus*. La diversité de la localisation des tiques sur l'hôte est actuellement à l'étude (Schneeberger, manuscrit en préparation).

En 1980, 456 chèvres déparasitées dans 10 étables ont livré 380 *D. marginatus*, 834 *I. ricinus* (dont 17 nymphes) et seulement 8 *H. punctata* (2 nymphes) (Tableau 4).

Le cas d'*H. punctata* est particulier. En 1967, la population de cette espèce semblait plus importante: nous avons alors récolté 172 individus, tous provenant de la zone 3 comme en 1980. En fait, la distribution et la survie de cette espèce en Suisse restent encore obscures. Elle peut présenter dans une même région, et nos observations dans la Vallée Maggia et le canton du Valais le confirment, des fluctuations de populations remarquables (Cotty *et al.*, 1986).

Au cours de la campagne de 1980, il nous a été impossible de récolter *H. sulcata*, que ce soit dans les biotopes habituels (zone 3) ou ailleurs. Nous avons déjà écrit (Aeschlimann *et al.*, 1968) que cette espèce trouvait au Tessin sa distribution la plus septentrionale. Nos récoltes (30 individus), alors localisées vers 600/800 m dans la zone 3 uniquement, étaient peut-être dues à une installation momentanée de l'espèce dans une région favorable, à la suite d'importations d'animaux domestiques infestés, car il est à noter que la terrasse de Giumaglio-Maggia (= Alpe di Lodano dans le travail de 1966/67) est particulièrement bien exposée avec plusieurs vergers de châtaigniers et de la vigne. Les troupeaux de chèvres y sont nombreux. Cette observation est à rapprocher du cas de *Rh. bursa* trouvé en 1966/67 à Biasca (28 exemplaires: 10 ♀♀, 8 ♂♂, 10 nymphes) et disparu depuis lors semble-t-il. On doit rester attentif à ces mouvements de populations de vecteurs, d'autant plus que les Ixodides restent fixés plusieurs jours sur leur hôte.

Tableau 7: Tiques sur reptiles

| | | | | |
|---------|----------------------|--------|------------|------------|
| 28.6.80 | Podarcis muralis ♂ | Coglio | 2LL | ? |
| | Podarcis muralis ♀ | Coglio | 1L | I. ricinus |
| | Lacerta viridis ♂ | Lodano | 1L | ? |
| | Lacerta viridis ♂ | Ronchi | --- | |
| 29.6.80 | Lacerta viridis ♂ | Ronchi | --- | |
| | Podarcis muralis ♀ | Someo | --- | |
| | Coluber viridiflavus | Someo | --- | |
| | Elaphe longissima | Ronchi | --- | |
| 16.5.81 | Podarcis muralis | Lumino | 8LL 5NN | I. ricinus |
| | Lacerta viridis | Lumino | 11LL 1N | I. ricinus |
| 17.5.81 | Lacerta viridis | Lumino | 3N | I. ricinus |

(Lumino = région de Bellinzone)

Tableau 8: Infection de *D. marginatus*, *I. ricinus* et *H. punctata* par des rickettsies.

| | D. marginatus | | | | I. ricinus | | | | H. punctata | | | | TOTAL |
|-------------|---------------|-------|------|------|------------|-------|------|------|-------------|-------|------|---|---------|
| | réc. | test. | pos. | % | réc. | test. | pos. | % | réc. | test. | pos. | % | t.test. |
| libres | 281 | 279 | 69 | 24,7 | 585 | 543 | 61 | 11,2 | 36 | 36 | 0 | / | 858 |
| sur chèvres | 380 | 376 | 137 | 36,4 | 834 | 756 | 88 | 11,6 | 8 | 5 | 0 | / | 1137 |
| TOTAL | | 655 | | | | 1299 | | | | 41 | | | 1995 |

réc.: récoltés; t.test.: tiques testées; test.: testés; %: taux d'infection; pos.: positifs

Le contrôle de 46 moutons, en septembre et octobre, n'a fourni que 2 tiques, 1 *D. marginatus* et 1 *I. ricinus*. Ceci s'explique par le fait que les bêtes pâturent à plus de 2000 m de mars à septembre et ne redescendent en-dessous de 1000 m qu'au moment de la tonte.

Tiques sur rongeurs

Seuls les immatures ont été trouvés sur rongeurs (Tableau 5). Les dates de captures et le nombre, il est vrai modeste, de tiques récoltées, démontrent pour *I. ricinus* un rythme d'activité annuel classiquement décalé par rapport à l'activité des adultes. Pour l'année 1980, l'activité des *I. ricinus* immatures va de mai à octobre avec, apparemment, un pic en août également (Tableau 5). Il est impossible de commenter l'activité d'*H. punctata* vu le nombre infime de captures. Reste à signaler, pour la première fois dans la Vallée Maggia, la présence d'*I. trianguliceps* sur rongeurs, cette espèce ayant toutefois déjà été observée ailleurs au Tessin (Graf *et al.*, 1979).

Tiques sur chat et chiens

I. hexagonus, également signalé pour la première fois dans cette vallée, est une tique de carnivore et, comme *I. trianguliceps*, endophile. Cette particularité écologique lui assure une distribution très large et il n'est donc pas étonnant de la découvrir au Tessin.

Rh. sanguineus est une espèce méditerranéenne régulièrement importée par les chiens de vacanciers. Elle survit fort bien pendant plusieurs années dans les chenils et les maisons de régions situées bien au-delà de sa limite naturelle de répartition (Aeschlimann *et al.*, 1969; Aeschlimann et Büttiker, 1975). Il n'est donc pas surprenant de rencontrer adultes et nymphes de cette espèce sur les chiens du Tessin. On peut

même supposer, durant les mois favorables de l'année, une survie en pleine nature de *Rh. sanguineus* dans cette partie de la Suisse, son climat se rapprochant sensiblement de celui des pays méridionaux. Une tique libre (♀) a d'ailleurs été récoltée en 1980 sur la végétation dans un jardin de Locarno.

Enfin, la récolte d'*I. ricinus* sur chat et chiens s'explique aisément, l'espèce étant télotrope.

Tiques sur reptiles

Sur 11 reptiles capturés en 1980 et 1981 (Vallée Maggia et Lumino près de Bellinzona), nous avons observé 23 larves et 9 nymphes. Trois larves, en trop mauvais état, n'ont pu être déterminées. Ce matériel confirme cependant le rôle joué par les lézards comme hôtes pour les immatures d'*I. ricinus*.

B. Rickettsies

1995 tiques (858 libres et 1137 récoltées sur chèvres) ont été analysées par le test de l'hémolymphe. Les résultats détaillés figurent dans le Tableau 8. Seuls *D. marginatus* et *I. ricinus* se sont révélés infectés par des rickettsies. 665 *D. marginatus* et 1299 *I. ricinus* ont été testés et nous avons observé des taux d'infection sensiblement différents, respectivement de 31,45% et de 11,47%. Ces résultats semblent indiquer que nous avons affaire à deux rickettsies, l'une liée à *I. ricinus* (la «rickettsie suisse»), l'autre à *D. marginatus*. L'identification des rickettsies fait actuellement l'objet d'une étude détaillée au Rocky Mountain Laboratory (Hamilton, Montana). Quant à *H. punctata*, qui s'est toujours révélé négatif au test de l'hémolymphe, le nombre de spécimens examinés étant très faible (41), on se gardera d'en tirer une quelconque conclusion.

Remerciements

Ces travaux ont été soutenus par le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique à qui va notre reconnaissance.

Nous remercions l'équipe de l'Institut de Zoologie de Neuchâtel et ses volontaires de l'année 1980 pour nous avoir aidés, à l'une ou l'autre reprise, à manier le «drapeau» et à détiquer les chèvres (Mmes L. et D. Aeschlimann, V. Deniger, D. Morona, J. Schaer et le Dr méd. vét. A. Gueye du Sénégal).

Nos remerciements vont également aux Drs méd. vét. F. Martinoni et A. Dürr (Locarno) pour nous avoir remis des tiques récoltées sur chat et chiens et au Dr P. Froesch (Bellinzona) pour l'envoi de tiques capturées sur lézards. Nous exprimons notre gratitude aux Drs méd. I. Losa (Locarno) et P. Del Notaro (Maggia) pour avoir mis leur matériel de laboratoire à notre disposition.

Enfin, que tous les éleveurs de la Vallée Maggia, et plus particulièrement M. P. Gaccia et les familles B. Mazzoni, G. Yerly et S. Perret trouvent ici notre reconnaissance pour leur accueil chaleureux et leur aide constante durant ce travail.

Bibliographie

- Aeschlimann, A. 1972. *Ixodes ricinus*, Linné, 1758 (Ixodoidea; Ixodidae). Essai préliminaire de synthèse sur la biologie de cette espèce en Suisse. Acta trop. 29: 321-340.
- Aeschlimann, A., Büttiker, W. 1975. Importations de Tiques en Suisse (Acarina: Ixodoidea). Bull. Soc. ent. suisse 48 (1-2): 69-75.
- Aeschlimann, A., Büttiker, W. & Eichenberger, G. 1969. Les Tiques (Ixodoidea) sont-elles des vecteurs de maladies en Suisse? Bull. Soc. ent. suisse 42 (4): 317-320.
- Aeschlimann, A., Burgdorfer, W., Matile, H., Peter, O. & Wyler, R. 1979. Aspects nouveaux du rôle de vecteur joué par *Ixodes ricinus* L. en Suisse. Acta trop. 36: 181-191.
- Aeschlimann, A., Diehl, P. A., Eichenberger G., Immler, R. & Weiss, N. 1968. Les tiques (Ixodoidea) des animaux domestiques du Tessin. Revue suisse Zool. 75: 1039-1050.
- Brossard, M. & Aeschlimann, A. 1975. Piroplasmoses bovines en Suisse italienne (Remarques sur les infections latentes). Schweiz. Arch. Tierheilk. 117: 287-292.
- Burgdorfer, W. 1970. Hemolymph test. A technique for detection of rickettsia in ticks. Am. J. Trop. Med. Hyg. 19: 1010-1014.
- Burgdorfer, W. & Lackman, D. 1960. Identification of *Rickettsia rickettsii* in the wood tick, *Dermacentor andersoni* by means of fluorescent antibody. J. Inf. Dis. 107: 241-244.
- Burgdorfer, W., Aeschlimann, A., Peter, P. Hayes, S. F. & Philip, R. N. 1979. *Ixodes ricinus*: vector of hitherto undescribed spotted fever group agent in Switzerland. Acta trop. 36: 357-367.
- Burgdorfer, W., Barbour, A. G. Hayes, S. F., Peter, O. & Aeschlimann, A. 1983. Erythema chronicum migrans — a tickborne spirochetosis. Acta trop. 40: 79-83.
- Cotty, A., Aeschlimann, A., & Schneeberger, S. 1986. Distribution et fluctuations de populations d'*Ixodes ricinus* (L.), *Haemaphysalis punctata* (Can. et Fanz.) et *Dermacentor marginatus* (Sulzer) (Acarina, Ixodoidea) en Suisse. Bull. Soc. Ent. Suisse (à l'impression).
- Graf, J. F., Mermod, C., & Aeschlimann, A. 1979. Nouvelles données concernant la distribution, l'écologie et la biologie d'*Ixodes* (Exopalpiger) *trianguliceps* (Birula, 1895) en Suisse (Ixodoidea, Ixodidae). Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat. 102: 56-68.
- Immler, R., Aeschlimann, A., Büttiker, W., Diehl, P. A., Eichenberger, G. & Weiss, N. 1970. Über das Vorkommen von *Dermacentor*-Zecken (Ixodoidea) in der Schweiz. Bull. Soc. ent. suisse 43 (2): 99-110.
- Matile, H. 1982. Etudes virologiques et épidémiologiques sur l'encéphalite à tiques en Suisse. Thèse. ADAG, Administration und Druck AG, Zürich, pp. 98.
- Mermod, C., Aeschlimann, A. & Graf, J. F. 1975. Ecologie et éthologie d'*Ixodes ricinus* L. en Suisse. Quatrième note: Comparaison de deux populations d'altitude différente. Acarologia 17 (3): 442-451.
- Peter, O., Burgdorfer, W. & Aeschlimann, A. 1981. Enquête épidémiologique dans un foyer naturel de Rickettsies à *Ixodes ricinus* du plateau suisse. Ann. Parasitol. Hum. Comp. 56 (1): 1-8.
- Urvölgyi, J. & Brezina, R. 1976. A new member of spotted fever group rickettsiae. In: Rickettsiae and rickettsial diseases. Proc. 2. Int. Symp. Rickettsiae and Rickettsial Diseases, Smolenica, Czechoslovakia. p. 299. VEDA, Bratislava 1978.

Adresses des auteurs:

Prof. Dr André Aeschlimann
Sylvie Schneeberger, Alexandre Cotty
Institut de Zoologie
Chantemerle 22
CH-2000 Neuchâtel 7

Kurt Pfister
Département de Parasitologie
Faculté de Médecine vétérinaire
CH-3000 Berne

Willy Burgdorfer
Epidemiology Brands
Rocky Mountain Laboratories
National Institute of Allergy and Infections
Diseases
Hamilton
Montana 59840
USA

Erythema chronicum migrans – a tickborne spirochetosis

Willy Burgdorfer, Alan G. Barbour, Stanley F. Hayes, Olivier Péter, and André Aeschlimann

Summary

After detection of a spirochete in *Ixodes dammini*, the incriminated vector of Lyme disease in the United States, a survey was initiated to determine the presence of spirochetes also in *I. ricinus*, the suspected tick vector of erythema chronicum migrans (ECM) in Europe.

Of 201 starved female *I. ricinus* from Seewald in the western part of Switzerland, 73 (36.3%) harbored spirochetes morphologically indistinguishable from the *I. dammini* spirochete. In 69 of these infected ticks, spirochetal distribution was limited to the diverticula of midgut; a generalized infection including hemolymph was detected in only 4 ticks. Of an additional 180 female ticks that had fed on New Zealand white rabbits before dissection and microscopic examination, 39 (21.7%) were infected; 37 of these had an infection limited to the midgut, 2 a generalized infection of all the tissues. Rabbits fed on by infected ticks developed high titers of antibodies and ECM-like lesions on back and trunk as early as 4 weeks after tick feeding.

Isolation of the *I. ricinus* spirochete was readily accomplished in BSK medium.

Sera of rabbits fed on by infected *I. ricinus* or of patients who had ECM, reacted not only against the *I. ricinus* spirochete but also against the *I. dammini* organism. Similar cross reactions were recorded against the *I. ricinus* spirochetes with sera of rabbits immunized against the *I. dammini* agent and with sera of patients with Lyme disease.

Antigenic similarities of the two isolates were also established immunochemically by western blot analysis of sera from ECM and Lyme disease patients. The results suggest that the spirochete originally isolated from *I. dammini* in the United States also occurs in Europe where it is transmitted by *I. ricinus*.

In 1908, the Swedish physician, Arvid Afzelius, observed for the first time a characteristic migrating lesion on the skin of a patient bitten by

an ixodid tick. Subsequently, other cases came to his and his colleagues' attention – all with a similar clinical picture: the formation of a small annular papule that expanded centrifugally with indurated ½ to 2 cm wide borders and central clearing. In some instances the erythematous ring remained annular and gradually disappeared; in others it became irregular and remained visible for as long as 16 months. Because of the unique appearance, the syndrome was called "Erythema chronicum migrans" (Lipschütz, 1914).

The causative agent was unknown although it was speculated that it might be a virus or a toxic substance transmitted by ticks or other blood-sucking arthropods.

Hundreds of erythema chronicum migrans (ECM) cases, some with neurologic involvement (tickborne meningopolyneuritis), have since come to the attention of physicians throughout Europe, especially in regions where deer are abundant. The etiologic agent continued to elude investigators, but in view of results with slide agglutination tests, French scientists postulated that tickborne rickettsiae may be the cause of this unique syndrome (Degos et al., 1962).

Successful transmission of the disease from man to man by implantation of affected skin (Binder et al., 1955) and effective treatment with penicillin suggested that an infectious bacterial agent associated with bloodsucking arthropods, particularly the ixodid tick, *Ixodes ricinus*, was involved.

In the United States, a disease indistinguishable from ECM was first observed in Wisconsin in 1970 (Scrimenti, 1970). In 1975, a cluster of 4 cases occurred in southeastern Connecticut (Mast and Burrows, 1976). The same year, in the small community of Lyme, Connecticut, a mother whose daughter was diagnosed as having rheumatoid arthritis informed medical authorities that 11 other children in the same community had similar symptoms. This led to a

series of clinical and epidemiological investigations and to the description of Lyme arthritis or Lyme disease: an epidemic inflammatory disorder that usually begins with a skin lesion called erythema chronicum migrans (ECM) and weeks to months later may be followed by neurologic or cardiac abnormalities, migrating polyarthritis, intermittent attacks of oligoarticular arthritis or chronic arthritis in the knees (Steere et al., 1977; Steere et al., 1979; Hardin et al., 1979; Reik et al., 1979; Steere et al., 1980a; Steere et al., 1980b).

From 1975 through 1979, about 500 cases of Lyme disease were diagnosed in northeastern, midwestern, and western regions of the United States (Steere and Malawista, 1979). As in Europe, the causative agent remained unknown. Epidemiological evidence, however, suggested involvement of an infectious agent transmitted by ticks of the genus *Ixodes*, namely *I. dammini* in the northeast and midwest and *I. pacificus* in the west.

During a survey of spotted fever group rickettsiae in ticks from Shelter Island, New York – an area known for the occurrence of Rocky Mountain spotted fever and of Lyme disease – we recently detected in 77 (61.1%) of 126 adult *I. dammini*, collected off vegetation, a spirochete whose distribution within the tick appeared limited to the midgut. The organism stained moderately well with Giemsa stain and under darkfield showed a slow or sluggish movement. Isolation and culturing of the organism were accomplished by inoculating suspensions of triturated midgut diverticula of infected ticks into fortified Kelly's medium (Stoenner et al. 1982). Fine structural analysis by electron microscopy revealed the spirochete to be irregularly coiled, ranging from 10 to 30 µm in length and from 0.18 to 0.25 µm in diameter. Its ends appeared tapered with 4 to 8 filaments inserted subterminally at each end. Insertion points of these filaments were in a row paralleling the cell's long axis.

The antigenic relation of the *I. dammini* spirochete to the hitherto unknown etiologic agent of Lyme disease was suggested by the reactions of patients with clinically diagnosed Lyme disease in the indirect immunofluorescence test. Persons who had been ill for up to 32 months previously had high antibody titers against the spirochete.

New Zealand white rabbits proved susceptible to the *I. dammini* spirochete. When fed on by

infected ticks or inoculated with infected tick suspensions or cultured spirochetes, they responded with high titers of antibodies. In some rabbits, skin lesions resembling ECM appeared 10 to 12 weeks later.

Since publication of these findings (Burgdorfer et al., 1982), our clinical collaborators have recovered spirochetes indistinguishable from the *I. dammini* organism from the blood of at least two patients suffering from Lyme disease (Dr. A.C. Steere – personal communication; Dr. J.L. Benach – personal communication).

Because of the clinical and epidemiological similarities between Lyme disease and ECM of Europe, we recently initiated a collaborative study with the Zoological Institute of the University of Neuchâtel, Switzerland, to determine whether *I. ricinus*, the incriminated vector of ECM in Europe, is a carrier of spirochetes. The ticks originated from the Seewald forest on the Swiss Plateau where, according to medical authorities, ECM cases had occurred sporadically in the past. The initial findings of our investigation is the subject of this paper.

Materials and methods

Description of the study area

The Seewald forest, like others of the Swiss Plateau, is a remnant of a former natural forest. Located along the east shore of the Lake of Neuchâtel in the canton of Bern, it consists of oaks, ash trees, birches, and many black alders. Conifers have been planted in many sectors. Underbrush and low vegetation are dense, especially in clearings, ravines, and hollows where irrigation provides a rich and humid soil for many grasses and bushes. Wild animals including deer, wild boars, foxes, hares, rodents, insectivora, and birds are abundant. The area provides the climatic and biologic conditions necessary for massive populations of *I. ricinus*.

Collection and examination of ticks

Adult *I. ricinus* were collected in May 1982 by flagging vegetation with a white flannel cloth. They were placed in vials containing moistened plaster of Paris and shipped to the Rocky Mountain Laboratories. Upon arrival, the ticks were examined individually for spirochetes by

testing their hemolymph under darkfield microscopy. They were then dissected, and smears from a small portion of midgut were treated with a fluorescein isothiocyanate-labeled conjugate prepared (according to Peacock et al., 1971) from the serum of New Zealand white rabbits that had been immunized against the *I. dammini* spirochete (Burgdorfer et al., 1982). An additional 400 ticks, in pools containing 25 ♀♀ and 25 ♂♂, were fed on each of 8 New Zealand white rabbits. Ticks were confined in metal capsules held in place by adhesive tape. When the engorged females detached, they were placed individually into glass vials and stored at 100% relative humidity until oviposition was completed. All spent females were examined for spirochetes as outlined above. Male ticks were not examined; they do not feed as adults.

Isolation of spirochetes from infected *I. ricinus*

The remaining midgut tissues of 8 infected *I. ricinus* females were triturated in 1.0 ml of BSK medium (Barbour et al., 1982b). The resulting suspension was diluted 30, 300, 3,000 and 30,000 fold in tubes containing BSK medium. The tightly sealed tubes were then incubated at 35°C and periodically examined for spirochetes.

Transmission and scanning electron microscopy

For ultrastructural analysis, diverticula of infected ticks were removed and processed according to methods of Hayes and Burgdorfer (1979). For negative staining, cultured spirochetes washed twice with phosphate-buffered saline (PBS), pH 7.4 were applied to parlodion-coated copper grids and stained with 2% ammonium molybdate (pH 6.6). Grids with thin sections or negatively stained spirochetes were examined with a Hitachi HU-11E-1 electron microscope. Photographs were taken on Kodak SO-163 film.

For scanning electron microscopy, aliquots of 1.5 ml BSK medium containing *I. ricinus* spirochetes were centrifuged in a microfuge (Backman Model B), for 10 minutes to pellet the organisms. The pellet was resuspended in PBS with 5 mM MgCl₂ (PBS/Mg), pH 7.4, and again centrifuged for 10 minutes. This was repeated and the pelleted material was then suspended in

PBS combined with the fixative (Hayes and Burgdorfer, 1979) v/v for 30 to 40 minutes at room temperature. After fixation, the material was again centrifuged and resuspended in PBS/Mg, pH 7.4 and applied to 12 mm circular glass coverslips that had been pretreated with polylysine HCl at 1 mg/ml of distilled water. After 30 minute adsorption of spirochetes, the coverslips were passed through a graded acetone series for 10 minutes per each concentration without allowing the samples to dry. The coverslips, specimen side up and separated from each other by copper O-rings, were then loaded into a metal basket. The acetone was removed by putting the coverslips through 5 changes of liquid CO₂. After drying in a Balzer Union critical point apparatus, they were returned to atmospheric pressure. Mounted on aluminium studs with super glue, they were spotted with silver along the margin of the coverslip and coated with 200–300 Å of gold in a SPI (Structure Probe Inc.) sputter coater.

To illustrate spirochetes in midgut tissues of infected ticks, diverticula were opened and flattened under a small amount of BSK medium. The specimens were then fixed according to Hayes and Burgdorfer (1979) and processed as outlined above.

Examination was done in an ETEC Autoscan scanning electron microscope at 20 kV. Micrographs were recorded on type 55 positive/negative Polaroid film.

Serologic testing of rabbit and human sera

The immune responses of rabbits fed on by infected *I. ricinus* and of persons with diagnosed ECM were determined by indirect immunofluorescence as outlined previously (Burgdorfer et al., 1982). *I. ricinus* spirochetes cultured in BSK medium were used as antigen. The sera were also evaluated for antibodies against the *I. dammini* spirochete (New York isolate). Similarly, sera of rabbits immunized against the *I. dammini* spirochete and sera of patients with Lyme disease were tested for antibodies to the *I. ricinus* isolate.

Immunochemical analysis of antibody-antigen reactions

The immune responses of patients with ECM and Lyme disease were also subjected to the

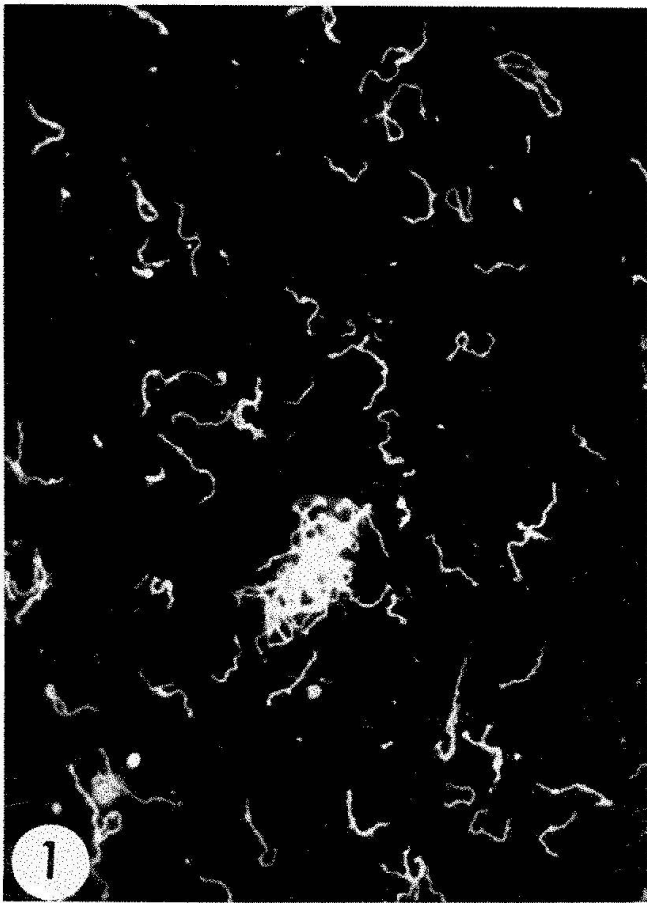


Fig. 1. Spirochetes in midgut smear of *I. ricinus*. Direct fluorescent antibody staining with a conjugate prepared from sera of rabbits immunized against the *I. dammini* spirochete (750 \times).

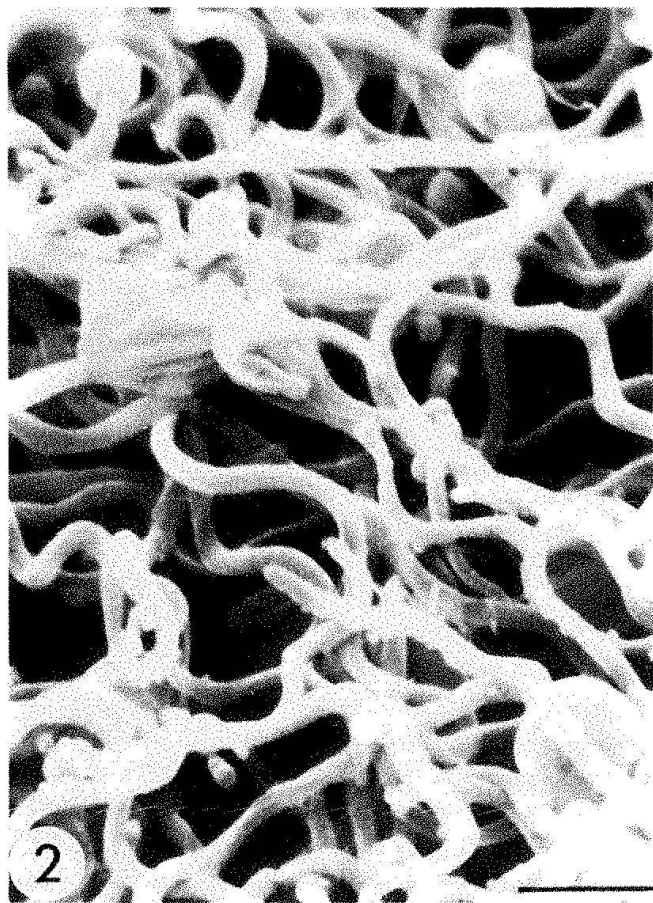


Fig. 2. Scanning electron micrograph of *I. ricinus* spirochetes in BSK medium (bar = 1.0 μ m).

western blot analysis (Towbin et al., 1979). This procedure involves the separation of proteins in spirocheteal lysates by sodium dodecyl-sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE), the electrophoretic transfer of proteins to nitrocellulose, the incubation of blots with antisera, and the detection of reactions with 125 I-labeled protein A by autoradiography. For details see Barbour et al. (1982a).

Results

Detection of spirochetes in *I. ricinus*

Of 201 individually examined unfed adult ticks, 73 (36.3%) were infected with spirochetes. The organisms were limited to the midgut in 69 ticks but were found in all the tissues including hemolymph in 4 ticks. As illustrated in Figure 1, the spirochetes reacted strongly with FITC-la-

beled antibodies to the *I. dammini* isolate. Of the additional 180 females that had fed on rabbits and survived feeding and oviposition, 39 (21.9%) were infected. Two showed a generalized infection whereas the remaining 37 contained spirochetes only in their midgut.

Both females with generalized infection oviposited properly and each revealed intensive spirocheteal infections of ovarian tissues. Examination of larval progeny resulted in filial infection rates of 100 and 60%, respectively.

Isolation of spirochetes from *I. ricinus*

Isolation of the spirochete in BSK medium was readily accomplished. Tubes inoculated with the 3,000-fold dilution of the infected tick suspension were positive as early as 7 days after inoculation. At 35°C the organism grew well with a generation time of about 12 hours (Figure 2).

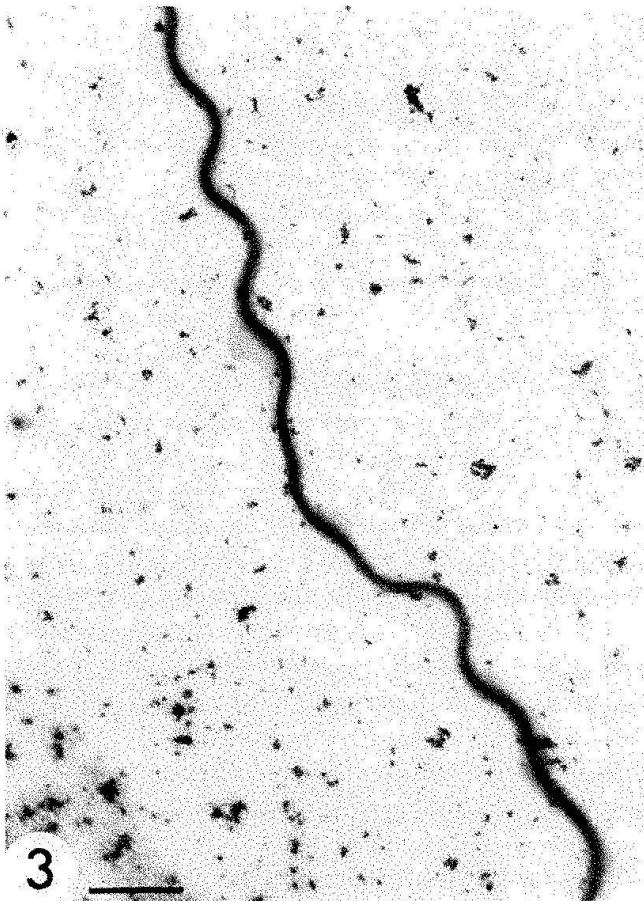


Fig. 3. *I. ricinus* spirochete negatively stained with 2% ammonium molybdate (bar = 2.0 μ m).

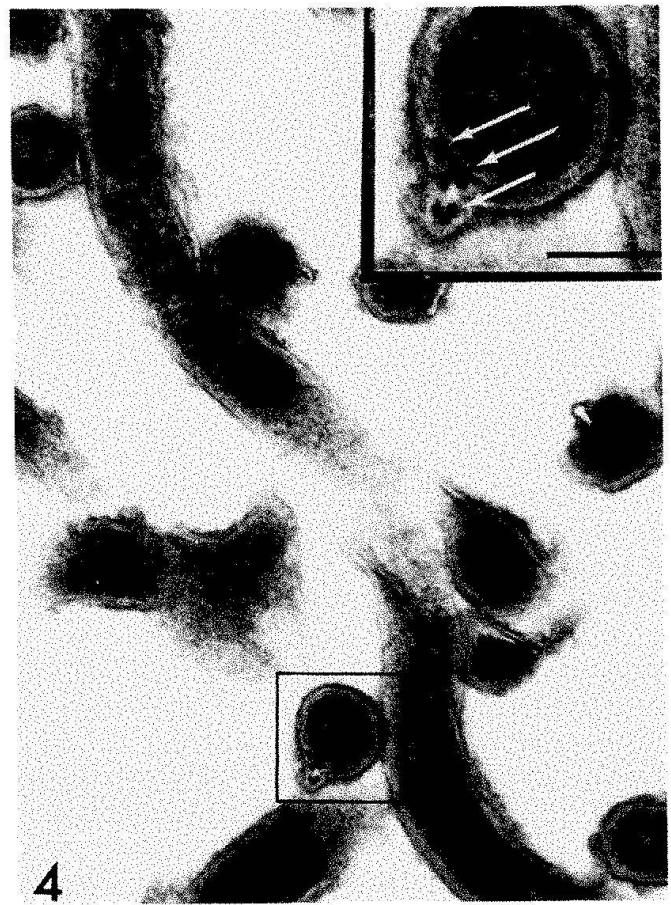


Fig. 4. Electron micrograph of the *I. ricinus* spirochete. Inset shows cross section with arrows pointing to 6 filaments (bar = 0.2 μ m; inset bar = 0.1 μ m).

Morphological characterization of the *I. ricinus* spirochete

In gross and fine structural morphology, the *I. ricinus* spirochete in its vector or in BSK medium appeared indistinguishable from the previously described *I. dammini* spirochete (Burgdorfer et al., 1982). Irregularly coiled, it ranges from 10 to 30 μ m in length and from 0.18 to 0.25 μ m in diameter. Its ends are also tapered, and from 6 to 8 filaments are inserted subterminally at each end (Figures 3 and 4). As on the *I. dammini* spirochete, insertion points of the filaments are located in a row paralleling the cell's long axis.

Susceptibility of rabbits to the *I. ricinus* spirochete

Of the 8 rabbits that served as blood donors for the 200 *I. ricinus* females, 7 were fed on by as

few as one to as many as 19 infected ticks. When tested for antibodies by indirect immunofluorescence 28 days after the engorged ticks had dropped, all 7 rabbits had titers ranging from 1:40 to > 1:1,280. The rabbit fed on by negative ticks did not have antibodies.

As early as 4 weeks after tick feeding, multiple lesions appeared on the back and lateral trunk of each seropositive rabbit. Small annular papules at first, they gradually enlarged to annular or irregularly shaped erythematous lesions, 3 to 5 cm in diameter, that were surrounded by a narrow, dark-red border (Figure 5). By the 12th week after tick feeding these lesions were still detectable in some rabbits, but had disappeared in others.

Relationship between the *I. ricinus* spirochete and ECM

The sera of 2 Swiss patients (M.L. and J.P.Gl.) with diagnosed ECM had antibody titers of



Fig. 5. ECM-like lesions on the trunk of a rabbit fed on by infected *I. ricinus* 12 weeks previously.

> 1:1,280 and 1:80 respectively against the *I. ricinus* spirochete whereas sera of 2 persons who had never experienced this illness were nonreactive.

Identity of the *I. ricinus* spirochete as the etiologic agent of ECM was also demonstrated by the results of the western blot analysis of the serum from patient M.L. As seen in Figure 6, positive reactions were obtained against several protein bands of the *I. ricinus* spirochete.

Antigenic similarities between *I. ricinus* and *I. dammini* spirochetes

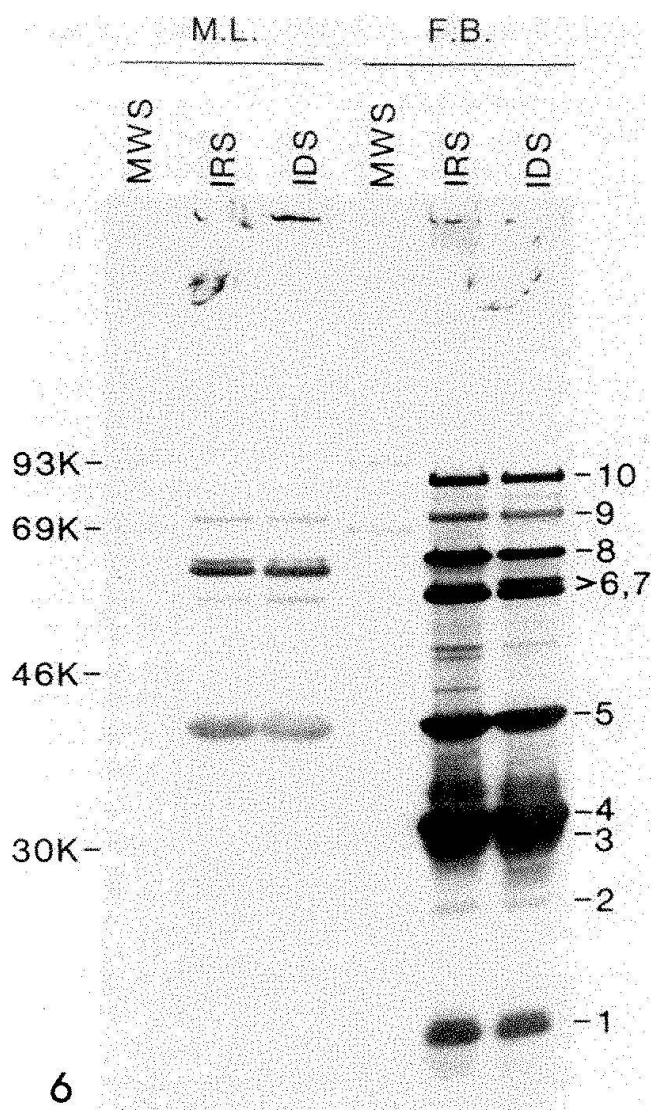
As summarized in Table 1, sera from rabbits immunized by exposure to ticks infected with *I. ricinus* spirochetes and from patients diagnosed as having had ECM, had antibodies that reacted in a similar often identical way to both the *I. dammini* spirochete and the *I. ricinus* spirochete. The same was true for rabbits fed on by

Table 1: Cross reacting antibodies against the *I. ricinus* and *I. dammini* spirochetes in immune rabbits and patients

| Immune Host: | Immunized by: | Reciprocal indirect immunofluorescence titers against | |
|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------|
| | | <i>I. ricinus</i> spirochete | <i>I. dammini</i> spirochete |
| Rabbit No. 3335 | Feeding of infected <i>I. ricinus</i> | 640 | 640 |
| No. 3336 | Feeding of infected <i>I. ricinus</i> | 1,280 | 1,280 |
| ECM patient M.L. | tick | 1,280 | 1,280 |
| J.P.G1.* | ? | 80 | 160 |
| Rabbit No. 3092 | Feeding of infected <i>I. dammini</i> | 640 | 640 |
| No. 3093 | Feeding of infected <i>I. dammini</i> | 640 | 960 |
| Lyme disease patient J.G.** | tick | 640 | 1,280 |
| C.T.** | tick | 320 | 320 |

* Diagnosed by Dr. J.P. Jeanneret, Neuchâtel, CH.

**Diagnosed by Dr. E. Grunwaldt, Shelter Island, New York, USA



infected *I. dammini* and for patients with Lyme disease. With few exceptions, their antibody titers to the *I. ricinus* spirochete and to the *I. dammini* agent were of the same magnitude. Shared antigenic determinants were also demonstrated by western blot analysis of sera from ECM patient M.L. of Switzerland and Lyme disease patient F.B. of Connecticut (kindly provided by Dr. A. Steere, Yale University, New Haven, Connecticut). There were only minor differences between the *I. ricinus* spirochete and the *I. dammini* spirochete in the antigens that reacted with immunoglobulins in the two sera (Fig. 6). M.L.'s serum contained antibodies that detectably bound to fewer antigens than F.B.'s antibodies in this analysis. Sera from 2 Swiss controls and 2 Connecticut controls did not contain antibodies that detectably bound any spirochete component in blots (data not shown).

Fig. 6. Western blot analysis of antigens in the *I. ricinus* (IRS) and *I. dammini* (IDS) spirochetes. Proteins in whole cell lysates were separated by SDS-PAGE, then transferred to nitrocellulose, incubated with 1:100 dilutions of sera from ECM patient M.L. and Lyme disease patient F.B., and probed with 125 I-labeled protein A. Molecular weight standards (MWS) are indicated on the left. Intensely emitting bands in the F.B. serum are arbitrarily numbered 1 to 10. Note the close similarities of reactions of sera for both the IRS and IDS spirochetes.

Discussion

Isolation from *I. ricinus* from Switzerland of a spirochete morphologically and immunologically indistinguishable from the spirochete recently recovered (Burgdorfer et al., 1982) from *I. dammini* on Shelter Island, New York, not only suggests that the *I. ricinus* spirochete is the etiologic agent of ECM in Europe but also supports the hypothesis that ECM of Europe and Lyme disease of the United States are different expressions of the same infectious process.

Absence of arthritis and arthralgias in ECM of Europe has led to the consensus that Lyme disease in the United States is a clinically distinct disease entity far more complex and severe than ECM. Nevertheless, recent clinical reviews (Reik et al., 1979) of neurologic manifestations in Lyme disease and ECM stress their striking similarities and suggest that joint involvement may have been overlooked early in the course of ECM or may have been attributed to other causes later on. The presence of ECM cases indistinguishable from Lyme disease has recently been reported from Switzerland (Gerster et al., 1981) and France (Charmot et al., 1982, Mallecourt et al., 1982).

In an analysis of the natural histories of ECM and Lyme disease, one has to recognize the deer – the roe deer (*Capreolus capreolus*) in Europe, and the white-tailed deer (*Odocoileus virginianus*) in the United States – as a common factor. Indeed, the deer is a preferred host of all those ixodid ticks that thus far have been incriminated as vectors of ECM spirochetes, i.e., *I. ricinus*, *I. dammini*, and *I. pacificus*, and therefore should be the prime target in the search for a spirochete reservoir in nature. In support of this are the most recent findings by our collaborators of the New York State Health Department (Dr. E. M. Bosler – personal communication) who isolated a spirochete from a fawn,

and detected spirochetes in blood smears from 8 of 11 deer killed on Shelter Island, New York. The ixodid tick, *I. ricinus*, is the most widely distributed tick of Europe. In Switzerland, it is especially abundant in forested areas along the lake shores on the Swiss Plateau where it parasitizes a large variety of small, medium-sized, and large animals including deer (Aeschlimann, 1972). Like *I. dammini*, all developmental stages of *I. ricinus*, but particularly larvae and nymphs, readily feed on man. It is well-known that the tick plays a more or less important role as a vector of several animal and human pathogens including tickborne encephalitis virus, *Babesia divergens* and *B. bovis*, several rickettsiae of the spotted fever group, *Coxiella burnetii*, microfilariae, and trypanosomes (reviewed by Aeschlimann et al., 1979). Its role in the ecology and epidemiology of ECM, although long suspected, is currently being defined at the Rocky Mountain Laboratories.

Little is known about the relation of the recently isolated spirochetes to their tick vectors. That the spirochete is limited to the midgut diverticula in most *I. ricinus*, raises the as yet unsolved question of how it is transmitted to a

host. Answers may soon be provided as a result of studies now in progress in our laboratories on the development of spirochetes in *I. ricinus* and *I. dammini*.

Many fascinating and challenging clinical questions also remain to be solved. For example, the pathogenesis of the ECM lesion(s) needs to be explained. As yet, it is not known whether their appearance is associated with the presence of spirochetes. In the present study, we again noted the appearance of multiple ECM-like lesions on back and trunk of New Zealand white rabbits weeks after infected *I. ricinus* fed on them. Their similarity to the cutaneous lesions described by Burgdorfer et al. (1982) in rabbits fed on by infected *I. dammini* and their nonoccurrence in rabbits fed on by normal ticks suggest that they represent an expression of the disease process.

Availability of the BSK medium for culturing spirochetes and of sophisticated immunological and immunochemical research techniques make it possible to address the above questions now. Thus, one may predict with confidence that a medical mystery recognized as early as 1908 is nearing solution.

Literature

- Aeschlimann, A. 1972: *Ixodes ricinus*, Linné, 1758 (*Ixodidae*; *Ixodidae*). Essai préliminaire de synthèse sur la biologie de cette espèce en Suisse. *Acta Tropica*, 29, 321–340.
- Aeschlimann, A., Burgdorfer, W., Matile, H., Péter, O., Wyler, R. 1979: Aspects nouveaux du rôle de vecteur joué par *Ixodes ricinus* L. en Suisse. Note préliminaire. *Acta Tropica*, 36, 181–191.
- Afzelius, A. 1921: Erythema chronicum migrans. *Acta Dermatovenereologica*, 2, 120–125.
- Barbour, A. G., Tessier, S. L., Stoenner, H. G. 1982a: Variable major proteins of *Borrelia hermsii*. *Journal of Experimental Medicine*, 156, 1312–1324.
- Barbour, A. G., Burgdorfer, W., Hayes, S. F., Péter, O., Aeschlimann, A. 1982b: Isolation of a cultivable spirochete from *Ixodes ricinus* ticks of Switzerland. *Current Microbiology*, 8, 123–126.
- Binder, E., Doepfner, R., Hornstein O. 1955: Übertragung des Erythema chronicum migrans von Mensch zu Mensch in zwei Passagen. *Klinische Wochenschrift*, 33, 727–728.
- Burgdorfer, W., Barbour, A. G., Hayes, S. F., Benach, J. L., Grunwaldt, E., Davis, J. P. 1982: Lyme disease – A tick-borne spirochetosis? *Science*, 216, 1317–1319.
- Charmot, G., Rodhain, F., Perez, C. 1982: Un cas d'arthrite de Lyme observé en France. *La Nouvelle Presse Médicale*, 11, 207–208.
- Degos, R., Touraine, R., Arouete, J. 1962: L'Erythema chronicum migrans (Discussion d'une origine rickettsienne). *Annales de Dermatologie et Syphilis*, 89, 247–260.
- Gerster, J. C., Guggi, S., Perroud, H., Bovet, R. 1981: Lyme arthritis appearing outside the United States: a case report from Switzerland. *British Medical Journal*, 283, 951–952.
- Hardin, J. A., Steere, A. C., Malawista, S. E. 1979: Immune complexes and the evolution of Lyme arthritis. *The New England Journal of Medicine*, 301, 1358–1363.
- Hayes, S. F., Burgdorfer, W. 1979: Ultrastructure of *Rickettsia rhipicephali*, a new member of the spotted fever group rickettsiae in tissues of the host vector *Rhipicephalus sanguineus*. *Journal of Bacteriology*, 137, 605–613.
- Laemmli, U. K., Favre, M. 1973: Maturation of the head of bacteriophage T₄. I. DNA packing events. *Journal of Molecular Biology*, 80, 575–599.
- Lipschütz, B. 1914: Über eine seltene Erythemaform (Erythema chronicum migrans). *Archiv für Dermatologie und Syphilis*, 118, 349–356.
- Mallecourt, J., Landureau, M., Wirth, A. M. 1982: La maladie de Lyme. Un cas clinique observé en Eure-et-Loir. *La Nouvelle Presse Médicale*, 11, 39–41.
- Mast, W. E., Burrows, W. M., Jr. 1976: Erythema chronicum migrans in the United States. *Journal of the American Medical Association*, 236, 859–860.
- Peacock, M., Burgdorfer, W., Ormsbee, R. A. 1971: Rapid fluorescent-antibody conjugation procedure. *Infection and Immunity*, 3, 355–357.

- Reik, L., Steere, A.C., Bartenhagen, N.H., Shope, R.E., Malawista, S.E. 1979: Neurologic abnormalities of Lyme disease. *Medicine*, 58, 281-294.
- Scrimenti, R.J. 1970: Erythema chronicum migrans. *Archives of Dermatology*, 102, 104-105.
- Steere, A.C., Malawista, S.E., Hardin, J.A., Ruddy, S., Askenase, P.W., Andiman, W.A. 1977: Erythema chronicum migrans and Lyme arthritis. The enlarging clinical spectrum. *Annals of Internal Medicine*, 86, 685-698.
- Steere, A.C., Gibofsky, A., Patarroyo, M.E., Winchester, R.J., Hardin, J.A., Malawista, S.E. 1979: Chronic Lyme arthritis. *Annals of Internal Medicine*, 90, 896-901.
- Steere, A.C., Malawista, S.E. 1979: Cases of Lyme disease in the United States: Locations correlated with distribution of *Ixodes dammini*. *Annals of Internal Medicine*, 91, 730-733.
- Steere, A.C., Malawista, S.E., Newman, J.H., Spieler, P.N., Bartenhagen, N.H., 1980a: Antibiotic therapy in Lyme disease. *Annals of Internal Medicine*, 93, 1-8.
- Steere, A.C., Batsford, W.P., Weinberg, M., Alexander, J., Berger, H.J., Wolfson, S., Malawista, S.E. 1980b: Lyme carditis: Cardiac abnormalities of Lyme disease. *Annals of Internal Medicine*, 93, 8-16.
- Stoenner, H.G., Larsen, C., Dodd, T. 1982: Antigenic variation of *Borrelia hermsii*. *Journal of Experimental Medicine* (in press).
- Towbin, H., Staehelin, T., Gordon, J. 1979: Electrophoretic transfer of proteins from polyacrylamide gels to nitrocellulose sheets: procedure and some applications. *Proceedings National Academy of Sciences, USA*, 76, 4350-4354.

Addresses of the authors:

Willy Burgdorfer
Olivier Péter
Epidemiology Branch, Rocky Mountain Laboratories, National Institute of Allergy and Infectious Diseases
Hamilton
Montana 59840
USA

Alan G. Barbour
Laboratory of Microbial Structure and Function, Rocky Mountain Laboratories, National Institute of Allergy and Infectious Diseases
Hamilton
Montana 59840
USA

Stanley F. Hayes
Rocky Mountain Operations Branch, Rocky Mountain Laboratories, National Institute of Allergy and Infectious Diseases
Hamilton
Montana 59840
USA

Prof. Dr. André Aeschlimann
Zoological Institute of the University of Neuch  tel
Chantemerle 22
CH-2000 Neuch  tel 7

Die Bedeutung der Immunologie für die Diagnose und die Bekämpfung parasitärer Krankheiten

Niklaus Weiss

Die Immunologie hat als eigenständige Wissenschaft in den letzten 20 Jahren einen enormen Aufschwung genommen. Der dazu nötige grosse Forschungsaufwand war möglich, weil von der Immunologie Lösungen wichtiger Gesundheitsprobleme erwartet werden. Im Vordergrund stehen Gesundheitsprobleme westlicher Industrienationen, wie etwa die Bekämpfung von Tumor- und Autoimmunkrankheiten. Erkennen wir aber die vordringlichen Gesundheitsprobleme der Dritten Welt, so spielen dort die bei uns als Todesursache nur noch unbedeutenden Infektionskrankheiten und die bei uns nicht heimischen Parasitosen eine wichtige Rolle. Der kürzlich erfolgten Ausrottung der Pocken steht in den letzten Jahren ein Vormarsch verschiedener parasitärer Tropenkrankheiten, als Beispiele Malaria, Schlafkrankheit, Bilharziose und Filariosen, gegenüber. Diese Parasitosen betreffen Hunderte von Millionen Menschen. Allein an der Malaria, so wird geschätzt, sterben alljährlich in Afrika eine Million Kinder. Um die vernachlässigte immunologische und chemotherapeutische Forschung auf dem Gebiet von sechs wichtigen Tropenkrankheiten zu fördern (es handelt sich um die Lepra und neben den schon genannten Parasitosen um die Leishmaniose) wurde 1975 von der Weltgesundheitsbehörde ein Spezialprogramm erarbeitet. Gemessen an der Vielfalt und der Grösse der gesteckten Programmziele sind die pro Jahr zur Verfügung gestellten Mittel von rund 50 Millionen Schweizer Franken (das entspricht etwa den Aufwendungen des Schweizerischen Nationalfonds für die Abteilung Biologie und Medizin) eher bescheiden, doch lässt sich heute eine Signalwirkung klar erkennen: In den letzten Jahren haben sich eine Reihe von Immunologen, Biochemikern und Molekularbiologen der parasitologischen Forschung verschrieben.

Zunächst soll die Bedeutung der Immunologie für die Diagnose parasitärer Krankheiten behandelt werden, wobei wir zwischen der Indivi-

dualdiagnostik und der Seroepidemiologie unterscheiden müssen. Für unser Institut stand bis heute die Serodiagnostik importierter Parasitosen im Vordergrund. Die mit eingeschleppten Parasitosen verbundenen diagnostischen Probleme beruhen neben einer viszeralen Lokalisation gewisser Erreger – Kala-Azar, Chagas-Krankheit und invasive Amoebiase als Beispiele – auf einem geringen Parasitenbefall bei Gewebshelminthiasen, der durch einen kurzen Tropenaufenthalt und geringes Expositionsrisiko bedingt ist. Diese Tatsachen machen einen direkten Erregernachweis schwierig oder gar unmöglich. Liegt bei einem Tropenrückkehrer ein eindeutiges klinisches Bild ohne parasitologische Bestätigung vor, so vermag die Serologie den Arzt in seiner klinischen Diagnose zu bestärken. Bei rund 40 % der in unserer Poliklinik entdeckten Filariosen sind trotz intensiven parasitologischen Untersuchungen keine Mikrofilarien nachzuweisen. Noch wichtiger als die Bestätigung einer klinischen Diagnose scheint mir die Rolle der Serologie bei der Abklärung unklarer klinischer Befunde oder pathologischer Laborwerte. Als Beispiel möchte ich den Befund einer Bluteosinophilie erwähnen, der bei jedem 7. Tropenrückkehrer erhoben wird. Bei der aetiologischen Abklärung denkt der Tropenarzt zunächst an eine Helminthiasis. Sind parasitologische Untersuchungen negativ ausgefallen, so können wir dem Arzt heute einen serologischen Suchtest auf Gewebshelminthiasen anbieten (Speiser 1982). Mit einer hochempfindlichen Immunezym-Methode wird das Patientenserum auf Antikörper gegen fünf ausgewählte Wurmantigene geprüft und zudem der Immunglobulin-E-Spiegel, der bei Helminthiasen bis zu 100mal erhöht sein kann, ermittelt. Am serologischen Befund lässt sich das weitere diagnostische Vorgehen ausrichten. Die Aussagekraft serologischer Befunde wird allerdings wegen der z. T. ungenügenden Spezifität der zur Verfügung stehenden Methoden eingeschränkt. Die Zahl verlangter Serologien hat in

den letzten Jahren stetig zugenommen. Seit Bestehen des serologischen Laboratoriums sind rund 100 000 Diagnosen gestellt worden. Die serologische Palette ist von drei auf zehn Parasitosen erweitert und neben der bewährten Immunfluoreszenz-Methode weitere Methoden eingesetzt worden (Weiss & Degrémont 1976, Weiss et al. 1978, Weiss et al. 1981). Weitere Verbesserungen, vor allem der Spezifität der parasitären Serodiagnostik, sind nicht nur für die Individualdiagnostik, sondern auch für epidemiologische Untersuchungen dringend nötig. Fortschritte der letzten Jahre haben sich vor allem auf eine verbesserte Empfindlichkeit – mit Enzym- oder Radioimmuntests lassen sich milliardstel Gramm von Antikörpern nachweisen – beschränkt. Eine serologische Differentialdiagnose zwischen humanpathogenen Filariosen ist heute noch nicht möglich. Eine artspezifische Filarienserologie, der eindeutige Nachweis einer Onchozerkose zum Beispiel, ist ein dringendes Anliegen von Epidemiologen. Gefordert wird eine wenn möglich einfache und äusserst zuverlässige Methode, Neuinfektionen frühzeitig zu erkennen. Dies im Zusammenhang mit der grossangelegten Vektorbekämpfungsaktion in Westafrika. Ein Mikrofilariennachweis ist erst 12 bis 18 Monate nach Infektion möglich! Zurzeit versuchen wir, an elektrophoretisch aufgetrennten Wurmextrakten von *Onchocerca volvulus* artspezifische Allergene nachzuweisen. Die dabei festgestellten ausgeprägten Kreuzreaktionen mit Filariose-Seren aus onchozerkosefreien Gebieten (z. B. Indien) lassen aber bis heute keine grosse Hoffnung auf die Isolation eines artspezifischen Antigens aufkommen (Weiss et al. 1982). Eine grosse Zukunft liegt auch für die parasitäre Serodiagnostik in der Anwendung der Hybridomtechnologie. Mit Hilfe geeigneter monoklonaler Antikörper, die eine artspezifische Antigendeterminante innerhalb eines serologisch wichtigen Antigens entdecken, liesse sich eine spezifische Diagnose realisieren.

Bevor ich das Thema der immunologischen Bekämpfung parasitärer Krankheiten behandle, möchte ich kurz auf das Wirt-Parasiten-Verhältnis aus immunologischer Sicht eingehen. Grundsätzlich können wir die durch Parasiten induzierten Wirtsantworten in für den Wirt nutzlose, für den Wirt vorteilhafte und den Wirt schädigende einteilen. Unter nutzlosen Immunreaktionen meine ich solche, die das Wirt-Parasiten-Verhältnis nicht beeinflussen, die aber,

unter Umständen, für die Immundiagnostik wichtig sein können. Bei den den Wirt schädigenden Immunreaktionen nach Parasitenbefall sind alle Typen von Überempfindlichkeitsreaktionen, die polyklonale Aktivierung von Lymphozyten sowie die Bildung von Autoantikörpern beteiligt. Auf eine mögliche Strategie, immunpathologische Prozesse bei Parasitosen mit immunologischen Mitteln zu verhindern, kann ich hier nicht eingehen. Kommen wir schliesslich zu den vorteilhaften Immunantworten, die das Wirt-Parasiten-Verhältnis zugunsten des Wirtes beeinflussen. Im besten Fall würde dies bedeuten, dass der Wirt den Erreger eliminiert und es zur Ausbildung einer sterilisierenden Immunität kommt. Dies ist aber im Gegensatz zu mikrobiellen Infektionskrankheiten, etwa bei Kinderkrankheiten, bei Parasitosen äusserst selten. Als Beispiel liesse sich nur die kutane Leishmaniose anführen. Abgesehen von der ostafrikanischen Schlafkrankheit, bei welcher der Wirt in kürzester Zeit stirbt, sind Parasitosen Krankheiten, die sich über Jahre, ja Jahrzehnte hinziehen. Auf Grund neuer immunparasitologischer Befunde sehe ich aber die andauernde Vergesellschaftung von Wirt und Parasit nicht als Zeichen einer «friedlichen Koexistenz», sondern als höchst dynamisches, ja dramatisches Geschehen. Immunologische Effektormechanismen des Wirtes stehen der Fähigkeit des Parasiten zur Evasion gegenüber. «Die Parasiten sind die besseren Immunologen», hat ein Kollege gemeint und auf die erstaunlichen Fähigkeiten der Parasiten hingewiesen, die ihnen erlauben, in einem sensibilisierten Wirt zu überleben.

Wo stehen wir heute auf dem Weg, über eine aktive Immunisierung, d. h. Schutzimpfung, zu einer immunologischen Kontrolle parasitärer Infektionen zu gelangen? Im Gegensatz zu erfolgreichen Impfungen gegen mikrobielle Infektionskrankheiten verfügen wir heute über keine Vakzine gegen humanpathogene Parasiten. An zwei Beispielen möchte ich den heutigen Stand der immunparasitologischen Forschung skizzieren:

Das erste Beispiel stammt aus dem Gebiet unserer eigenen Forschungsarbeit, die seit 1975 vom Schweizerischen Nationalfonds unterstützt wird. Es betrifft Filariosen, also durch Fadenwürmer bedingte Nematodenerkrankungen. Quintessenz unserer Untersuchungen an einer experimentellen Nagetierfilarie ist der Nachweis, dass Wirtsreaktionen gegen die Parasiten-

oberfläche, die früher als inert oder als kaum antigen bezeichnet worden ist, den Parasiten schädigen können (Weiss & Tanner 1981). Die Immunität des Goldhamsters gegen zirkulierende Mikrofilarien beruht auf einem Eliminationsmechanismus, an dem spezifische, gegen die Mikrofilarienoberfläche gerichtete Antikörper und weisse Blutzellen, nämlich neutrophile und eosinophile Granulozyten und Monozyten, beteiligt sind. Dass es sich um eine antikörperabhängige zelluläre Zytotoxizitätsreaktion handelt, haben *in vivo* Experimente an in Mikroporenkammern eingeschlossenen Mikrofilarien belegt. Jüngste Untersuchungen anderer Autoren mit human-pathogenen Mikrofilarien haben unsere Beobachtungen bestätigt. Für die Entwicklung einer Vakzine steht aber ein anderes Filarienstadium, nämlich die infektiöse Larve, im Vordergrund. Frühere Arbeiten anderer Autoren haben gezeigt, dass es mit bestrahlten, lebenden Larven gelingt, im Tierversuch einen partiellen Impfschutz zu erreichen. Dies ist auch bei unserem Labormodell der Fall (Tanner & Weiss 1981). Mit der Anwendung spezieller Untersuchungsmethoden, der Kammertechnik und der *in vitro* Kultivierung infektiöser Larven, ist es uns gelungen, erstmals Immuneffekte auf sich entwickelnde Filarienlarven nachzuweisen (Gass et al. 1979, Tanner & Weiss 1981). Humorale Immunfaktoren, darunter Antikörper gegen die Larvenoberfläche, führen ohne Zellbeteiligung zu einer Wachstumsinhibition und zum Absterben der Filarienlarven. Die Filarienoberfläche, die Kutikula, stellt also ein wichtiges Zielorgan für die Wirtsantwort dar. Die Isolierung und Charakterisierung von Kutikula-Antigenen steht im Brennpunkt unserer laufenden Forschungsarbeit (Baschong et al. 1982). Angesichts der sowohl molekularen wie auch strukturellen Komplexität und Dynamik der Kutikula – sie wächst, erneuert sich und nimmt selektiv Nährstoffe auf – ist die Analyse der Oberflächenantigene keine leichte Aufgabe. Als zweites Beispiel möchte ich neuere Arbeiten erwähnen, die zu einer Malariavakzine hinführen sollen (S.W.G. review 1981). Mit Hilfe monoklonaler Antikörper gegen die Oberfläche von Sporozoiten, d. h. gegen die von der Stechmücke injizierten Parasitenstadien, ist es gelungen, wichtige Antigene, die am Aufbau einer protektiven Immunantwort beteiligt sind, zu charakterisieren. In weiteren Schritten sollen solche Antigene gentechnologisch produziert und dann auf ihre Eignung als Impfstoff ge-

prüft werden. Obwohl noch manche Probleme gelöst werden müssen – etwa einen ausreichenden Schutz über einen längeren Zeitraum mit einem geeigneten Adjuvans zu gewährleisten – scheint der Weg zu einer Malaria-Impfung vorgezeichnet.

Vorausgesetzt, dass die finanziellen Mittel zur Verfügung gestellt werden – in der heutigen ökonomischen Situation der Industrieländer leider nicht selbstverständlich – bin ich überzeugt, dass die Immunologie einen Beitrag zur Bekämpfung parasitärer Krankheiten leisten kann. Was nützen uns aber die besten wissenschaftlichen und biotechnischen Errungenschaften, wenn der noch ungenügende Stand des Gesundheitswesens in vielen Ländern der Dritten Welt ihre Anwendungen verunmöglicht. Es gibt doch sehr zu denken, dass, obwohl wir heute über eine ausgezeichnete Masernvakzine verfügen, diese Kinderkrankheit noch abertausende von Kindern in armen Ländern dahinrafft. Die Forschungsarbeit zur Lösung dringender Gesundheitsprobleme der Dritten Welt ist nur dann sinnvoll, wenn echte Anstrengungen unternommen werden, weltweit ein Basisgesundheitssystem zu schaffen, das eine medizinische Betreuung eines jeden Menschen garantiert.

Literatur

- Baschong, W., Tanner, M., Betschart, B., Rudin, W., Weiss, N. 1982: *Dipetalonema viteae*: Extraction and immunogenicity of cuticular antigens from female worms. *Exp. Parasitol.* 53, 262–269.
- Gass, R. F., Tanner, M., Weiss, N. 1979: Development of *Dipetalonema viteae* third-stage larvae (Nematoda, Filarioidea) in micropore chambers implanted into jirds, hamsters, normal and immunized mice. *Z. Parasitenk.* 61, 73–82.
- Speiser, F. 1982: Serodiagnosis of tissue dwelling parasites: Application of a multi-antigen enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) for screening. *Ann. Soc. belge Méd. trop.* 62, 103–120.
- S.W.G. (Scientific working group) 1981: Antigenic structure and related aspects of the biology of plasmodia: the present situation. *Bull. W.H.O.* 59, 371–381.
- Tanner, M., Weiss, N. 1981: *Dipetalonema viteae* (Filarioidea): Evidence for a serum-dependent cytotoxicity against developing third and fourth stage larvae *in vitro*. *Acta trop. (Basel)* 38, 325–328.
- Weiss, N., Degrémont, A. 1976: Vergleichende Untersuchungen zur Immunodiagnostik der Filariasis. *Tropenmed. Parasitol.* 27, 377–384.

- Weiss, N., Stürchler, D., Dietrich, F. M. 1978: Radioallergo-sorbent and indirect fluorescent antibody test in immunodiagnosis of schistosomiasis. *The Lancet* ii, 1231-1233.
- Weiss, N., Speiser, F., Hussain, R. 1981: IgE antibodies in human onchocerciasis. Application of a newly developed radioallergosorbent test (RAST). *Acta trop. (Basel)* 38, 353-362.
- Weiss, N., Tanner, M. 1981: Experimental filariasis in the Syrian hamster; immunological aspects of complex host-parasite interactions. In "Hamster immune responses in infectious and oncologic diseases" ed. J. W. Streilein et al., Plenum Press, New York, pp. 253-265.
- Weiss, N., Gualzata, M., Wyss, T., Betschart, B. 1982: Detection of IgE-binding *Onchocerca volvulus* antigens after electrophoretic transfer and immuno-enzyme reaction. *Acta trop. (Basel)* 39, 373-377.

Adresse des Autors:

Niklaus Weiss
Schweizerisches Tropeninstitut
Socinstrasse 57
CH-4057 Basel

Blutverdauung bei Insekten

Hermann Hecker

Weshalb interessieren wir uns für blutsaugende Insekten?

Haematophage Insekten saugen Blut auf Mensch und Tier. Etliche unter ihnen brauchen die proteinreiche Diät zur Deckung ihres Metabolismus (z. B. adulte Flöhe und Tsetsefliegen), andere um sich hemimetabol zu entwickeln (z. B. Läuse und Wanzen). Von weiteren Insekten sind nur die Weibchen im Zusammenhang mit der Eibildung blutsaugend (z. B. Stechmücken).

Die Einnahme von Blut stimuliert in weiblichen Stechmücken diverse zelluläre Prozesse im Mitteldarm und ermöglicht es, zellbiologische Phänomene zu induzieren und zu untersuchen (Gander et al. 1980, Hecker und Rudin 1981). Eine Reihe haematophager Arthropoden sind dank ihrer speziellen Ernährungsweise Überträger von Krankheiten (Malaria, Trypanosomiasen, Filariosen, etc.). Diese Gründe haben dazu geführt, dass sich Parasitologen mit der Blutverdauung bei Arthropoden auseinandersetzen (Lit. in Bauer 1981). Solche Untersuchungen gewinnen noch an Bedeutung, wenn man weiss, dass Verdauungsprozesse die Entwicklung von Parasiten, die mit dem Blut aufgenommen werden, beeinflussen können (Gass 1977, Freyvogel 1980).

Die Verdauung des Blutes erfolgt zur Hauptsache im Mitteldarm. In den letzten Jahren ist mit Hilfe elektronenmikroskopischer Methoden die funktionelle Morphologie dieses Darmabschnitts bei verschiedenen haematophagen Insekten bearbeitet worden (Raubwanzen: Bauer 1981, Stechmücken: Hecker 1977, Rudin und Hecker 1979, Houk und Hardy 1979, Schmetterlingsmücken: Gemetchu 1974, Rudin und Hecker 1982, Stallfliegen: Lehane 1977, Tsetsefliegen: Böhringer 1977, Brown 1980 und Flöhe: Reinhardt 1976).

Struktur und Funktion des Mitteldarms von Stechmücken

Hier sollen die wesentlichsten Resultate betreffend Struktur und Funktion des Mitteldarms weiblicher Stechmücken kurz zusammengefasst werden. Die Hauptaufgaben des einschichtigen Darmepithels umfassen die Bildung der peritrophen Membran (pm) im Darmlumen, Synthese und Sekretion von Verdauungsenzymen, den Abbau der aufgenommenen Nahrung sowie auch die Resorption von Verdauungsprodukten. Bei allen Mückenarten, die bisher untersucht worden sind, besteht der Mitteldarm aus einem engen, vorderen Abschnitt und einem erweiterten, hinteren Teil, der als Magen bezeichnet wird (Hecker 1977).

Die Feinstruktur des Epithels beider Mitteldarmabschnitte wurde bei verschiedenen Stechmückenarten vor der Blutaufnahme und während der Verdauung elektronenmikroskopisch untersucht. Die Einführung der Morphometrie erlaubte es, unter Verwendung stereologischer Prinzipien (Hecker und Burri 1979), zelluläre Veränderungen zu quantifizieren und mit biochemischen und physiologischen Resultaten verschiedenster Arbeitsgruppen zu korrelieren (Briegel und Lea 1975, Yeates 1980, etc.). In der Folge konnte durch den Vergleich von *Aedes*- und *Anopheles*-Mücken gezeigt werden, dass einerseits gewisse feinstrukturelle Unterschiede zwischen diesen Gattungen bestehen, andererseits aber eine recht ähnliche Grundstruktur vorliegt (Hecker 1977). Der Vergleich des vorderen mit dem hinteren Mitteldarmabschnitt verdeutlichte vor allem quantitative Unterschiede, die eine funktionelle Interpretation zulassen.

Diese Gegenüberstellungen führten zum Postulat eines in seiner Basis gemeinsamen Funktionsmodells des Stechmücken-Mitteldarms

(Hecker 1977). Demzufolge dient der vordere Abschnitt der Resorption zuckerhaltiger Lösungen, die bei beiden Geschlechtern den Grundmetabolismus decken. Da pflanzlicher Nektar zum Teil Proteasen-Inhibitoren enthält (Gooding et al. 1973), ist es sinnvoll, dass bei den Weibchen Zuckerresorption und Blutverdauung räumlich und strukturell voneinander getrennt sind. Der Magen wird als Hauptort der Blutverdauung angesehen. In diesen Darmabschnitt gelangt das aufgenommene Blut, hier wird die pm gebildet, erfolgt die Sekretion vielfältiger Verdauungsenzyme (Esterasen, Lipasen, Proteasen). Auch die Hauptresorption der Verdauungsprodukte, deren teilweise, temporäre Speicherung und ihr Weitertransport in die Haemolymph, findet wahrscheinlich im Magen statt. Die Untersuchungen haben auch gezeigt, dass sich die geschilderten Prozesse in Phasen gliedern, die sich zum Teil stark überlappen (Gander 1968, Briegel und Lea 1975, Rudin und Hecker 1979, Yeates 1980).

Ohne auf Einzelheiten einzutreten, möchte ich hervorheben, dass sich quantitativ morphologische Befunde mit biochemischen Daten zu funktionell-morphologischen Aussagen verbinden liessen. So konnte beispielsweise die morphometrisch ermittelte Dynamik des rauen endoplasmatischen Retikulum (rer) und der Ribosomenpopulation der Magenzellen mit der Sekretion von Verdauungsenzymen, den Proteasen, korreliert werden. Alle gemessenen Parameter zeigten einen ähnlichen, zeitlichen Verlauf während der Blutverdauung (Hecker und Rudin 1981). Injektion von α -Amanitin, eines mRNA Polymerase Inhibitors, in Mückenweibchen verhinderte bei nachfolgender Blutaufnahme die Sekretion aktiver Proteasen (Fong und Fuchs 1976, Fuchs und Fong 1976), normale Verdauung, die Proliferation des rer und die Zunahme des Verhältnisses membrangebundener zu freien Ribosomen (Hecker und Rudin 1979). Dieses Experiment hat gezeigt, dass gewisse Prozesse der Verdauung bei Mücken transkriptionell kontrolliert werden.

Experimentelle Prüfung des «Funktionsmodells»

Zur Zeit werden am Schweiz. Tropeninstitut eine Reihe von Arbeiten ausgeführt oder abgeschlossen, um experimentell das postulierte

Funktionsmodell des Mitteldarms von Stechmücken zu prüfen. Felix et al. (in Vorbereitung) untersuchen verschiedene Möglichkeiten, wie in Magenzellen der Gelbfiebermücke, *Aedes aegypti*, die Sekretion von Proteasen stimuliert wird und gehen der Frage nach, ob letztere als Proenzyme vor der eigentlichen Verdauungsaktivität bereitgestellt, oder angeregt durch die Blutaufnahme, «de novo» synthetisiert werden. Berner (1982) hat soeben eine Untersuchung der pm der Malaria-Mücke, *Anopheles stephensi*, abgeschlossen. Er konnte zeigen, dass die Bildung der pm von der Sekretion apicaler, zytoplasmatischer Sekretgrana und von der Salzkonzentration im Darmlumen abhängt. Wesentliche Unterschiede in Bildungsweise und chemischer Zusammensetzung der pm von *An. stephensi* und *A. aegypti* wurden erfasst. Die pm von *An. stephensi* enthält beispielsweise kein Chitin, im Gegensatz zu derjenigen von *A. aegypti*. In einer weiteren Arbeit wird die Resorption verschiedener Verdauungsprodukte im Mitteldarm von *An. stephensi* mittels autoradiographischer Methoden untersucht (Schneider, in Vorbereitung).

Parallel zu den Arbeiten an Mücken werden vergleichbare Untersuchungen an anderen haematophagen Insekten vorangetrieben. Damit möchten wir zum Verständnis der Funktionen des Mitteldarms verschiedener Vektoren von tropischen Krankheiten beitragen und Einblick in zellbiologische Prozesse während der Blutverdauung gewinnen.

Beeinflusst die Verdauung die Entwicklung und Übertragung aufgenommenen Parasiten?

Verdauungsprozesse könnten auch für Parasiten, die mit Blut aufgenommen werden und in den Darm gelangen, von Bedeutung sein (Freyvogel 1980). Gass (1979), Gass und Yeates (1979), Yeates und Steiger (1981) haben gezeigt, dass Enzyme im Darm von *A. aegypti* die Entwicklung eines Malariaparasiten, *Plasmodium gallinaceum*, tatsächlich beeinflussen. Zygoten und undifferenzierte Ookineten wurden von trypsinähnlichen Proteasen zerstört. Andererseits waren differenzierte, motile Ookineten vor der Aktion des Enzyms soweit geschützt, dass sie sich durch die Zone der Verdauungsaktivität hindurcharbeiten, pm und Darmepithel durchdringen und das Haemocoel zur Weiterentwick-

lung erreichen konnten. Aus den Arbeiten von Gass wurde klar, dass die Verdauung der Mücken und die Entwicklung von *P. gallinaceum* zeitlich exakt aufeinander abgestimmt sein müssen. Falls eine Verschiebung eintritt, z. B. die Proteasenaktivität vorverlegt wird, kann sich der Parasit nicht entwickeln.

Es ist offen, wieweit solche Resultate zur Kontrolle der Übertragung der Malaria oder generell zur Bekämpfung von Krankheiten, die von Arthropoden übertragen werden, beitragen. Bevor wir in eine solche Richtung vorstossen können, müssen weitere, komplexe Wirt-Parasit-Beziehungen zwischen Überträger und Parasit erfasst werden. Deshalb scheint es mir wichtig, die Untersuchungen bei Stechmücken weiterzuführen und zu vertiefen, auf andere Arthropoden auszudehnen und auch die übertragbaren Parasiten zu bearbeiten.

Literatur

- Bauer, P.G. 1981: Ultrastrukturelle und physiologische Aspekte des Mitteldarms von *Rhodnius prolixus* Stal (Insecta, Heteroptera). Dissertation Universität Basel.
- Berner, R. 1982: Die Bedeutung zytoplasmatischer Grana bei der Bildung der peritrophen Membran und der Verdauungsenzyme im Mitteldarm von *Anopheles stephensi* (Liston) (Insecta, Diptera). Dissertation Universität Basel.
- Böhringer, S. 1977: Digestion in the tsetse fly: an ultrastructural analysis of structure and function of the midgut epithelium in *Glossina m. morsitans* (Machado) (Diptera: Glossinidae). Dissertation Universität Basel.
- Briegleb, H., Lea, A.O. 1975: Relationship between protein and proteolytic activity in the midgut of mosquitoes. *Journal of Insect Physiology* 21, 1597–1604.
- Brown, R.P. 1980: Ultrastructure and function of the midgut epithelium in the tsetse fly *Glossina morsitans*. *Journal of the entomological Society of South-Africa* 43, 195–214.
- Fong, W.F., Fuchs, M.S. 1976: The long term effect of α -amanitin on RNA synthesis in adult female *Aedes aegypti*. *Insect Biochemistry* 6, 123–130.
- Freyvogel, T.A. 1980: A propos des relations hôte/parasites entre moustiques et plasmodium. *Cahiers ORSTOM, Série Entomologie médicale et Parasitologie* 18, 171–176.
- Fuchs, M.S., Fong, W.F. 1976: Inhibition of blood digestion by α -amanitin and actinomycin D and its effect on ovarian development in *Aedes aegypti*. *Journal of Insect Physiology* 22, 465–472.
- Gander, E. 1968: Zur Histologie und Histochemie des Mitteldarmes von *Aedes aegypti* und *Anopheles stephensi* in Zusammenhang mit der Blutverdauung. *Acta tropica* 25, 133–175.
- Gander, E.S., Schoenenberger, M.C., Freyvogel, T.A. 1980: Ribosomes and ribosome-function in the midgut cells of *Aedes aegypti*. *Insect Biochemistry* 10, 441–447.
- Gass, R.F. 1977: Einfluss der Blutverdauung auf die Entwicklung von *Plasmodium gallinaceum* (Brumpt) im Mitteldarm von *Aedes aegypti* (L.). Dissertation Universität Basel.
- Gass, R.F. 1979: The ultrastructure of cultured *Plasmodium gallinaceum* ookinetes: a comparison of intact stages with forms damaged by extract from blood fed, susceptible *Aedes aegypti*. *Acta tropica* 36, 323–334.
- Gass, R.F., Yeates, R.A. 1979: In vitro damage of cultured ookinetes of *Plasmodium gallinaceum* by digestive proteinases from susceptible *Aedes aegypti*. *Acta tropica* 36, 243–252.
- Gemetchu, T. 1974: The morphology and fine structure of the midgut and peritrophic membrane of the adult female, *Phlebotomus longipes* Parrot and Martin (Diptera: Psychodidae). *Annals of tropical Medicine and Parasitology* 68, 111–124.
- Gooding, R.H., Cheung, A.C., Rolseth, B.M. 1973: The digestive processes of haematophagous insects. III: Inhibition of trypsin by honey and the possible functions of the oesophageal diverticula of mosquitoes. *Canadian Entomology* 105, 433–436.
- Hecker, H. 1977: Structure and function of midgut epithelial cells in Culicidae mosquitoes (Insecta, Diptera). *Cell and Tissue Research* 184, 321–341.
- Hecker, H., Burri, P.H. 1979: Gut epithelium of insects: A variable single-layered epithelium. In: Weibel, E.R.: *Stereological methods 1: Practical methods for biological morphometry*. Academic Press, London.
- Hecker, H., Rudin, W. 1979: Normal versus α -amanitin induced cellular dynamics of the midgut epithelium in females *Aedes aegypti* L. (Insecta, Diptera) in response to blood feeding. *European Journal of Cell Biology* 19, 160–167.
- Hecker, H., Rudin, W. 1981: Morphometric parameters of the midgut cells of *Aedes aegypti* L. (Insecta, Diptera) under various conditions. *Cell and Tissue Research* 219, 619–627.
- Houk, E.J., Hardy, J.L. 1979: In vivo negative staining of the midgut continuous junction in the mosquito, *Culex tarsalis* (Diptera: Culicidae). *Acta tropica* 36, 267–275.
- Lehane, M.J. 1977: Transcellular absorption of lipids in the midgut of the stablefly, *Stomoxys calcitrans*. *Journal of Insect Physiology* 23, 945–954.
- Reinhardt, C.A. 1976: Ultrastructural comparison of the midgut epithelia of fleas with different feeding behavior patterns (*Xenopsylla cheopis*, *Echidnophaga gallinacea*, *Tunga penetrans*, Siphonaptera, Pulicidae). *Acta tropica* 33, 105–132.
- Rudin, W., Hecker, H. 1979: Functional morphology of the midgut of *Aedes aegypti* L. (Insecta, Diptera) during blood digestion. *Cell and Tissue Research* 200, 193–203.
- Rudin, W., Hecker, H. 1982: Functional morphology of the midgut of *Lutzomyia longipalpis* (Diptera, Psychodidae) as compared to other hematophagous Nematocera. *Tissue and Cell*, 14, 751–758.
- Yeates, R.A. 1980: The mosquito *Aedes aegypti* (L.): evidence for three new proteinases. *Zeitschrift für Parasitenkunde* 61, 277–286.
- Yeates, R.A., Steiger, S. 1981: Ultrastructural damage of in vitro cultured ookinetes of *Plasmodium gallinaceum* (Brumpt) by purified proteinases of susceptible *Aedes aegypti* (L.). *Zeitschrift für Parasitenkunde* 66, 93–97.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. H. Hecker
Schweiz. Tropeninstitut
Socinstrasse 57
CH-4051 Basel

Tsetse-Fliegen, Trypanosomen und Schlafkrankheit

Leo Jenni

Afrikanische Trypanosomiasen haben während der letzten 10 Jahre infolge ihres vermehrten Auftretens und den lokal verheerenden Auswirkungen beim Menschen und bei seinen Haustieren an Bedeutung stark zugenommen. Nach neuesten Schätzungen leben heute 45 Millionen Menschen im unmittelbaren Risikobereich einer möglichen Übertragung zusammen mit Millionen von gefährdeten Haustieren in 46 verschiedenen Ländern Afrikas.

Die menschliche Schlafkrankheit wird durch zwei verschiedene Trypanosomen-Arten der Gattung *Trypanozoon* hervorgerufen, *Trypanosoma gambiense* und *Trypanosoma rhodesiense*. *Trypanosoma gambiense* ist verantwortlich für die eher chronische Krankheitsform in Zentral- und Westafrika, während *Trypanosoma rhodesiense* die akute Krankheitsform in Ostafrika verursacht.

Beide Trypanosomen-Arten werden durch Fliegen der Gattung *Glossina* (Tsetse-Fliegen) zyklisch übertragen. Da die Tsetse-Fliege nur in Afrika vorkommt, bleibt die Übertragung der menschlichen Schlafkrankheit auf diesen Kontinent beschränkt. Der Lebenszyklus der für die Schlafkrankheit verantwortlichen Trypanosomen ist sehr komplex. Die beim Stich der Tsetse-Fliege aufgenommenen Blutformen der Trypanosomen durchlaufen eine Serie von morphologischen und physiologischen Veränderungen während ihrer Vermehrung und Wanderung vom Mitteldarm der Fliege bis in die paarige Speicheldrüse. Diese Veränderungen sind zudem begleitet von einem Verlust der Infektiosität für den Warmblüter während der Umwandlung im Mitteldarm sowie einem Wiedererwerb dieser Infektiosität bei der Entwicklung zur metazyklischen Parasitenform in der Speicheldrüse. Diese letzte Form wird während der folgenden Blutmahlzeiten mit dem Speichel der Fliege in den Warmblüter injiziert.

Die Tsetse-Fliege ist wohl in verschiedener Hinsicht eine der eigenartigsten Fliegen, die wir kennen. Sie unterscheidet sich sowohl in ihrem

Lebenszyklus als auch in ihrem Verhalten von anderen haematophagen Insekten. Seit Kleine (1909) ihre Bedeutung als Überträgerin von Trypanosomen erkannt hatte, sind unzählige Versuche unternommen worden, die Verbreitung der 22 verschiedenen Glossinen-Arten, die Biologie und die Überträgerkapazität im Feld und später unter Laborbedingungen zu studieren. Nachdem es Mellanby (1937) gelungen war, aus Fliegenpuppen von *Glossina palpalis* in England 4 Generationen im Labor zu züchten, erzielte Geigy (1948) den Durchbruch zur kontinuierlichen Züchtung derselben Tsetse-Art während 4 Jahren. Diese Glossinenzucht produzierte zum ersten Mal in Europa genügend Fliegen, so dass zusätzliche Experimente in bezug auf die Entwicklung und Fortpflanzungsbiologie durchgeführt werden konnten.

Bei der Untersuchung und Abklärung der Tsetse-Fliegen als Vektoren für Trypanosomen der menschlichen Schlafkrankheit zeigte es sich, dass der grösste Teil einer Fliegenpopulation relativ resistent gegen diese Trypanosomen ist. Im Feld liegt die Infektionsrate der infizierten Fliegen mit metazyklischen Trypanosomen im Speichel meistens unter 5%. Unter Laborbedingungen ist es heute allerdings möglich, mit gewissen Parasitenstämmen die Infektionsrate bis auf 40% und mehr zu steigern. Neben vielen verschiedenen Faktoren, die im Labor kontrollierbar sind, konnte Maudlin (1982) erstmals zeigen, dass die Empfänglichkeit der Fliegen für Trypanosomen genetisch bedingt sein kann. Auf seiten der Trypanosomen ist der durch Tate (1980) erbrachte Nachweis der Diploidie und der genetischen Rekombination zwischen Genen verschiedener Enzym-bestimmender Loci hoch interessant. Dass genetische Rekombinationen in Trypanosomen während der zyklischen Entwicklung in Tsetse-Fliegen auftreten können, dies wurde in Basel gefunden (Jenni et al. in Vorbereitung).

Wie aber lässt sich nun, trotz der äusserst niedrigen Infektionsrate der Tsetse-Fliege von 1–

5‰, das plötzliche Ausbrechen einer Schlafkrankheitsepidemie in gewissen Ländern Ostafrikas erklären, bei der innert Monaten Tausende von Menschen erkranken können?

Eine kürzlich durchgeführte Studie mit infizierten Tsetse-Fliegen im Labor konnte zeigen, dass sich infizierte von uninfizierten Fliegen in bezug auf ihr Stechverhalten grundsätzlich unterscheiden (Jenni et al. 1980). Infizierte Fliegen stechen mehrmals an verschiedenen Stellen in die Haut des Warmblüters ein, bevor sie schlussendlich Blut aufnehmen. Bei jedem Einstich werden infektiöse Trypanosomen injiziert. Findet zwischen jedem Einstich ein Wirtwechsel statt, so können innert Minuten mehrere Wirte infiziert werden. Das unterschiedliche Verhalten der Fliegen beruht sehr wahrscheinlich darauf, dass bei infizierten Fliegen das Anheften der Trypanosomen an Mechanorezeptoren im Stechrüssel der Fliegen die Funktion dieser Sensilien für eine normale Blutaufnahme stören.

Geigy berichtete 1975 von Mehrfachinfektionen in Gruppen von Menschen, die zum selben Zeitpunkt im Felde von infektiösen Tsetse-Fliegen gestochen worden waren: «Auch wenn man bei längerem Aufenthalt im Tsetse-Busch zugegebenermassen von Hunderten von Fliegen gestochen wird, so ist doch die Chance, dass sich eine infizierte darunter befindet, recht gering. Die Erfahrung zeigt aber, dass es trotz diesem Zufallsspiel nicht nur zu einer, sondern zuweilen sogar zu Doppelinfektionen kommen kann,

in dem Sinne, dass von einer Runde oder von einer Jagdpartie erwiesenermassen zwei am selben Tag infizierte Personen heimkehren können.» Diese Feldbeobachtungen könnten das unter Laborbedingungen später beobachtete verschiedene Verhalten von infizierten und uninfizierten Tsetse-Fliegen widerspiegeln.

Literatur

- Geigy, R. 1948: Elevage de *Glossina palpalis*. Acta tropica 5, 201–218.
- Geigy, R. 1975: Säuger als Reservoir parasitärer Erkrankungen. Zool. Garten N.F., Jena 45, 9–16.
- Jenni, L., Molyneux, D.H., Livesey, J.L., Galvn, R. 1980: Feeding behaviour of tsetse flies infected with salivarian trypanosomes. Nature 283, 383–385.
- Kleine, F.K. 1909: Positive Infektionsversuche mit *T. brucei* durch *G. palpalis*. Deutsch. Med. Wschr. 45, 469.
- Maudlin, I. 1982: Inheritance of susceptibility to *Trypanosoma congolense* infection in *Glossina morsitans*. Ann. trop. Med. Parasit. 76, 225–227.
- Mellanby, H. 1937: Experimental work on reproduction in the tsetse fly, *Glossina palpalis*. Parasitology 29, 131–141.
- Tate, A., 1980: Evidence for diploidy and mating in trypanosomes. Nature 287, 536–538.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. Leo Jenni
Schweiz. Tropeninstitut
Socinstrasse 57
CH-4051 Basel

Bilharziose et réalités de terrain: réflexions sur son épidémiologie et son contrôle

Antoine Degrémont

Résumé

Les schistosomiasés sont largement distribués dans le monde et ont fait ces dernières années l'objet de nombreuses recherches de terrain. Dans ses grandes lignes l'épidémiologie des schistosomiasés se recoupe d'une région à l'autre mais une analyse plus minutieuse montre d'importantes variations au niveau de sa morbidité et de sa transmission. Ces variations influencent fortement la stratégie de leur contrôle. Les différentes mesures de contrôle sont passées en revue en insistant sur les contraintes qui les caractérisent et sur leur coût. En dehors des grands projets de développement où le financement d'un programme de contrôle des schistosomiasés pourrait être inclut dès le début dans le budget, l'auteur tire la conclusion qu'une approche réaliste de la lutte antischistosomienne passe par l'agent de soins de santé primaire, en fonction de la place qu'occupent ces parasites dans les priorités de santé des populations concernées.

Zusammenfassung

Die Schistosomiasen sind in der Welt weit verbreitet, und in den letzten Jahren waren sie Gegenstand zahlreicher Felduntersuchungen. Im Ganzen gesehen gleicht sich die Epidemiologie der Schistosomiasen in den verschiedenen Endemiegebieten. Eine genauere Analyse bringt allerdings wichtige regionale Unterschiede bezüglich Morbidität und Transmission zutage. Es sind dies Unterschiede, welche die Art der Kontrollmassnahmen weitgehend bestimmen. Mögliche Kontrollmassnahmen werden besprochen unter besonderer Berücksichtigung ihrer Nachteile und Kosten.

Der Autor kommt zum Schluss, dass ausserhalb der grossen Entwicklungsprojekte, in welche die Finanzierung von Kontrollmassnahmen von allem Anfang an eingebaut werden kann,

eine realistische Kontrolle der Schistosomiasen nur mit Hilfe der Gesundheitshelfer auf Stufe des Basisgesundheitsdienstes möglich ist, je nach dem Stellenwert, den die Schistosomiasen innerhalb der Gesundheitsprioritäten der betreffenden Bevölkerung einnehmen.

Introduction

Au cours des trois dernières décennies, les bilharzioses ont fait l'objet d'un nombre sans cesse croissant de travaux scientifiques de laboratoire et, malheureusement à un moindre degré, de terrain. Grâce à l'Organisation Mondiale de la Santé et au Programme Spécial de Recherches et Formation sur les Maladies Tropicales, cette tendance devrait encore s'accroître ces prochaines années. Il faut se réjouir de l'intérêt porté par les scientifiques du monde entier aux bilharzioses car pendant cette même période et très vraisemblablement durant les années à venir ces parasitoses ont gagné, et gagneront du terrain dans un grand nombre de pays en développement en raison de la mise en valeur de leurs ressources hydrauliques.

Sans sous-estimer le mérite des découvertes scientifiques qui ont été faites jusqu'à présent, il convient de se demander dans quelle mesure elles ont profité aux populations concernées, pourquoi elles n'ont nulle part (Chine exceptée) permis de contrôler, à grande échelle et à long terme ces parasitoses et sur quelle base repose la ou les stratégies de contrôle futures? C'est ce que nous nous proposons de discuter dans la suite de cet exposé. Initiées par le Professeur Rudolf Geigy en 1966, peu de temps après la découverte du Niridazole, les recherches appliquées sur les bilharzioses sont devenues un des principaux centres d'activité de l'Institut Tropical Suisse; d'abord à Madagascar, puis au Libéria et en Tanzanie. C'est dans ce pays que, riche des expériences passées, elles doivent se développer ces prochaines années. Par hommage à

Theodor Bilharz et à tous ceux qui dans le passé ont su motiver l'intérêt de leurs collaborateurs pour les travaux de terrain, nous avons utilisé dans le titre et jusqu'à présent le terme de «bilharziose». Pour nous conformer à la nomenclature scientifique moderne, nous ne parlerons plus dorénavant que de «schistosomiase».

Impact des schistosomiasés sur les populations exposées

En terme de Santé Publique, l'importance d'une maladie se mesure par l'estimation de ses taux de prévalence, de morbidité et de mortalité.

Avec 200 millions de personnes infectées (Warren, 1982), les schistosomiasés font sans aucun doute partie des grandes endémies ravageant notre planète.

Toutefois, ce chiffre n'est qu'une ancienne estimation, reprise d'un auteur à l'autre, basée sur l'extrapolation de données épidémiologiques très hétérogènes et fragmentaires. D'un côté, personne ne conteste que la construction de barrages, de périmètres irrigués et, très probablement de routes et de chemins de fer a introduit les schistosomiasés dans de nombreuses régions et fait progresser leur prévalence jusqu'à des taux de 60 à 90% en l'espace de quelques années (Degrémont, 1973). De l'autre, des enquêtes épidémiologiques détaillées, réalisées dans des zones considérées comme hyperendémiques, ont accumulé les preuves d'une grande hétérogénéité dans leur distribution. A quelques kilomètres de distance, deux villages peuvent avoir des taux de prévalence diamétralement opposés (Degrémont, 1973; Saladin et al. 1980; Poldermann, 1979). Par ailleurs, des erreurs d'échantillonnage ont souvent dans le passé conduit à des surestimations importantes. Audibert et al. 1983 en font une éclatante démonstration au Cameroun où, sur la base de résultats d'enquêtes sur échantillons non aléatoires, des experts chargés d'émettre des recommandations avant l'installation d'un périmètre irrigué de 10 000 hectares, ont conclu que ces travaux hydrauliques ne changeraient pas la situation car la prévalence était déjà très élevée. Or, une enquête sur échantillonnage aléatoire réalisée par les auteurs, après la mise en eau de 5 000 premiers hectares, a montré que cela était loin d'être le cas. La prévalence était bien élevée dans les villages des zones irriguées mais encore

le plus souvent inférieure à 10% dans les villages des zones de futurs aménagements. Le plus grave est que sur la base de fausses données, les responsables ont renoncé à mettre en place des mesures de contrôle ou de prévention sous le prétexte qu'il était déjà trop tard.

Il n'est pas dans notre intention de prouver que ce chiffre de 200 millions doit être rectifié, vers le haut ou vers le bas, mais de montrer combien il peut être dangereux de procéder à des extrapolations sans se baser sur une méthodologie standardisée et sans données épidémiologiques suffisantes. En raison de l'intrication des nombreux facteurs intervenant dans la transmission, dans les schistosomiasés plus que dans beaucoup d'autres maladies, ce qui est valable dans une région donnée, voire même dans un village, n'est pas forcément valable dans l'autre. Pour la morbidité, nous retrouvons les mêmes problèmes que pour la prévalence avec, ici, plus d'importance en Santé Publique. Toutefois, leur complexité est telle que nous ne ferons que les effleurer.

Nul doute en effet que certains individus souffrent de leur schistosomiase, mais dans quelle proportion et sous quelles conditions épidémiologiques?

Les connaissances immunopathologiques sur les schistosomiasés donnent une claire évidence de l'étroite corrélation existant entre la fréquence et la gravité des lésions d'une part et la charge parasitaire d'autre part. Si quelques vers erratiques peuvent provoquer des symptômes, il en faut un grand nombre (100-200 ou plus) pour qu'ils apparaissent de façon systématique. En zone d'endémie, où les réinfections sont permanentes et fréquentes, la charge parasitaire aurait tendance à croître de façon exponentielle si certains facteurs limitatifs n'intervenaient pas. Parmi ceux-ci, l'immunité et les changements de comportement des populations vis à vis des contacts avec l'eau infectante jouent certainement le plus grand rôle.

Des observations directes (Cheever, 1968) ont confirmé les calculs de Hairston, 1965, estimant à 2,8 pour *Schistosoma haematobium* et à 1,5 pour *S. mansoni* le nombre moyen de couples de schistosomes hébergés par personne infectée. A St. Lucia, Warren, 1973, a calculé que 85% des enfants de 5 à 9 ans, constituant le groupe à plus forte prévalence, hébergeait moins de 10 paires de vers.

Si des études de cas ont prouvé que les trois principales espèces de schistosomes pouvaient

survivre plus de 30 ans, on sait que leur durée de vie moyenne dans l'organisme humain ne dépasse pas 3 à 5 ans (Hairston, 1965). Les calculs d'incidence (Saladin et al. 1983) effectués au Libéria montrent que si la prévalence n'est pas très élevée, et les réinfections donc peu fréquentes, la proportion de personnes perdant leur infection au cours d'une année est presque aussi élevée que celle des personnes qui deviennent infectées.

S'il ne fait pas de question que les grands excréteurs d'œufs sont très exposés aux complications alors que les faibles excréteurs, formant la majorité, ne le sont pas, il est encore difficile de dire à partir de quel taux d'excrétion d'œufs l'infestation à des chances de se transformer un jour en maladie. Le manque d'indicateurs de morbidité identifiables sur le terrain avec des moyens simples explique cette lacune.

Pour *S. mansoni*, aucun symptôme et aucun test paraclinique simple ne permet d'identifier les complications avant que les lésions n'aient atteint un stade avancé pratiquement irréversible. Nulle part cependant leur fréquence ne semble dépasser 4%.

Pour *S. haematobium* la situation est plus favorable car l'hématurie, détectée macroscopiquement ou à l'aide de sticks dans les urines, est positivement corrélée avec l'intensité d'infestation (Wilkins et al. 1979; Feldmeir et al. 1982). Toutefois, il n'est nullement prouvé que ces hématuries provoquent une anémie (Holzer et al. 1983) et les lésions urinaires, bien que parfois très fréquemment observées (52% par Rugemalila, 1979, en Tanzanie), ne conduisent à une insuffisance rénale que dans moins d'1% des cas. Restent les troubles de la miction, liées à l'irritation et à la calcification de la vessie et de l'urètre, qui constituent une gêne importante pour les populations concernées. Là encore cependant, il est difficile de faire la part de la schistosomiase urinaire et d'infections bactériennes et vénériennes, si fréquentes en zones d'endémie, dans leur étiologie.

L'impact des schistosomiasis sur l'activité musculaire des travailleurs ou sur le développement intellectuel des enfants d'âge scolaire a fait l'objet de plusieurs études dont les résultats sont négatifs (Walker et al. 1970), peu concluants (Collins et al. 1976) ou positifs (Barbosa et al. 1981) mais seulement chez une minorité de sujets gravement atteints.

Comme pour la prévalence, il semble de plus en plus évident que le taux de morbidité peut va-

rier d'une région à l'autre, non seulement en fonction du taux d'infection mais aussi d'autres facteurs encore à élucider.

La prévalence corrèle positivement avec l'intensité d'infestation – mesurée par le taux moyen d'œufs excrétés – et cette dernière corrèle à son tour avec le taux de morbidité; d'où la tendance de dire que la morbidité est élevée dans les régions à forte prévalence. Deux éléments tempèrent cette affirmation bien agréable pour les planificateurs.

La méthodologie d'abord qui trop souvent varie d'une enquête à l'autre. Selon qu'elles sont prélevées le matin ou en milieu de journée, après effort ou sans, les urines peuvent renfermer un nombre d'œufs variant du simple au double si ce n'est plus. La sensibilité de la méthode influence aussi le taux de prévalence. Ainsi, la méthode de Ritchie permet d'identifier 1 œuf de *S. mansoni* par gramme de selle alors que celle de Kato, de plus en plus utilisée dans les enquêtes, a une sensibilité de 50 œufs par gramme de selle. Au Libéria, où la méthode de Ritchie a été utilisée on constate que là où la prévalence est voisine de 50% avec cette technique, elle aurait été de moitié inférieure à celle de Kato (Saladin et al. 1983).

Toujours au Libéria (Holzer et al. 1983), le taux de morbidité pour *S. haematobium*, mesuré par la fréquence des calcifications de la vessie, n'est que de 10% alors qu'il est de 52% en Tanzanie (Rugemalila, 1979). Pourtant, dans les deux régions étudiées, la prévalence est élevée et comparable. Au Kenya, Smith et al. 1979 ont trouvé un taux de morbidité élevé seulement parmi les enfants présentant un taux d'excrétion d'œufs de *S. haematobium* égal ou supérieur à 400 œufs par 10 ml d'urine. En Tanzanie par contre, dans le seul foyer de *S. haematobium* situé à proximité de l'hôpital d'Ifakara, Tanner et al. 1982 trouvent un taux moyen d'excrétion d'œufs très bas (moy.géom 20/10 ml d'urine) et très rarement plus de 100 œufs par 10 ml malgré une prévalence de 70%. Or, sur un collectif de patients hospitalisés il est vrai, Furrer, 1981 trouve dans près d'un tiers des cas des lésions de l'appareil urinaire.

Développer ou non des symptômes dépend en grande partie mais pas uniquement du nombre de paires de schistosomes présents dans l'organisme. Pour ne citer que deux exemples, l'association de *S. mansoni* et de *S. haematobium* avec des salmonelles a été démontrée en Egypte (Basilys et al, 1974) et au Brésil (Pedro et al. 1980),

au point même que le seul traitement schistomicide guérit aussi les salmonelloses associées. Bien que le collectif soit insuffisant pour autoriser une évaluation statistique, Tanner et al. 1982 trouvent un nettement plus grand nombre d'infections à *S. haematobium* parmi les écoliers dont le poids et la taille sont significativement en dessous des normes tanzaniennes.

On peut donc penser que des infections associées et/ou des troubles nutritionnels agissant principalement sur le statut immunitaire des patients peuvent influencer le taux de morbidité. La vitamine A par exemple joue non seulement un rôle dans l'immunité mais est indispensable au développement des cellules épithéliales, de la vessie notamment. Dans une étude préliminaire, Stuerchler et al. 1983 observent au Libéria un taux de retinol significativement inférieur chez les schistosomiens et les polyparasités.

Même en zone d'hyperendémie, le taux de mortalité attribué directement aux schistosomiasés ne dépasse pas quelques pourcents dans les estimations les plus optimistes. Il est vrai que l'on ne dispose d'aucune donnée pour apprécier la fréquence des évolutions mortelles favorisées indirectement par ces parasitoses.

Cette analyse n'avait pas pour but de minimiser l'importance des schistosomiasés mais d'expliquer pourquoi d'une part, les gouvernements concernés et les organisations d'aide au développement hésitent à se lancer dans de larges programmes de contrôle et pourquoi d'autre part, les populations des zones d'endémie n'identifient que très rarement, à tort ou à raison, ces infections comme des priorités de Santé. C'est ainsi par exemple qu'en Tanzanie, plus de 80% des écoliers et de leurs parents, interrogés par questionnaire, avaient des connaissances très correctes sur les schistosomiasés mais ne prenaient, et n'ont pris plus tard, aucune précaution pour se protéger de nouvelles infections (A. Zumstein, 1983).

Transmission des schistosomiasés

La transmission des schistosomiasés dépend en premier lieu des mollusques hôtes intermédiaires et des contacts des populations avec les collections d'eau infectantes. Là encore, au fur et à mesure que des enquêtes épidémiologiques plus précises sont publiées on s'aperçoit d'une grande hétérogénéité de la transmission d'une région à l'autre. *Bulinus bavayi* est l'hôte inter-

médiaire de *S. haematobium* à l'île Maurice, alors qu'il est réfractaire au même parasite à Madagascar (Degrémont, 1973). Bien que *B. globosus* et *B. nasutus* soient tous les deux présents au nord et au sud de la Tanzanie, *B. nasutus* est le principal hôte intermédiaire de *S. haematobium* autour du lac Victoria (Webbe, 1962) alors qu'à Ifakara c'est *B. globosus* qui remplit ce rôle; *B. nasutus* étant même rétractaire au laboratoire à la souche locale de *S. haematobium* (A. Zumstein, 1983). Au Libéria enfin, des *B. globosus* provenant de trois comtés différents n'ont pas montré de susceptibilité croisée au laboratoire avec les trois différentes souches de *S. haematobium* (B. Saladin, communication personnelle).

Habituellement les taux d'infection des hôtes intermédiaires naturellement infectés varient entre moins de 1% et 12% (Warren, 1973). Cependant, à Madagascar ils oscillaient entre 50 et 100% chez *B. obtusispira* (Degrémont, 1973) et au Libéria ils étaient de 44% chez *B. pfeifferi* Saladin et al. 1983). Ceci n'est pas sans importance car, réduire la population de mollusques (molluscicides) ou la contamination de l'eau par les excréta (latrines ou chimiothérapie) de 90% n'a pas le même impact sur la transmission si les taux d'infection naturels des hôtes intermédiaires sont de 1% ou de 50%.

Aussi bien à Madagascar, au Libéria qu'en Tanzanie, les taux de prévalence observés au niveau des services de santé laissaient penser que les hôtes intermédiaires avaient une très large distribution. Pourtant, les enquêtes malacologiques ont montré que c'était loin d'être le cas. D'une part, un faible nombre de collections d'eau fréquentées par la population est suffisante pour assurer une haute prévalence dans des zones limitées et d'autre part, la distribution des mollusques dans une même collection d'eau est loin d'être homogène; au point que dans un même cours d'eau ils peuvent être très nombreux à un endroit et rares ou absents quelques mètres plus loin.

Si pratiquement partout les enfants ont plus de contacts avec l'eau que les adultes on observe, là encore, de grandes variations du comportement d'une région à l'autre. Là se sont les pêcheurs (Dalton et Pole, 1978) qui ont le plus de contacts infectants, en entrant et sortant de leur pirogue, ailleurs les musulmans à cause de leurs ablutions rituelles ou encore ceux qui travaillent dans les canaux d'irrigation (Farooq et Mallah, 1966).

Si Dalton et Pole, 1978 et Jordan, et al. 1982 démontrent que la fréquence des contacts avec l'eau corrèle étroitement avec la prévalence et l'intensité d'infestation, Polderman, 1979 observe en Ethiopie que les hommes ayant des contacts peu fréquents mais prolongés avec les sources d'infection sont plus fortement infectés que ceux ayant des contacts fréquents mais brefs.

Contrôle des schistosomias

Les moyens dont on dispose actuellement pour lutter contre les schistosomias sont nombreux, variés et efficaces au niveau de projets pilotes. Pourquoi ne sont-ils pas plus souvent mis en place à large échelle et pourquoi, à quelques exceptions près, observe-t-on des échecs au niveau des phases de consolidation alors que les phases d'attaque ont été des succès?

En dehors d'un approvisionnement adéquat en eau courante, coûteux mais rentable à long terme (Jordan, 1977), la réduction des contacts avec les collections d'eau infectantes passe par l'éducation sanitaire des populations concernées. Pour qu'elle soit efficace, il faut obligatoirement des alternatives aux collections d'eau infectées et une population motivée c'est à dire ressentant, ou ayant appris à ressentir, les schistosomias comme une préoccupation de Santé prioritaire.

En Chine, les méthodes de modifications de l'habitat pour les rendre défavorables aux hôtes intermédiaires n'ont été efficaces que dans des zones, larges il est vrai, de forte densité de population humaine parce que l'occupation des sols devait y être maximale et parce que la biologie des hôtes intermédiaires était favorable à de telles mesures. En Afrique, elles n'ont de véritables applications qu'au niveau des projets de développement hydrauliques. Dans les villages mêmes, elles ne sont concevables que sur des bases épidémiologiques très précises et, pour en réduire le coût, avec une participation active de la population. Mis en avant au cours des années soixante comme méthode essentielle de contrôle, la destruction des hôtes intermédiaires par des molluscicides s'est révélée décevante à large échelle (Amin et al. 1982) et n'est plus recommandée que comme méthode d'appoint. Il n'existe d'ailleurs plus qu'un seul molluscicide commercialisé, le Bayluscide. Lorsque le courant de l'eau est faible et la végétation aqua-

tique abondante, son application nécessite des efforts méticuleux et coûteux (Degrémont, 1973; Saladin et al. 1983). La restriction de l'usage de molluscicide aux seules collections d'eau infectantes fréquentées par la population est à bien des points de vue plus raisonnable, surtout associée à une chimiothérapie de masse. Elle implique cependant des connaissances épidémiologiques très précises et, comme nous l'avons appris à nos dépens au Libéria, on n'est jamais totalement sûr d'avoir identifié tous les points de contamination (Saladin et al. 1983).

Comme les molluscicides de synthèse sont coûteux, les études portant sur les moyens de lutte biologique et sur l'emploi de substances molluscicides naturelles (plantes par exemple) méritent l'intérêt croissant qu'on leur porte. Toutefois, leur emploi à large échelle n'est pas pour demain et beaucoup d'espairs risquent d'être brutalement déçus par les tests de toxicité. Ainsi, le principe actif de la plupart des plantes molluscicides, employées couramment comme piscicide par les populations locales sont des saponines dont les propriétés cancérogènes sont prouvées expérimentalement.

L'installation de latrines pour réduire la pollution de l'eau par les miracidies n'est, dans les schistosomias, qu'une méthode d'appoint peu efficace sans une participation quasi totale des populations.

Avec la découverte du niridazole, de l'oxamniquine et surtout plus récemment du praziquantel, la chimiothérapie des schistosomias est entrée dans une ère prometteuse. A dose unique, le praziquantel permet d'atteindre des taux de guérison très élevés (55 à 100% selon les espèces et les auteurs) et, dans tous les cas, une réduction de l'excrétion des œufs supérieure à 90%.

Avec un tel schistomicide, totalement dénué par ailleurs d'effets secondaires majeurs, on peut espérer réduire considérablement la pollution de l'eau par les miracidies grâce à une chimiothérapie de masse. La preuve en a déjà été faite à St. Lucia (Jordan et al. 1982) et à beaucoup plus large échelle au Brésil (Machado, 1982). Dans ce pays, tous les habitants, infectés ou non, des villages où la prévalence, mesurée par sondage chez les écoliers, dépassait 20% ont été traités à l'oxamniquine. Dans la plupart des villages traités, la prévalence est tombée aussitôt en dessous de 5% mais dans certains, sans que l'on sache exactement pourquoi, il a fallu

retraiter plusieurs fois la population pour aboutir au même résultat. Par ailleurs, dès que la prévalence est basse la répétition des campagnes de traitement de masse n'est plus acceptable éthiquement (sans compter la lassitude des populations réduisant leur participation) et le dépistage des sujets infectés est une entreprise difficile et coûteuse. A St. Lucia, où des dépistages ont été entrepris annuellement de 1972 à 1980 les traitements n'interviennent que pour 15% environ dans le coût des opérations (Jordan et al. 1982).

Dans les études pilotes effectuées au Libéria, il apparaît clairement que des traitements de masse limités au seul groupe de personnes intervenant pour plus de 80% dans la transmission, généralement les enfants de 5 à 15 ans, réduit significativement la prévalence et l'intensité

d'infection au niveau de l'ensemble de la population. Ils annulent même la transmission de *S. haematobium* pendant au moins un an avec le praziquantel associé à des applications focales de bayluscide (Saladin et al. 1983). Toutefois, la figure 1 montre de façon très nette que cet optimisme doit encore une fois être tempéré par l'influence néfaste des migrations. En Afrique des mouvements de population de 20 à 40 % par an sont courants même dans les villages. Ainsi, dans ce village de Kolila au Libéria, les immigrants arrivés après le traitement de masse au métrifonate entrent pour plus de 60% dans le potentiel de transmission. Si l'étude n'avait été que transversale, le rôle des immigrants n'aurait pas été mis en évidence et l'efficacité, même relativement restreinte du métrifonate camouflée. Ceci veut dire que même avec un médica-

Légende:

C.I. = Index de Contamination = Population concernée × Prévalence × moyenne géométrique des œufs de *S. haematobium* excrétés/10 ml Urine

GC = Groupe cible, infectés et traités.

NT = Groupe des infectés non traités

NA = Nouveaux arrivés, après les traitements de masse

T = Total

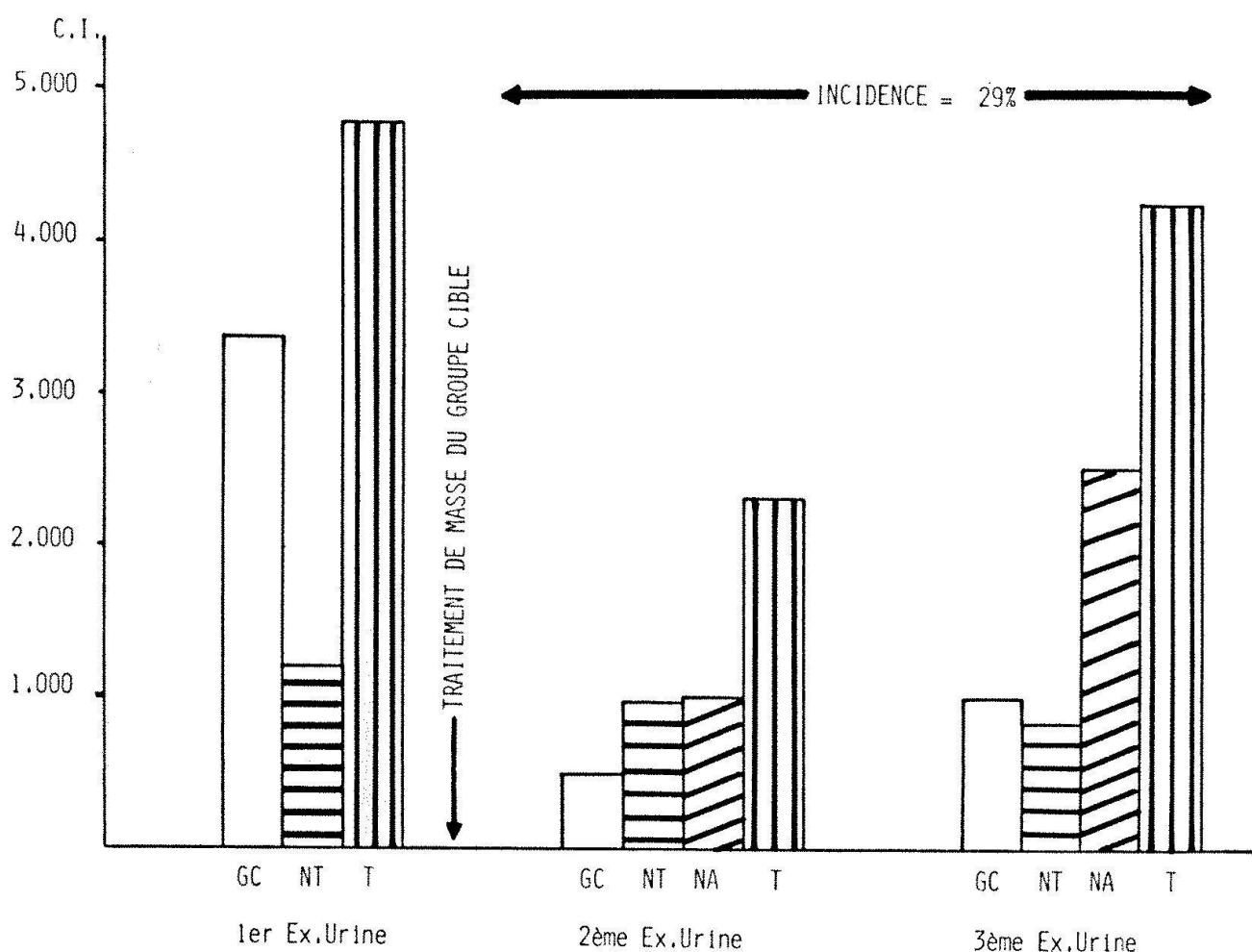


Figure 1. Impact des migrations sur l'index de contamination par *Schistosoma haematobium* après le traitement de masse d'une population cible (0-15 ans) dans le village de Kolila, Libéria.

ment hautement efficace comme le praziquantel, les migrations doivent être contrôlées et les traitements de masse répétés jusqu'à ce que les nouveaux arrivants ne comprennent plus qu'une très faible proportion de sujets infectés capables de relancer la transmission.

Avec le progrès de l'immunologie des schistosomiasés et depuis le succès des premiers essais de vaccination contre la schistosomiasé du bétail (Taylor, 1980) on peut penser disposer d'une vaccin anti-schistosomien au cours de ces 10 prochaines années. Sans contester son utilité, nous voudrions tempérer l'optimisme de certains en rappelant qu'un vaccin efficace contre la rougeole existe depuis plus de 20 ans mais que cette maladie fait toujours des ravages dans les pays en développement.

Comme pis-aller, beaucoup d'experts envisagent d'un œil favorable la stratégie des traitements sélectifs préconisée par Kloetzel, 1977. Cette dernière consiste à traiter uniquement les grands excréteurs d'œufs sans chercher à supprimer leur infection mais seulement à réduire leur charge parasitaire pour leur éviter les complications; ceci revient autrement dit à réduire le taux de morbidité. Cette stratégie réaliste est à notre avis rentable et adaptée à la situation économique de la plupart des zones d'endémie; surtout pour *S. haematobium* où le métrifonate est efficace et bon marché.

Bien que Jordan et al. 1980 le conteste en avançant l'argument des modifications de comportement vis à vis des contacts avec l'eau, Katz et al. 1978 observent que même soumis à des réinfections, les sujets traités à l'oxamniquine présentent pendant trois ans une charge parasitaire significativement inférieure à celle qu'ils avaient avant d'être traités. Saladin et al. 1983 font la même observation sur une période d'une année pour *S. haematobium* et aussi bien avec le métrifonate et le niridazole qu'avec le praziquantel. Avec les nouvelles techniques de dépistage simples et peu coûteuses aucun obstacle ne s'oppose à la mise en place de cette stratégie.

L'intégration de différentes mesures de contrôle telle qu'elle est préconisée par Clarke et al. 1981 est certainement la voie la plus sûre mais concentrée sur les seules schistosomiasés, son rapport coût-bénéfice est beaucoup trop élevé. Elle deviendrait raisonnable pour un plus grand nombre de pays si cette intégration se faisait aussi avec la lutte contre les autres grandes endémies. Surtout si l'on n'est pas sûr du succès au niveau des phases de consolidation, le coût de

toutes ces méthodes de lutte est encore trop élevé pour la plupart des zones d'endémie schistosomiennes: 50 cts par examen parasitologique, 1 sfr par personne protégée pour les grandes campagnes de dépistage systématique, 1 à 4 sfr par personne protégée pour les traitements de masse. A ces chiffres il faut en effet opposer les 2 à 5 sfr/personne/an dont disposent la plupart des Ministères de Santé en zone d'endémie pour couvrir l'ensemble des soins de Santé.

Conclusions

Cette analyse en forme de réquisitoire basée sur des expériences de terrain a été menée dans le but d'essayer de rendre évidentes les trois conclusions suivantes:

- 1) Même si dans ses grandes lignes l'épidémiologie des schistosomiasés se recoupe d'une région à l'autre, les variations sont trop nombreuses et ont trop d'importance pour la mise en place de mesures de contrôle peu coûteuses et efficaces pour que l'on s'abstienne de faire des études épidémiologiques à l'échelon local.
- 2) Les grands travaux de développement, surtout ceux touchant à l'eau, provoquent presque inévitablement une explosion quasi épidémique de la fréquence des schistosomiasés. C'est donc aux organismes de financement de mettre en œuvre à tous prix des mesures de prévention et si nécessaire de contrôle. Toutefois, leur application fait intervenir tellement de facteurs que seul une collaboration interdisciplinaire, principalement sur le terrain, peut assurer leur rentabilité et leur efficacité.
- 3) Il existe de multiples évidences pour prouver qu'en dehors des grands projets de développement hydrauliques tout programme de lutte centré uniquement sur les schistosomiasés est voué à l'échec, même avec les technologies les plus modernes: les ressources sont insuffisantes ou s'épuisent trop vite lorsqu'elles viennent de l'extérieur; les migrations de population sont trop importantes et surtout, hormis les molluscicides, toutes les méthodes de lutte nécessitent une participation active des populations concernées. Or, il est tout à fait exceptionnel que ces populations (à tort ou à raison car c'est également le cas pour la tuberculose) ressentent ces parasitoses comme une préoccupation de Santé majeure.

La seule personne capable de motiver les populations et d'obtenir leur participation active, de les éduquer progressivement, de contrôler les migrations, de mettre en place et de superviser des mesures de contrôle sans déplacements coûteux est l'agent de soins de santé villageois, dans la mesure où il est une émanation de la volonté des populations locales de prendre eux mêmes en charge leurs problèmes de santé.

C'est donc essentiellement au niveau des réseaux de soins de santé primaires que doit se concevoir la lutte contre les schistosomias en s'intégrant progressivement et à son heure dans l'ensemble des prestations que les populations des pays en développement s'attendent, puis sont préparées à recevoir.

Lorsque ces structures n'existent pas encore il faut savoir se contenter de traitements sélectifs visant au moindre prix à réduire le taux de morbidité à un seuil tolérable.

Littérature

- Amin, M. A., Fenwick, A., Teesdale, C. H., Mc Laren, M., Marshall T. D. de C., Vaughan, J. P.: The assesment of a large scale snail control programme over a 3 year period in the Gezira irrigated area of the Sudan. *Ann. Trop. Med. Parasit.* 1982, 76, 415-424.
- Audibert, M., Ibrahima, H., Hamidou, I., Cassagne, P.: Prevalence de la schistosomiase à *Schistosoma haematobium* dans le Mayo Danai (Cameroun). *Acta Tropica*, 1983, 40, 177-186.
- Barbosa, F. S., Perreira de Costa, D. P.: Incapacitating effects of Schistosomiasis mansoni on sugar-cane cutters in northern Brazil. *Am. J. Epidemiol.* 1981, 114, 102-111.
- Bassily, S., Farid, Hassan, A., Sippel, N. A., El-Masry, N. A., Said, M. I.: Prolonged Salmonella bacteremia in Egyptians farmers. *J. Egypt. Med. Ass.* 1974, 57, 490-497.
- Cheever, A. W. A.: A quantitative post mortem study of *Schistosoma mansoni* in man. *Am. J. Trop. Med. & Hyg.* 1968, 17, 38-64.
- Clarke, V. V., Taylor, P., Sviridon, N., Richardson, M.: The importance of an integrated approach to the control of Bilharzia. *Cent. Afr. J. Med.* 1981, 27, 198-202.
- Collins, K. J., Brotherhood, R. J., Davies, C. T. M., Doré, C., Hackett, A., Imms, F. J., Murgrove, J., Weiner, J. S., Amin, M. A., Elkarim, M., Ismail, H. M., Omer, A. H. S., Sukkar, M. Y.: Physiological performance and work capacity of Sudanese cutters with *Schistosoma mansoni* infections. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 1976, 25, 410-421.
- Dalton, P. & Pole, D.: Water-Contact patterns in relation to *Schistosoma haematobium* infections. *Bull. W.H.O.* 1978, 56, 417-426.
- Degrémont, A.: Lutte contre les schistosomias dans le périmètre irrigué du Bas Mangoky (Madagascar). *Institut Tropical Suisse*, 1973, p. 261.
- Farooq, M. & Mallah, M.: The behavioural pattern of social and religious water contact activities in the Egypt-49 bilharziasis project area. *Bull. Word Health Org.* 1966, 35, 377-320.
- Feldmeier, H., Doehring, E., Daffala, A. A.: Simultaneous use of a sensitive filtration technique and reagent strips in urinary schistosomiasis. *Trans. Roy. Soc. Trop. Med. Hyg.* 1982, 76, 416-421.
- Furrer, M. C.: *Schistosoma haematobium* Morbiditæet am Distrikthspital Ifakara, Tanzania, Universität Basel, Thesis 1981.
- Hairston, N. G.: An analysis of age-prevalence data by catalytic models. A contribution to the study of Bilharziasis. *Bull. W.H.O.* 1965, 33, 163-175.
- Holzer, B., Saladin, K., Saladin, B., Dennis, E., Degrémont, A.: The impact of Schistosomiasis among rural population in Liberia. *Acta Tropica*, 1983, 40, 239-259.
- Jordan, P.: Schistosomiasis-research to control. *Am. J. Trop. Med. & Hyg.* 1977, 26, 5, 877-886.
- Jordan, P., Christie, J. D., Unrau, G. O.: Schistosomiasis transmission with particular reference to possible ecological and biological control; a review. *Acta Tropica*. 1980, 37, 95-135.
- Jordan, P., Bartholomew, R. K., Grist, E., Auguste, E.: Evaluation of chemotherapy in the control of *Schistosoma mansoni* in Marquis Valley, St. Lucia. I. Results in humans. *Am. J. Trop. Med. & Hyg.* 1982, 31, 103-110.
- Katz, N., Zicker, F., Rocha, R. S., Oliveira, V. B.: Reinfection of patients in schistosomiasis mansoni endemic areas. I. Influences of age and worm burden. *Rev. Inst. Med. Trop. Sao Paulo*. 1978, 20, 273-278.
- Kloetzel, K.: Selective chemotherapy for *Schistosoma mansoni*. *Trans. Roy. Soc. Trop. Med. & Hyg.* 1977, 68, 344.
- Machado, P. A.: The Brazilian Program for Schistosomiasis control, 1975-1979. *Am. J. Trop. Med. & Hyg.* 1982, 31, 76-86.
- Pedro, R. de J., Dias, L. C. de S., Amato Neto, V., Carvalho, S. A. de: Observations on the treatment of mansoni schistosomiasis with oxamniquine: efficiency in children and in persistant Salmonellosis. *Rev. Inst. Med. Trop. Sao Paulo*, 1980, 22, 32-36.
- Polderman, A. M.: Transmission dynamics of endemic Schistosomiasis. *Trop. Geogr. Med.* 1979, 31, 465-475.
- Polderman, A. M.: The transmission of intestinal Schistosomiasis in Begender Province Ethiopia. *Acta Leidensia*. 1975, 45, 1-159.
- Rugemalila, J. B.: The impact of urinary Schistosomiasis on the health of two community populations living in endemic areas in Tanzania. *Trop. Geogr. Med.* 1979, 31, 375-380.
- Saladin, B., Saladin, K., Dennis, E., Degrémont, A.: Preliminary epidemiological survey of Schistosomiasis in Central and Southern Liberia. *Acta Tropica* 1980, 37, 53-62.
- Saladin, B., Saladin, K., Holzer, B., Dennis, E., Hanson, A., Degrémont, A.: A pilot control trial of Schistosomiasis by mass chemotherapy of target populations combined with focal mollusciciding in Central Liberia. *Acta Tropica*, 1983, 40, 271-295.
- Smith, D. E., Warren K. S., Mahmoud, A. A. F.: Morbidity in Schistosomiasis mansoni in relation to intensity of infections: study of a community in Kisumu, Kenya. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 1979, 28, 220-229.
- Stuerchler, D., Holzer, B., Hanck, A., Degrémont, A.: Retinol and Schistosomiasis in a rural population in Liberia. *Acta Tropica*, 1983, 40, 261-269.

- Tanner, M., Branderhorst, E., Marti, H. P.: Prevalence and parasitic infections among rural Tanzanian school children in relation to their nutritional status. *Molecular and Biochemical Parasitology*, Parasites – their world and ours, 1982, Supplement p.283.
- Taylor, M. G.: Vaccinations against trematodes. In Symposium of the Brit. Soc. Parasitol. Blackwell Scientific Pub. 1980, 115–140.
- Walker, A. R. P., Walker, B. F., Richardson, B. D.: Studies of schistosomiasis in a South African Bantu schoolchild population. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 1970, 19, 792–814.
- Warren, K. S.: Regulation of the prevalence and intensity of Schistosomiasis in man: immunology or ecology? *J. infect. Dis.* 1973, 127, 595–607.
- Warren, K. S.: Selective primary health care: strategy for control of disease in the developing world. I. Schistosomiasis. *Reviews of Inf. Diseases.* 1982, 4, 715–726.
- Webbe, G.: The transmission of *Schistosoma haematobium* in the area of lake province, Tanganyika. *Bull. Org. Mond. Sante.* 1962, 27, 59–85.
- Wilkins, H. A., Gall, P., Marshall, T. F. de C., Moore, P.: The significance of proteinuria and haematuria in *Schistosoma haematobium* infection. *Trans. Roy. Soc. Trop. Med & Hyg.* 1979, 73, 74–80.
- Zumstein, A.: A study of some factors influencing the epidemiology of urinary schistosomiasis at Ifakara (Kilombero District, Morogoro Region, Tanzania). *Acta Tropica*, 1983, 40, 187–204.

Adresse de l'auteur :

Antoine Degrémont
Schweizerisches Tropeninstitut
Socinstrasse 57
CH-4057 Basel

Sommaire

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>J. A. Neyroud (Recherche agronomique de Changins, Nyon)</i> Introduction..... | 101 |
| <i>H. Sticher (Laboratorium für Bodenkunde, ETH, Zürich)</i> Entstehung und Eigenschaften von organischen Böden | 102 |
| <i>F. Klötzli (Geobotanisches Institut, ETH, Zürich)</i> Standort und Vegetation natürlicher Moorgebiete | 108 |
| <i>H. P. Käser (Anstalten Witzwil, Gampelen)</i> Landwirtschaftliche Nutzung der Moorböden..... | 117 |
| <i>J. P. Dubois, D. Dubois (Laboratoire de pédologie, EPFL, Ecublens), G. Jelmini</i> <i>(Sous-station fédérale de recherches agronomiques, Cadenazzo)</i> Influence du drainage et du type de culture sur l'exporation des éléments nutritifs majeurs (N,P et K) dans une tourbe eutrophe | 119 |
| <i>A. Siegenthaler (Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und</i> <i>Umwelthygiene, Liebefeld-Bern)</i> Spezielle Probleme bei der Düngung und Bewirtschaftung organischer Böden | 126 |
| <i>J. Jatton (Institut de génie rural, EPFL, Ecublens)</i> Assainissements des sols organiques du point de vue de l'ingénieur du génie rural | 134 |
| <i>H. P. Käser (Anstalten Witzwil, Gampelen)</i> Tiefpflügeversuche 1979 und weitere geplante Massnahmen in Witzwil | 137 |
| <i>O. Wildi (Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf)</i> Regeneration von Hochmoortorfen durch Naturschutzmassnahmen | 139 |
| <i>Ch. Roulier (Pro Natura Helvetica, Cheseaux-Noréaz)</i> La valeur naturelle des marais de la rive sud du lac de Neuchâtel | 143 |
| <i>F. Jäggli und K. Peyer (Eidgenössische Forschungsanstalt für landwirtschaftlichen</i> <i>Pflanzenbau, Zürich-Reckenholz)</i> Beurteilung der landwirtschaftlichen Ertragsfähigkeit von Torfmoorböden | 150 |
| <i>J. A. Neyroud (Recherche Agronomique de Changins, Nyon)</i> Synthèse | 159 |

Introduction

Jean A. Neyroud

Nous avons choisi ce titre ronflant pour notre Symposium dans le but de mettre en évidence un conflit d'utilisation du sol. Les sols riches en humus (tourbières, marais, ...) constituent une portion précieuse de notre patrimoine, mais leur mise en valeur par des activités humaines les modifie souvent de manière irréversible.

Les sols organiques représentent une catégorie particulière de l'ensemble des sols de notre pays. Ils ont été formés sur des assises peu perméables, périodiquement inondées. Les conditions difficiles de décomposition et d'humification des végétaux ont abouti à l'accumulation d'un matériau formé de résidus végétaux (et animaux) incomplètement décomposés, la tourbe. Il existe plusieurs types de sols organiques, que l'on retrouve dans les sites les plus variés de notre pays.

Lorsque l'intervention humaine est réduite au minimum, des biotopes caractéristiques apparaissent. La flore et la faune rencontrées présentent un grand intérêt pour les sciences naturelles, et des réserves d'espèces peu communes, ou en voie de disparition sont maintenues.

Les régions les plus favorables à l'agriculture comportent également des sols organiques. Ces derniers se prêtent particulièrement bien à la culture intensive et de nombreuses exploitations maraîchères s'y sont installées, offrant des emplois à une population considérable.

La mise en culture d'un sol organique n'est pas possible sans l'intervention massive de moyens relevant du génie rural: assainissement, drainage, construction de chemins. En outre, les pratiques agricoles introduites – fertilisation, travail du sol – contrecarrent l'évolution naturelle du sol organique. On observe une disparition lente de la couche humifère, à raison de 1-2

cm par année, ce qui oblige à reprendre périodiquement les travaux de génie rural.

Les sols organiques n'échappent pas non plus à notre recherche incessante de sources d'énergie. La tourbe a été utilisée dans le passé comme combustible, et elle pourrait revenir à l'honneur à la faveur de difficultés économiques: un récent travail américain estime le pouvoir calorifique de la tourbe à 40% de celui du charbon.

Dans notre pays à ressources et surfaces limitées, les sols organiques sont convoités par les milieux les plus divers. Les terres organiques du Seeland bernois (env. 4000 ha), de la Plaine de l'Orbe (env. 1000 ha) et d'autres plaines alluviales pourraient être drainées à nouveau et cultivées pour quelques dizaines d'années, mais un futur incertain les attend. D'autre part, la mise au «chômage technique» de centaines de familles de cultivateurs dans le seul but de protéger les sols se conçoit mal.

Le but de ce Symposium est de présenter un ensemble de points de vue engagés sur le sujet; il s'inscrit exactement dans le cadre général de l'assemblée annuelle de la SHSN: scientifiques au service de la communauté, nous essayons de définir les enjeux, de fournir aux responsables des bases solides sur lesquelles ils prendront leurs décisions.

Adresse de l'auteur:

Dr Jean A. Neyroud
Recherche Agronomique
de Changins
CH-1260 Nyon

Entstehung und Eigenschaften von organischen Böden

Hans Sticher

Zusammenfassung

Unter den Begriff «Organische Böden» fallen nach dem in der Schweiz gebräuchlichen Bodenklassifikationssystem die Moore verschiedenster Ausprägung sowie die aus ihnen entstandenen Kulturböden, sofern ihr oberster Horizont eine Mächtigkeit von mehr als 30 cm und einen Humusgehalt von mehr als 30 % aufweist.

Im vorliegenden Aufsatz werden nach einem kurzen Abriss über die Entstehung und die morphogenetische Systematik der Moore chemische, biologische und physikalische Eigenschaften von Nieder- und Hochmooren erörtert und einander gegenübergestellt.

Résumé

D'après le système suisse de classification des sols le terme «Sol organique» comprend des marais quelconques ainsi que des sols cultivés, si leur horizon supérieur a une épaisseur de plus de 30 cm et une teneur en humus de plus de 30 %.

Dans l'article présent, après une brève esquisse sur la genèse et la systématique des marais en général, les propriétés chimiques, biologiques et physiques des bas-marais et des haut-marais sont présentées et comparées.

Einleitung

Als organisch bezeichnet man nach dem in der Schweiz gebräuchlichen Klassifikationssystem Böden, welche unter hydromorphen Bedingungen entstanden sind. Böden mit aerob angereichertem organischen Material, z. B. Podsole oder Tangelrendzinen, fallen dagegen nicht unter diesen Begriff, obschon hier rein organische Auflagehorizonte von 30 cm und mehr Mächtigkeit keine Seltenheit sind.

Hydromorphe Verhältnisse herrschen vor, wenn die Zufuhr von Wasser (irgendwelcher Herkunft: Niederschlag, Grundwasser, Rieselwasser, Quellwasser) gleich oder grösser ist als die Wegfuhr (Versickerung, Verdunstung, Transpiration). Dazu tragen einzeln oder kombiniert folgende Faktoren bei:

- undurchlässiger Untergrund
- hohe Jahresniederschläge
- kühle (aber nicht zu kalte) Temperatur
- hohe Luftfeuchtigkeit.

Unter hydromorphen Verhältnissen ist der mikrobielle Abbau von organischer Substanz infolge Sauerstoffmangels gehemmt, so dass die Produktion den Abbau übersteigt. Dadurch kommt es zu einer Anhäufung von nur teilweise zersetztem organischem Material.

Übersteigt die Akkumulation 30 cm, so spricht man von einem Moor und bezeichnet das im Moor konservierte organische Material als Torf. Bei weniger als 30 cm organischer Auflage spricht man, da hier die anorganische Unterlage pedologisch ebenfalls von Bedeutung ist, von einem Moorgley.

Unter den Begriff organische Böden fallen demnach die Moore selbst sowie die aus ihnen entstandenen Kulturböden, sofern ihr oberster Horizont eine Mächtigkeit von mehr als 30 cm und einen Humusgehalt von mehr als 30 % aufweist.

Entstehung und Systematik der Moore

Moore, die unter dem Einfluss von nährstoffreichem Wasser, sei es Grund- oder Oberflächenwasser, entstanden sind, werden allgemein unter dem Begriff Nieder- oder Flachmoor zusammengefasst.

Wo in Talmulden das Grundwasser bis an die Oberfläche ansteht und der Abbau der Streu infolge zeitweiser Anaerobie gehemmt ist, bildet sich das Versumpfungsmoor, bei welchem sedimentäre Prozesse allein von Bedeutung sind.

In seichten Oberflächengewässern (Flachseen, Teichen, abgeschnittenen Flussarmen) füllt das sedentäre organische Material zusammen mit dem sedimentären Detritus das Gewässer allmählich bis zur Oberfläche auf: es bildet sich das Verlandungsmoor. Der Verlandungsprozess, der im wesentlichen vom Klima unabhängig ist, lässt sich nach folgendem Schema, das allerdings je nach Standort modifiziert werden muss, beschreiben (Overbeck 1975):

Sofern in der Umgebung des Gewässers offenes Land vorhanden ist, wird durch die Zuflüsse erodiertes Bodenmaterial eingeschwemmt und zusammen mit organischen Partikeln sedimentiert. Je nach Zusammensetzung nennt man solche Sedimente Ton- oder Kalkmudden. Mit fortschreitender Verlandung nimmt der organogene Anteil in den Mudden zu, bis diese schliesslich rein organisch anfallen. Nachhaltige Kälteperioden, welche das Pflanzenwachstum einschränken oder unterbinden, oder einmalige Überflutungsereignisse können jedoch erneut zu anorganischen Sedimenten führen. In Ca-reichem Wasser bewirkt die assimilatorische Tätigkeit von submersen Wasserpflanzen ausserdem eine Ausscheidung von Kalk (See-kreidebildung).

Im Uferbereich stellt sich eine an die hydromorphen Verhältnisse angepasste Vegetation ein, welche je nach Lage zum Wasserstand durch bestimmte Arten charakterisiert ist. Vom tieferen Wasser bis hin zum Ufer lässt sich – im Idealfall – folgende mehr oder weniger scharfe Zonenbildung beobachten:

1. Characeenrasen
2. Laichkrautgürtel
3. Seerosengürtel
4. Röhrichtgürtel
5. Gross-Seggen-gürtel (im Schwankungsbereich des Wasserspiegels)
6. Erlenbruchwald (am Ufer in der vernässten terrestrischen Zone).

Abgestorbene Reste der aufgeführten Pflanzengesellschaften heben den Gewässerboden vom Ufer her auf und schieben die einzelnen Gürtel – da deren Existenz an eine bestimmte Wassertiefe gebunden ist – immer mehr gegen die See-mitte hin vor. Dieses Weiterwandern der nebeneinander bestehenden Vegetationsgürtel bewirkt damit eine übereinanderliegende Abfolge von Sediment- und Torfarten, nämlich von unten nach oben: anorganische bis organogene Mudden, Schilftorf, Seggentorf, Erlenbruchwaldtorf.

Tabelle 1: Entstehungsbedingungen und Klassifikation von Mooren (nach Overbeck 1975)

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>A Vernässung geogen, unter dem Einfluss von Mineralbodenwasser Moortyp: Niedermoor (engl. fen, frz. bas-marais)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Vernässung topographisch bedingt, wenig vom Klima abhängig, Oberfläche horizontal Moortypen: topogene Moore <ol style="list-style-type: none"> a) Verlandungsmoor (limnogenes Moor) b) Versumpfungsmoor (telmatogenes Moor) 2. Vernässung durch Überrieselung mit Wasser von Böden aus der Umgebung, Oberfläche konkav oder geneigt Moortypen: soligene Moore | <p>B Vernässung ombrogen, d.h. nur durch unmittelbar auf die Fläche fallendes Niederschlagswasser, Oberfläche uhrglasförmig Moortyp: Hochmoor (engl. bog, frz. haut-marais)</p> <ol style="list-style-type: none"> a) wurzelechtes Hochmoor (direkt über dichtem saurem Mineralboden entstanden) b) nicht wurzelechtes Hochmoor (über Niedermoor entstanden) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Der Erlenbruchwald als Endglied der Verlandungsserie kann nur so lange überdauern, als er im Bereich des nährstoffreichen Grundwassers bleibt. Dies kann über sehr lange Zeiten der Fall sein. Sobald aber die Anhäufung von organischem Material über den Grundwasserspiegel hinaus ansteigt, gelangt die Vegetation zunehmend in den Einflussbereich des nährstoffarmen Niederschlagswassers. Die beim Abbau der Pflanzenreste anfallenden Huminsäuren können nicht mehr neutralisiert werden; der Boden versauert und verarmt. Die Erle macht vorerst der Birke und der Föhre Platz, und auch im Unterwuchs nehmen acidophile Pflanzen überhand (Übergangsmoor). Wenn schliesslich das Niederschlagswasser allein bestimmend wird, kommt es zur allgemeinen Verbreitung von Torfmoosen (Sphagnum); das mesotrophe Übergangsmoor geht in ein oligotrophes Hochmoor über.

Das Hochmoor ist über die Mineralbodenoberfläche aufgewölbt. Seine Form wird oft mit einem Uhrglas verglichen. Eine mehr oder weniger ebene Zentralfläche wird durch ein peripheres Randgehänge abgeschlossen. Die Zentralfläche ist gekennzeichnet durch einen Wechsel von kleinen aufgewölbten Polstern (Bülten) und dazwischen liegenden, meist mit Wasser gefüllten Gräben (Schlenken). Bei grösseren Hochmooren sammelt sich Überschusswasser in zentralen Hochmoorseen (Kolken) oder es fliesst durch Rinnsale (Rüllen) zum Moorrand,

wo es sich im Randsumpf (Lagg) zusammen mit nährstoffreicherem Wasser aus der Umgebung sammelt.

Hochmoore, welche sich über einem Niedermoor (Verlandungs- oder Versumpfungsmoor) gebildet haben, nennt man nicht wurzelecht, im Gegensatz zu den wurzelechten Hochmooren, welche direkt über schwer durchlässigem, nährstoffarmem Mineralboden entstanden. Grossflächig findet man wurzelechte Hochmoore in der nordwestdeutschen Tiefebene, wo sie sich über ortsteinverdichteten Heidepodzolen gebildet haben.

Moore können sich auch an Hängen bilden. Wenn bei ungenügend durchlässigem Untergrund nährstoffreiches Hangwasser den Boden überrieselt, wird der Abbau der anfallenden Streu in analoger Weise gehemmt wie beim Versumpfungsmoor. Man spricht in diesem Fall von einem soligenen Moor. Auch dieser Moortyp kann sich – besonders in seinem unteren Teil, wo von oben zufließende Nährstoffe ausgefiltert sind – zum Hochmoor weiterentwickeln (ombro-soligenes Moor). Im Gebirge häufig anzutreffende Vertreter der soligenen Moore sind die Quellmoore.

Verbreitung der Moore

Entsprechend den dargestellten Entwicklungsbedingungen findet man die grösste Verbreitung von Mooren im nördlichen Europa, in Westsibirien, in Kanada und in den USA. Weniger bedeutende Vorkommen finden sich in den feuchten Tropen. Man schätzt die gesamte Moorfläche der Erde auf 1,5–2,3 Millionen Quadratkilometer, davon ca. 60% allein in der UdSSR. Für die Schweiz nimmt man eine Fläche von 55 km² an (Schneider 1980). Die in den Mooren der Erde konservierte Torfmenge wird auf mindestens 10⁶ Millionen Tonnen beziffert. Jährlich werden davon um 500 Millionen Tonnen abgebaut (Naucke 1980).

Der Verbreitung der Hochmoore sind im Gegensatz zu den Verlandungsmooren enge klimatische Grenzen gesetzt. Sie können nur dort aufkommen, wo ein genügend grosses Niederschlagsnetto herrscht. So sind die Verhältnisse im schweizerischen Mittelland mit mittleren Jahrestemperaturen von 8–9°C und Niederschlägen um 100 cm für die Bildung von Hochmooren nicht mehr günstig. Hochmoorfreundlich sind dagegen die montane und die untere

subalpine Stufe der Nordalpen und des Jura mit Temperaturen von 2–6°C und Niederschlägen von mindestens 130 cm.

Stoffproduktion und Torfbildung

Die mittlere Stoffproduktion einer Hochmoorvegetation beträgt zwischen 2 und 10 Tonnen Trockensubstanz pro ha und Jahr. Der jährliche Zuwachs wird im Mittel mit 0,5 mm angegeben, was einer Torfproduktion von 100 bis 500 kg pro ha und Jahr entspricht. Bei der Vertorfung der Vegetation tritt also ein beträchtlicher Substanzverlust ein, der zwischen 50 und 80% der produzierten Trockenmasse liegen dürfte. Dieser hohe Verlust erstaunt um so mehr, als die vielen gut erhaltenen Pflanzenreste eine weitgehende Konservierung des Pflanzenmaterials vortäuschen (Grosse-Brauckmann 1980).

Der Stoffabbau im Hochmoor erfolgt aerob in der obersten torfogenen Schicht, welche zeitweise dem Luftzutritt zugänglich ist. Für den Abbau (Mineralisierung und Humifizierung) verantwortlich sind Mikroorganismen (Bakterien, Aktinomyceten und Pilze). Entsprechend dem hohen Säuregrad sind Pilze vorherrschend (raschwüchsige *Penicillium*- und *Verticillium*-Arten). Besondere Bedeutung kommt aber den als Symbionten mit den Ericaceen-Wurzeln lebenden Mykorrhiza-Pilzen der Gattung *Cladospodium* zu. Diese verfügen wie die *Penicillium*- und *Verticillium*-Arten über das Enzym Pektinase, mit welchem sie die Pektinstoffe und teilweise auch die Cellulose der Sphagnen anzugreifen und abzubauen vermögen. Darüber hinaus scheiden sie Förderstoffe aus, welche das Wachstum der an der Zersetzungsarbeit beteiligten Bakterien begünstigen. Schliesslich tragen sie mit Hilfe von Polyphenoloxydasen zur Synthese von Huminstoffen aus bakteriellen Abbauprodukten bei (Overbeck 1975).

Wegen des grundsätzlich verschiedenen Wachstumsverhaltens unterscheidet sich der Torfbildungsprozess von Sphagnen von jenem höherer Pflanzen wesentlich. Moose wachsen von unten nach oben nach. Sie sterben an ihrer Basis in gleichem Masse ab, wie sie an der Spitze weiterwachsen. Höhere Pflanzen produzieren mit ihren oberirdischen Teilen Streu, welche auf die Bodenoberfläche fällt und dort weitgehend abgebaut und mineralisiert wird. Daher findet man im Torf kaum oberirdische Teile von höhe-

ren Pflanzen, obschon solche als Begleiter der Sphagnum das Hochmoor besiedeln.

Unterhalb der torfogenen Schicht nimmt die Zahl der aeroben Organismen rasch ab, jene der anaeroben zu, allerdings nur in einem bescheidenen Ausmass. Die grösste Aktivität der anaeroben liegt unmittelbar unter der Zone der aeroben Zersetzung, wo dem mineralisierenden Abbau noch umsetzbares, durch Aerobier noch nicht verwertetes Pflanzenmaterial zur Verfügung steht (Grosse-Brauckmann 1980).

Tiefer im Moor finden keine entscheidenden Abbauprozesse mehr statt, wenn auch das zuweilen beobachtete Entweichen von Sumpfgas auf gewisse Umsetzungen hinweist. Organisches Material, das zufälligerweise in diese Zone hineingerät, wird daher weitgehend konserviert (vgl. Moorleichen, Moorarchäologie). Die oft beobachtete Schichtung von Hochmoorprofilen ist auf wechselnde Zersetzungsintensitäten zurückzuführen, welche ihrerseits auf langzeitigen Schwankungen in Wasserstand, Acidität, N-Haushalt und Pflanzenbestand beruhen.

Bei der Bildung von Niedermooren ist der Substanzverlust im allgemeinen noch höher als bei den Hochmooren. In der Niedermoorvegetation ist der Anteil krautiger, gut abbaubarer Arten hoch. Ein guter Teil davon dient der artreichen Wasserfauna als Nahrung, wird zerkleinert, verdaut und fällt schliesslich als organogenes (koprogenes) Sediment auf den Grund (Mudde bzw. Gytja).

Da das Oberflächenwasser, besonders wenn es bewegt ist, Sauerstoff enthält, erfolgt der mikrobielle Abbau abgestorbener Pflanzenteile rasch. Niedermoor torfe enthalten daher in ihrem sedentären Bereich vor allem Rückstände nicht zerfressener, bzw. nicht abgebauter Pflanzenteile wie Stengel und Rhizome.

Chemische Eigenschaften von Mooren

Die anorganischen Bestandteile der Torfe spiegeln die unterschiedlichen Entstehungsbedingungen wider. Während das ombrogene Hochmoor Mineralstoffe in geringer Menge nur über die Atmosphäre erhält, wächst das Niedermoor in mehr oder weniger eutrophem Wasser auf, in welchem sich, wie oben bereits dargestellt, ausserdem allochthones silikatisches Material absetzen kann. Der Aschegehalt von Niedermoor torfen variiert daher innerhalb beträchtlicher

Grenzen. Bei Abwesenheit von allochthonem Material liegt er meist im Bereich von 5–15%. Entsprechend dem hohen Calciumgehalt des eutrophen Wassers stellt dieses Element den Hauptanteil an der Asche. Dagegen übersteigt der Aschegehalt von Hochmoor torfen 3% selten (vgl. Tab. 2).

Beachtliche Unterschiede finden sich auch bei den Spurenelementen. Naucke (1978) hat diesbezüglich zahlreiche balneologisch genutzte Nieder- und Hochmoore Deutschlands untersucht (Tab. 3). Der bedeutend höhere Gehalt in den Niedermoor torfen dürfte allerdings nicht allein durch die unterschiedlichen Entstehungsbedingungen, sondern in starkem Masse vom pH beeinflusst sein (s. unten). Entsprechend dem niedrigen Redoxpotential der anaeroben Torfe liegt das Eisen in der mobilen Ferroform vor. Bei der Dränage von Mooren gelangen die Ferroionen mit dem Wasser bis ins Dränagesystem und werden dort oxydiert und ausgefällt, was zur bekannten Dränverockerung führt, welche im Extremfall bis zur Verstopfung der Abflussröhren fortschreiten kann (Jelmini et al. 1981).

Unter den organischen Bestandteilen der Torfe kommt den Huminstoffen eine besondere Be-

Tabelle 2: pH, Aschegehalt und Gehalt einiger Makroelemente in Hoch- und Niedermooren (nach Grosse-Brauckmann 1980)

| | Hochmoor | Niedermoor |
|-----------------------------------|-----------|------------|
| pH | 3 – 5 | 5 – 7,5 |
| Aschegehalt (%) | 1 – 2 | 5 – 15 |
| CaO (%) | 0,2 – 0,4 | 1,5 – 4 |
| P ₂ O ₅ (%) | < 0,1 | 0,3 – 0,6 |
| K ₂ O (%) | < 0,1 | 0,1 – 0,2 |
| S (%) | < 0,25 | 0,5 – 5 |
| N (%) | < 1 | 2,5 – 4,5 |
| C/N-Verhältnis | 20 – 70 | 15 – 35 |

Tabelle 3: Spurenelemente (Mittelwerte in ppm) und pH-Werte in 14 Hochmoor- und 25 Niedermoor torfen Deutschlands, welche balneologisch genutzt werden (nach Naucke 1980)

| Elemente | Hochmoore | Niedermoore |
|-----------|-----------|-------------|
| Aluminium | 1500 | 10 000 |
| Eisen | 2400 | 17 000 |
| Mangan | 28 | 280 |
| Nickel | 15 | 43 |
| Chrom | 16 | 80 |
| Zink | 23 | 66 |
| Kupfer | 8 | 18 |
| pH | 4 | 6 |

Tabelle 4: Physikalische Kennwerte verschiedener Torfe und von Seekreide (nach Hohenstatter 1973, zusammengestellt von Schuch 1980). Durchschnittswerte

| | Wassergehalt Vol.-% | Rohdichte kg/dm ³ | Scheinbare Dichte kg/dm ³ | Reelle Dichte kg/dm ³ | Aschegehalt % der TS |
|----------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| Hochmoortorf | 80,0 | 0,902 | 0,102 | 1,45 | 2,3 |
| Niedermoortorf | 87,9 | 0,982 | 0,103 | 1,48 | 8,5 |
| Torfmudde | 89,6 | 0,949 | 0,053 | 1,41 | 6,9 |
| Seekreide | 69,7 | 1,313 | 0,616 | 2,48 | 54,2 |

deutung zu. Da diese als Endprodukt des Vertorfungsprozesses auftreten, nimmt ihr Gehalt mit steigendem Zersetzungsgrad zu. So fand Naucke (1978) in den bereits erwähnten stark zersetzten Niedermoorbadetorfen einen mittleren Huminstoffgehalt von 36,3%, und in den etwas weniger stark zersetzten Hochmoortorfen 30,5%. Eine relative Zunahme im Laufe der Vertorfung erfolgt auch bei den mikrobiell schwer abbaubaren Pflanzeninhaltsstoffen Lignin, Wachs, Harz und Bitumen. Andererseits nimmt der Anteil der leicht zersetzbaren Komponenten Hemicellulose und Cellulose rasch ab. Da jedoch auch ein huminstoffreicher Torf stets noch viele wenig zersetzte Pflanzenteile enthält, sinkt die Cellulose- und Hemicellulose-Fraktion kaum je auf Null ab (Naucke 1980). Neben den genannten Hauptkomponenten wurden aus Torfen verschiedenste weitere Stoffe isoliert, welche aber zum Teil Reste der ursprünglichen Pflanzensubstanz darstellen oder nur in Spuren nachgewiesen werden konnten. Allerdings können gerade diese Spurenstoffe als Wirkstoffe von Bedeutung sein (Küster 1980).

Die Kationentauschkapazität von gut zersetzten Torfen liegt im Bereich von 1,5 bis 2,0 Val pro kg Trockensubstanz. Dieser hohe Wert ist vor allem auf den hohen Huminstoffgehalt zurückzuführen. Torf kann somit als schwach saurer Kationentauscher mit hoher Tauschkapazität bezeichnet werden. Eine besondere Affinität besteht zu den Schwermetallen, im besonderen Blei und Kupfer. Diese beiden Elemente werden wahrscheinlich zweizählig in Form von

Innenkomplexen an Carboxylgruppen der Huminstoffe gebunden (Bloom et al. 1979). Die Bindungsfestigkeit nimmt mit steigendem pH zu (Boehringer et al. 1980). Daher besteht bei organischen Böden, welche sich aus Niedermooren entwickelt haben, eine latente Gefahr des Kupfermangels. Das gleiche gilt für Hochmoorböden, bei welchen Kulturmassnahmen zu einer Anhebung des pH-Wertes geführt haben.

Physikalische Eigenschaften

Beim Aufwachsen der Moore bleibt ein Teil der strukturellen Hohlräume selbst unter jahrtausendelangem Wasserabschluss luftgefüllt. Da der Sauerstoff beim Torfbildungsprozess durch die Mikroorganismen verbraucht wird, setzt sich die Porenluft nahezu ausschliesslich aus Stickstoff und Kohlendioxid zusammen. Entsprechend den Entstehungsbedingungen im Kontakt mit der Atmosphäre ist das luftgefüllte Porenvolumen beim Hochmoor besonders hoch und liegt im Bereich von 10 bis 30%, was sich in der geringen mittleren Rohdichte von lediglich 0,9 kg/dm³ niederschlägt (Tab. 4).

Porengrössenverteilung und Wasserdurchlässigkeit k weisen, je nach Torfart, erhebliche Schwankungen auf. In einem stark zersetzten Hochmoortorf nehmen die Poren von 0,2 bis 10 μm nahezu die Hälfte des Porenvolumens ein, jene über 10 μm und unter 0,2 μm je etwa ein Viertel. Der k -Wert liegt im Bereich von 0,001 bis 10 m pro Tag, wobei sehr oft eine beträchtli-

Tabelle 5: Wärmekonstanten von Torf und Sand (nach Geiger 1950, zitiert nach Eggelsmann 1980)

| Boden | Wärmeleitfähigkeit (J/cm ² ·sec·grad)·10 ⁻³ | | Wärmekapazität J/cm ³ ·grad | | Temperaturleitfähigkeit (cm ² /sec)·10 ⁻³ | |
|-------|----------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------|------|--------------------------------------------------------------------|------|
| | trocken | nass | trocken | nass | trocken | nass |
| Torf | 0,6 | 8,3 | 0,4 | 2,9 | 1,5 | 3 |
| Sand | 1,7 | 16,6 | 1,2 | 1,7 | 1,3 | 10 |

che räumliche Anisotropie festzustellen ist, besonders wenn bei Niedermooren rein organogene Schichten mit Überschwemmungssedimenten oder Seekreide abwechseln (Schuch 1980).

Für das Mikroklima von Moorböden sind die kalorischen Eigenschaften von besonderer Bedeutung. Wegen des hohen Volumenanteils von Wasser werden diese weitgehend durch die entsprechenden Wärmekonstanten des Wassers selbst geprägt. Der hohen Wärmeleitfähigkeit im nassen Torf steht die ebenfalls hohe Wärmekapazität gegenüber, so dass sich die Temperaturleitfähigkeit, welche den Verlauf einer Wärmewelle im Boden bestimmt, zwischen trockenem und nassem Zustand nur unwesentlich unterscheidet. Die Bodenverbesserung, welche sich durch Beimischen von Sand erzielen lässt, geht nicht zuletzt auf die erhöhte Temperaturleitfähigkeit zurück (Tab. 5, Eggelsmann 1980).

Literatur

- Bloom, P. R., McBride, M. B. 1979: Metal ion binding and exchange with hydrogen ions in acid washed peat. Soil Science Society of America Journal 43, 1979, 687–692.
- Boehrer, J., Sticher, H. 1980: Ionenaustausch an Torf in den Systemen H-Ca-Pb und H-Ca-Zn. Bulletin der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz, 4, 1980, 36–41.
- Eggelsmann, R. 1980: Mikroklima der Moore. In: Göttlich, K.: Moor- und Torfkunde, S. 224–230.
- Göttlich, K. (Herausg.) 1980: Moor- und Torfkunde. 2. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Grosse-Brauckmann, G. 1980: Ablagerungen der Moore. In: Göttlich, K.: Moor- und Torfkunde, S. 130–173.
- Jelmini, G., Dubois, J.-P., Dubois, D. 1981: Etude préliminaire de l'influence du drainage sur la migration des éléments dans une source eutrophe. Publications du Laboratoire de Pédologie EPF Lausanne, Heft 7, 1981.
- Küster, E. 1980: Mikrobiologie von Moor und Torf. In: Göttlich, K.: Moor- und Torfkunde, S. 196–205.
- Naucke, W. 1978: Untersuchungen an niedersächsischen Torfen zur Bewertung ihrer Eignung für die Moortherapie. Archiv des Niedersächsischen Landesamts für Bodenforschung, Hannover, 51 S.
- Naucke, W. 1980: Chemie von Moor und Torf. In: Göttlich, K.: Moor- und Torfkunde, S. 173–196.
- Overbeck, F. 1975: Botanisch-Geologische Moorkunde. Wachholtz-Verlag, Neumünster.
- Schneider, S. 1980: Verteilung der Moore auf der Erde. In: Göttlich, K.: Moor- und Torfkunde, S. 52–64.
- Schuch, M. 1980: Physik des Torfes und der Moorböden. In: Göttlich, K.: Moor- und Torfkunde, S. 205–210.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. Hans Sticher
Laboratorium für Bodenkunde
ETH Zentrum
CH-8092 Zürich

Standort und Vegetation natürlicher Moorgebiete

Frank Klötzli

Zusammenfassung

1. Die Schweizer Moore werden im Rahmen Europas moortypologisch dargestellt (Abb. 1, Tab. 1). Sie gehören grösstenteils zum Typus der «Moore des mitteleuropäischen Gebirgslandes» (nach Kac), haben je nach lokalklimatischen Bedingungen den Charakter von Deckenmooren (perozeanischer Art), Aapamooren oder echten Zwischenmooren (Zwischenalpen).
2. Die Abhängigkeit der Gebirgsmoore von Neigungswinkel, Höhenlage und Ozeanität stellt Abb. 2 dar. Tab. 2 erläutert die Moorformen im stärker ombrogenen Bereich dieser Gebiete. Danach gehören die meisten Gebirgs-Hochmoore zu den Sattelmoores.
3. Eine Übersicht über die wichtigsten Pflanzengesellschaften in allen Mooren der Schweiz vermittelt Abb. 3, in der auch anthropogene (einschliesslich gedüngte) Pflanzengesellschaften aufgenommen wurden. Veränderungen des Standorts durch Verbuchung oder Düngung (auch auf indirekte Weise) wurden in Abb. 4 dargestellt («Wirkung der Verhochstaudung»).
4. Im allgemeinen dürfte die Erhaltung dieser Vielfalt gewährleistet sein, sofern es gelingt, in exponierteren Lagen düngende Zuflüsse und die Wirkung von stärkeren Drainagen des Umlandes abzufupfern. Einige Beispiele veranschaulichen die Möglichkeiten.

Résumé

Les marais de Suisse sont dénombrés et comparés aux autres marais d'Europe. L'influence de l'altitude, de la pente et du climat plus ou moins océanique détermine la formation et l'évolution des marais. Les associations végétales des marais naturels et modifiés par l'influence humaine sont décrites. Le maintien de marais naturels en Suisse semble encore possible, à la condition

que ceux-ci soient protégés des apports eutrophes provenant de zones adjacentes.

Einleitung

Über Moore der Schweiz und ihre Standortbedingungen gibt es eine reichhaltige Literatur, die ab Stebler (1897), bzw. Früh und Schröter (1904) mit vorwiegend landwirtschaftlichen Aspekten bis 1972 in Klötzli (1973) zusammenfassend dargestellt wurde (ab 1973 siehe z. B. in Wildi 1977, Aeberhard 1973, Gallandat 1980, Gobat 1981).

Und doch ist man sich erst in neuerer Zeit über die Vielfalt der Moortypen (Terminologie nach Göttlich (1980)) etwas klarer geworden, nachdem schon Lüdi (n. p.) in zusammenfassenden Darstellungen in den Jahren 1943–51 die regionalen Ausbildungen verschiedener Gebiete aufgezeigt hatte. Diese Vielfalt deckt sich weitgehend mit der klimatischen Vielfalt in unserem Lande und wird heute vor allem in naturschützerischer Hinsicht durch die noch nicht abgeschlossene Moorkartierung der Schweiz (finanziert durch den Schweiz. Bund für Naturschutz, kartiert durch A. Grünig und L. Vetterli) untermauert werden können. Erste Vorversuche, um in moortypologischer Hinsicht eine Gesamtchau zu schaffen, erfolgten während der moorkundlichen Kartierungsarbeiten in der Nordostschweiz im Zusammenhang mit der Kartierung Baden-Württemberg durch Kh. Göttlich (1972, 1975). Einige Jahre später wurden die hier auch verwendeten Schemata entworfen, veranlasst durch die Aufnahme von Problemen der Wieder- oder Erstbewaldung von Mooren (Klötzli 1978; s. vor allem Dierssen u. Dierssen 1984).

Zur moortypologischen Stellung der Schweizer Moore im Rahmen Europas

Zum besseren Verständnis der Schweizer Verhältnisse scheint es wesentlich zu sein, die Stel-

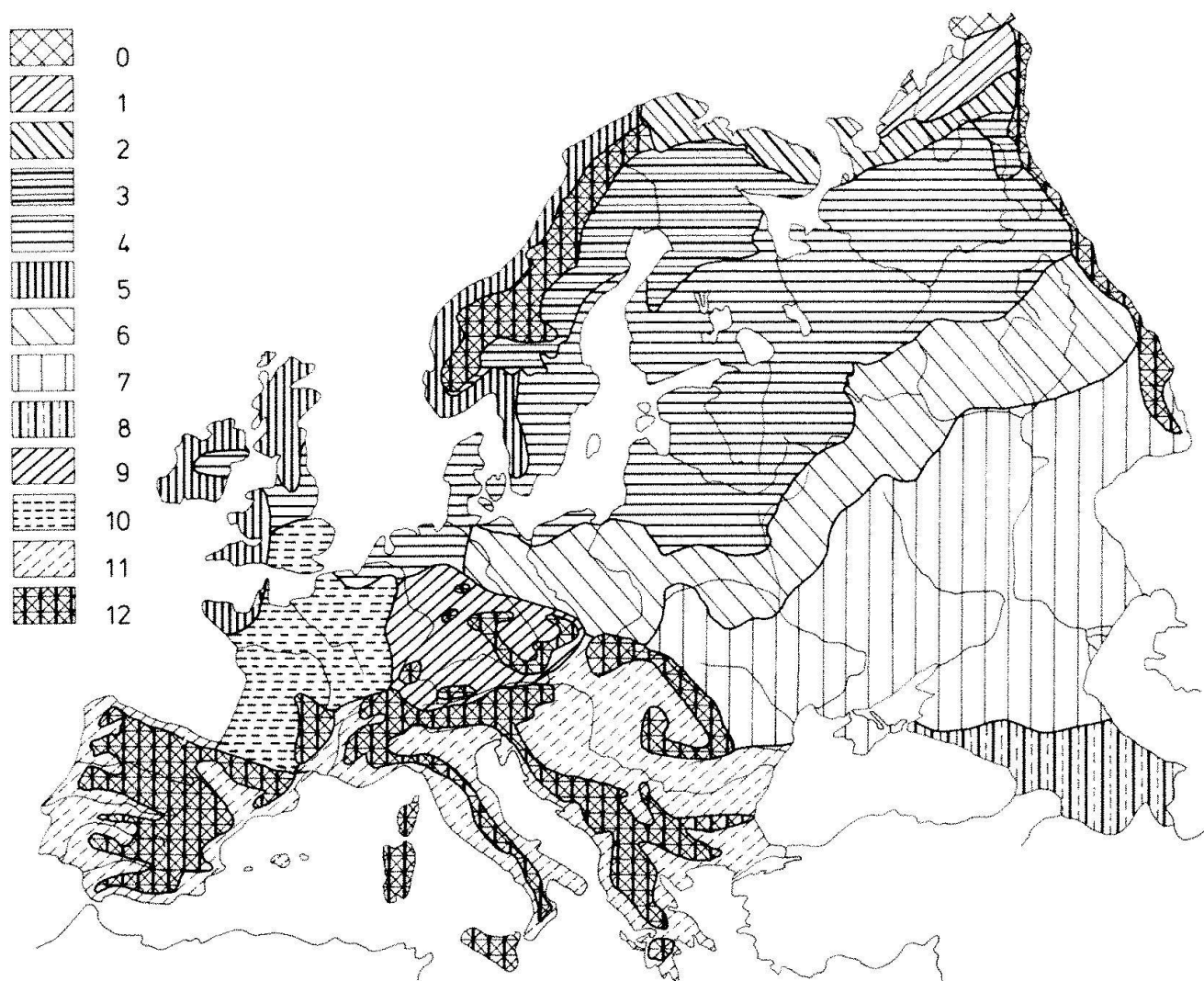


Abb. 1. Moortypen Europas (Legende s. Tab. 1)

lung der Schweiz im Rahmen der europäischen Moorlandschaften zu beleuchten und dies mit einer modifizierten Moorkarte Europas nach Kats (oder Kac 1971) zu illustrieren (Abb. 1 und Tab. 1). Demnach liegt die Schweiz im Bereich der «Moore des mitteleuropäischen Gebirgslandes» sowie (grösstenteils) der «Gebirgsmoore». In unserem Falle bedeutet letzteres, dass je nach den regionalen Klimabedingungen ozeanischer oder kontinentaler Tönung, einmal Deckenmoore, ein andermal Aapamoore oder Zwischenmoore angedeutet oder ausgebildet sind. So erscheinen im Oberengadin mit beträchtlicher Lokalkontinentalität keine echten Hochmoore mehr, sondern (echte) Zwischenmoore, die sich mit Flach- und Quellmooren verzahnen und in Hanglage Aapamoor-Charakter annehmen (z. B. Stazerwald). Und im Bereich der sehr ozeanischen Region am Voralpenrand am Höhronen und Rossberg mit dem

ausgedehnten Hochmoor von Rothenthurm sind geländeüberziehende Deckenmoorformen angedeutet, die aber wegen der schon recht hohen Lage (900 m ü. NN) und besonderen Ungunst des lokalen Winterklimas aapamoorartig verzerrt sind, dies namentlich in sekundär baumfreien Bereichen.

Mehr Einzelheiten über die ungefähre Verteilung einzelner Moortypen in der Schweiz ergibt Abb. 2. Zur näheren Erläuterung der stärker ombrogenen Bereiche vermittelt Kaule (1973a, b) eine Übersicht über die verschiedenen Formen im Bayerischen Alpenvorland, die indessen in unserem Lande in der Regel nur noch unvollständig erhalten oder weniger gut entwickelt sind (Tab. 2). Immerhin sind stellenweise doch noch Lagg- und Rüllenelemente erkennbar, dies trotz lokalen Drainagen und Beweidung der Randgebiete (s. z. B. Helchen/AI, Kallwald/Obersaxen/GR, Cadagno Fuori/V. Piora/TI,

Tabelle 1. Verbreitung der wichtigsten Moortypen in Europa (grösstenteils nach Kats 1971 und Schneider in Göttlich 1980; in Westeuropa verändert)

| Nr. | Moortyp | Klimaxvegetation | Bemerkungen | Vegetation |
|-----|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0 | moorfrei | Flechten-/Moostundra | mit Eissümpfen und z. T. Anmoorlagern | z. T. Kleinseggenrasen |
| 1 | polygonale Anmoore; Flach-Hügelmoore | Flechten-/Moos-/Zwergstrauch-/ Waldtundra | im N 4-6eckige gefrorene Polygone, 5-20 m; Anmoor 5-10 (-50) cm. | Braunmoosteppiche, Kleinseggenrasen |
| 2 | Gross-Hügelmoor (Palsmoor) | Strauch-/Waldtundra | bis 10 m hohe Palsen mit Radizellen-, Radiz./Sphagnum- und Eriophorum-Torf, entstanden durch Frosthebung (z. T. fossil), Eiskern; Kuppen oft mit Winderosion, Basis schlenkenartig. | 1/2/3 auch mit NM auf grösseren Flächen (mit Cx/Erio/BM) Pals mit Sph/Cx/Erio/S, z. T. Lärche Schlenke mit Cx/Erio/ZS/BM |
| 3 | Strangmoor (Aapamoor, z. T. Kermimoor) | nördl./mittl. Taiga | kleiner- bis grösserfläch. Mosaik von Strängen (längl. Bulten) mit HM-Vegetation und Schlenken («Flarks») mit NM-Vegetation, hervorgerufen durch Wasserstau und Eisschub; ombrosoligen, Kermikoor nur ombrogen. | Strang mit Sph/Cx/Erio/S Flark mit Sph/Cx/Erio/BM sowie Menyanthes, Equisetum |
| 4 | Hochmoor i.e.S. | mittlere Taiga, nördl. sommergrüner Laubwald | typische Hochmoore mit Schlenken/Bulten-System auf der Moorweite, mit Randgehänge, Lagg und Rüllen, evtl. Kolk (Moorauge); in stärker ozean. Gebieten auch ± bultfreie Plan-Hochmoore; 4-5 (-12) m Torf; ferner: Waldmoore mit Föhre, Fichte, Birke, Weiden, Erlen; Seggen-NM, Röhrichte. | Bult mit Sph/(Cx)/Erio/S Schlenke mit Sph/Cx/Erio im W mit Erica tetralix, im (NE) mit Rubus chamaemorus, Ledum palustre, Chamaedaphne calyculata |
| 5 | Deckenmoor | perozean. sommergrüne Laubwälder, z. T. ozeanische Nadelwälder | ± ebene Moorweite, ohne Randgehänge, bis ca. 30% Neigung; bis 12 m Torf. | Sph/(Cx)/Erio/Tricho u.a. Cyperaceen/S |
| 6 | Waldmoor (inkl. Reisermoor) | subkontinent. sommergrüne Laubwälder, nordöstl. Nadelwälder | Moor im Sommer oberflächlich etwas austrocknend, deshalb mindestens hainartig bewaldet; meist sphagnumreiche Föhrenmoorwälder, z. T. Bruchwald; ferner: Seggen-NM (auch sphagnumreich), Röhrichte. | Sph/(Cx)/Erio/S, B |
| 7 | grossseggenreiches Niedermoor («Grasmoor») | Waldsteppe, Steppe, Wüste | eu-/oligotrophe (Sphagnum-)Cyperaceen-NM, Röhrichte, Erlen-Bruchwald. | (Sph)/Cx/Erio/BM/(S) |
| 8 | «Grasmoor» | südl. sommergrüner Laubwald | eu-/oligotrophe (Sphagnum-)Cyperaceen-NM, Waldmoor, Röhrichte, Bruchwald; 3 (-12) m Torf. | (Sph)/Cx/Erio/BM/S, B |
| 9 | (Nadelholz-)Hochmoor, z. T. DM | sommergrüner Laubwald | ähnlich 4, aber häufig mit Pinaceen (Föhre, Fichte, «Kuscheln»); meist in Mittelgebirgslagen; ferner: Seggen-NM (auch sphagnumreich), Röhricht, Bruchwald. | ähnlich wie bei 4; Bult mit S, B, Tricho Schlenke mit BM |
| 10 | «Grasmoor» | südl./westl. sommergrüner Laubwald | eutrophe Cyperaceen-NM; Gebirgslagen ähnlich 9; ferner: Röhricht, Bruchwald | (Sph)/Cx/(Erio)BM |
| 11 | «Grasmoor» | Hartlaubwald | eutrophe Cyperaceen-/Junaceen-NM, Röhricht; ferner: Bruchwald | Cx/BM |
| 12 | Moore der Gebirgslagen | Laubwald/Nadelwald | je nach Lage mit 3, 4, 5, 6, oft 9; ferner: Röhricht, (Sphagnum-) Cyperaceen-NM, Bruchwald, Moorwald | |

Legende zu Tabelle 1:

| | | | | | |
|----|--------------|--------|--------------------------|---|-----------------------------------------------------------------------------------|
| HM | Hochmoor | Sph | Sphagnum, Torfmoos | S | Zwergsträucher (meist Ericaceen) und Sträucher (Salicaceen, Betulaceen, Pinaceen) |
| NM | Niedermoor | BM | Braunmoose | B | Bäume (meist Pinaceen, Betulaceen) |
| ZM | Zwischenmoor | Cx | Carex, Seggen | | |
| DM | Deckenmoor | Erio | Eriophorum, Wollgräser | | |
| | | Tricho | Trichophorum, Rasenbinse | | |

Torf-Klassifikation s. z.B. in Göttlich (1980) oder Domergue-Greter (1981), dort auch Angaben zur Diskriminierung zwischen eutroph/oligotroph:

| | eutropher*/oligotropher Torf (inkl. Fibrist/Saprist)**) |
|------------|---------------------------------------------------------|
| Asche | 5 – 15 |
| Kalzium | 1,5– 4 |
| Phosphat | 0,3– 0,6 |
| Stickstoff | 2,5– 4,5 |

*) nicht zu verwechseln mit der Trophie-Stufe der entsprechenden Vegetation: z.B. oligotrophe Kalk-Kleinseggenrieder auf eutrophem Torf oder Anmoor
 **) Nach DIN 4047 «Moor-»Standorte bei einer Mindesttorftiefe von 20–50 cm.

Unterschied zwischen NM- und HM-Stufenkomplex (nach Hölzer 1977):

| | NM | HM |
|-----------------------|-----------|-----------|
| pH | 3,2 – 5,0 | 3,0 – 3,3 |
| Ca ²⁺ mg/L | 0,45–2,40 | 0,25–0,60 |
| Mg ²⁺ mg/L | 0,18–1,20 | 0,10–0,30 |
| Na ⁺ mg/L | 0,75–2,70 | 0,48–0,95 |
| K ⁺ mg/L | 0,25–1,50 | 0,14–0,60 |

Vgl. die detaillierten Untersuchungen an asymmetrischem Hochmoor von Wilm (1977), wonach vor allem die Basensättigung des Torfes differenzierend wirkt, und die vegetationskundliche Differenzierung bei Kaule (1973b) mit Braunmoos-, Utricularia/Sphagnum subsecundum-, Pseudohochmoor- und Hochmoor-Stufenkomplex.

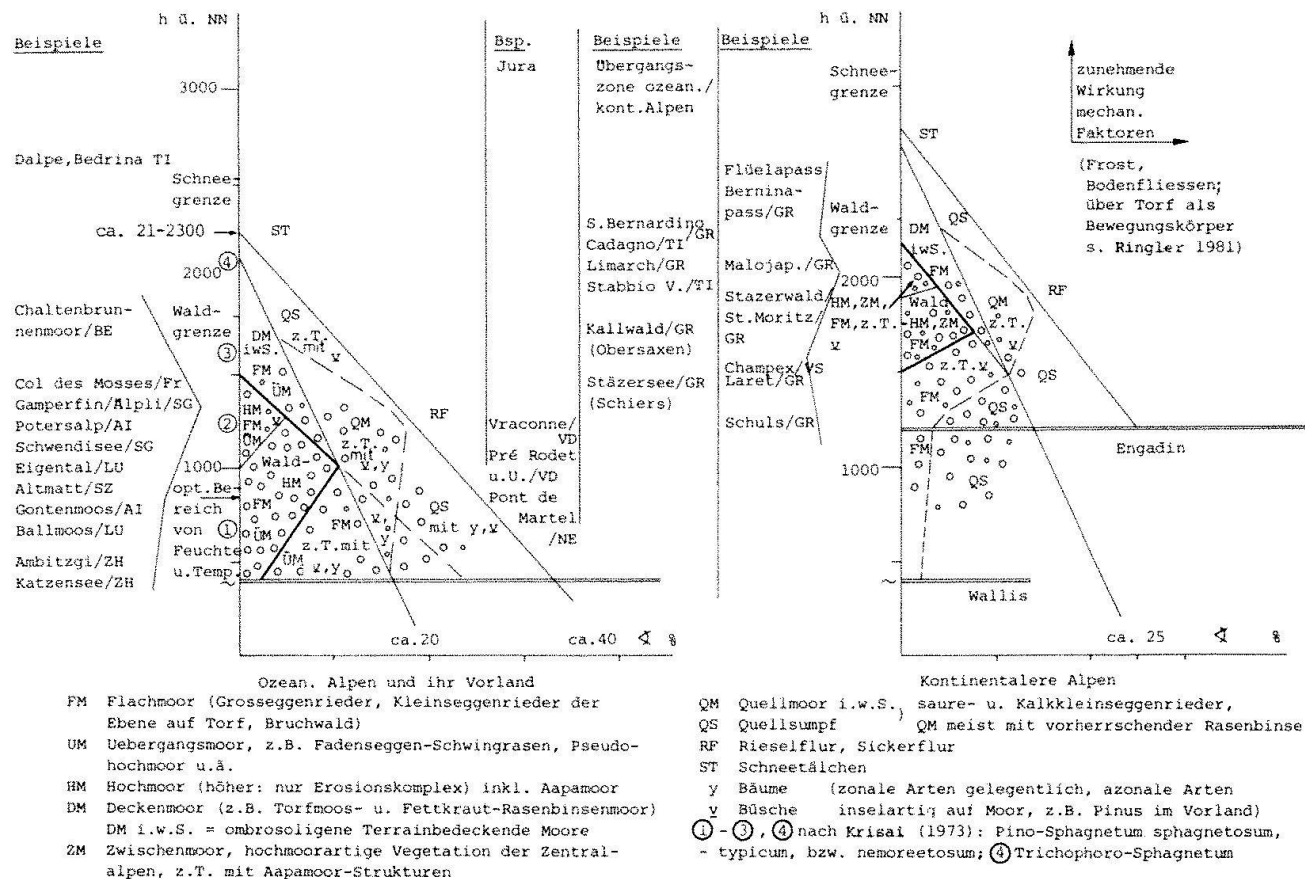


Abb. 2. Verbreitung der Moortypen in der Schweiz in Abhängigkeit von Höhenlage und Hangneigung

Tabelle 2: Moortypen und floristische Angaben zu den voralpinen und alpinen Hochmooren (in Anlehnung an Kaule 1973a, b, Ringler 1981)
Höhenbereich 450–1900 m; Niederschlagsbereich 800–2500 mm/J. (Einzelheiten s. «Bemerkungen zu Tabelle 2»).

| Moortyp | Verbreitung (mit Beispielen) | | Entwicklung | Bemerkungen |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Symmetrisches Hochmoor*) | kaum anzutreffen und nie intakt! andeutungsweise in flachen und breiten Jura-Tälern | | bei der Verlandung von Seen, auf Seeton und Glaziallehm | keine vollständigen Zonationen erhalten**) |
| Asymmetrisches Hochmoor (auch im alpinen Bereich) | Spezialfall ± offener (Berg-)Föhren-Hochmoore Reste bei Rothenturm | | | nur wenig geneigte Lagen und einzig Randgehänge mit höherem Gehölz |
| Bergföhren-(Wald-)Hochmoor («Filz») | Normalfall der Mittelland-nahen Lagen (z.B. Ball- moos/Lieli/LU, Hagenmoos/Kappel/ZH) | | z.T. auf leicht entwässertem HM, z.T. etwas steilere Lagen | ohne zentrale offene Fläche; Randge- hänge mit dominierender Zwerg- strauch-Schicht |
| Bruchwald-Filz (hochmoorartig) | wie oben, ferner Katzenssee, Pfäffikersee, auch in jurassischen Mooren | | z.T. bei (natürlicher) Austrock- nung von Erlenbruch | physiognomisch oft reiseremoorartig |
| Schwinggrasen***) | Mittelland: z.B. Vordermoos/Oberglatt/ZH; Egel- see/Menziken/ZG und wie oben; Voralpen: z.B. Lac de Lucy/VD; Schwendisee, Wildhaus/SG usw. | | Verlandung eher oligo-/dystro- pher Seen (Toteisseen) | oft mit Hochmoor-Anflug |
| ombrosoligenes Hangmoor | Bergföhren-Moorwald-Komplexe im Flysch und im Hochjura (dort z.B. Vraconne); ferner Helchen/Al, Äpli/SG, Kaltenbrunner Moos/BE | | mässig geneigte Lagen | Voralpengrenze: Übergänge zu asymm. HM. Talseite: Randgehänge. Bergseite: Übergang zum Mineralboden z.T. mit Quellmoor |
| Sattelmoor (verbreitetster Typ) | z.B. Wasserscheide bei Wildhaus/SG (zerstört) | | Wasserscheide Hochtal | |
| Kratermoor | kleine ombrosoligene Moorseln in Bergföhrenfilz des Seeliwaldes/OW (Hünergutsch) | | s. «Bemerkungen zur Tabelle 2» | sehr kleinflächig und oft mit «Restsee» oder Schlenke! Rand mit Filz |

* Wachstums-Komplex = Komplex von Gesellschaften, die das wachsende Hochmoor aufbauen und die sich im Laufe der Entwicklung z.T. verändern können. Am Alpenrand (NS 1500 mm) mit (stabilisierten) Schlenken, meist ohne festen Torf. Stillstands-Komplex: bei Störung des Wachstums. Erosions-Komplex: durch Torferosion oberhalb der Wachstums-grenze von HM.

** Lagg mit Bruchwald und/oder Flachmoor; Randgehänge mit Moorwald; Moorweite mit hainartigem Nadelholzbestand.

*** Im Alpenraum z.B. Bonigersee/Bürchen/VS, Lai da Vons/Sufers/GR, Jaunpass/BE usw.

Eigenheiten sog. «Alpiner Moore» (Tal- und Hochlagenmoore, 450–1250 bzw. 800–1900 m) im Vergleich zu den Vorlandmooren (400–900 m)

1. *Relief*: Grösstenteils auf Wasserscheiden. Notwendigkeit der Abschirmung vor der Fließgewässerdynamik (allenfalls auf zugeschütteten Staubecken); «dem Gelände aufgesetzt», z.T. auf anstehendem Fels, häufiger «wurzelecht». Vorlandmoor eher in glazial ausgefahrenen und abgedichteten Beckenlagen, meist durch Verlandungs-Sukzession, seltener Versumpfung; mithin eher topogen, alpine Moore eher soligen.
2. *Klima*: niedrigere Temperaturen (Vegetationsperiode 13–12, bzw. < 10 °C gegenüber 15–12 °C), aber meist grössere Temperaturdifferenzen; höhere Niederschläge, häufiger Starkregen; höhere Luftfeuchtigkeit, aber oft starker Föhneinfluss; namentlich im Alpeninneren grössere thermische Kontinentalität und stärker ausgeprägte Frostwechseldynamik, höherer Trockenheitsindex sowie grössere Erosivität (vgl. Hochmoor-Obergrenze).
3. *Moortstruktur* (im allgemeinen Sinne): Verhältnis Moortiefe zu Moorfläche geht von sehr gross bis sehr klein (auch kleine Moore können sehr tief sein!); ausgeprägtere Moorstrukturen, z.B. Stränge/Flarks, Rüllen. Mit zunehmender Höhe Grenzen zwischen Moor/Nichtmoor und Hochmoor/Niedermoos unschärfer (Anteil hochmoorartiger Abschnitte zunehmend, aber auch der Niedermoospflanzen auf diesen Abschnitten).

Pont-de-Martel/NE u. a.). Indessen zeigen die Niedermoore i. w. S. (inkl. der Quellmoore) noch in vielen Fällen, weil weniger empfindlich gegen Störungen aller Art, die meisten typischen Strukturelemente von der typischen nasen Moorweite bis zum Quellaufstoss oder den randlichen Pionierwäldern. In wenigen Fällen sind in ausgesprochen soligenen Mooren auf basischem Untergrund sogar Hochmoor-Anflüge oder Moorwald-Inseln ausgebildet, wie z. B. im Moorkomplex Vraconne im Waadtländer Jura. Kleinflächig und meist stark gestört können solche eher dystrophen Inseln auch in Quellmooren des Mittellandes auftreten (z. B. im Kopfbinsenrasen am Stoffel, Hittnau/ZH).

Allgemeine Übersicht über die Pflanzengesellschaften der Schweizer Moore und ihre anthropogenen Abwandlungen

Pflanzensoziologisch ist die Ansprache der Schweizer Moore etwas einfacher trotz der Vielfalt, da ähnliche Gesellschaften auf moortypologisch abweichenden Feuchtgebieten vorkommen können (vgl. auch Wilde 1977). So sind die Bultvegetationen in echten Hochmooren und ihren Abwandlung in klimatisch extremeren Gebieten sowie auf Quellmoorkuppen

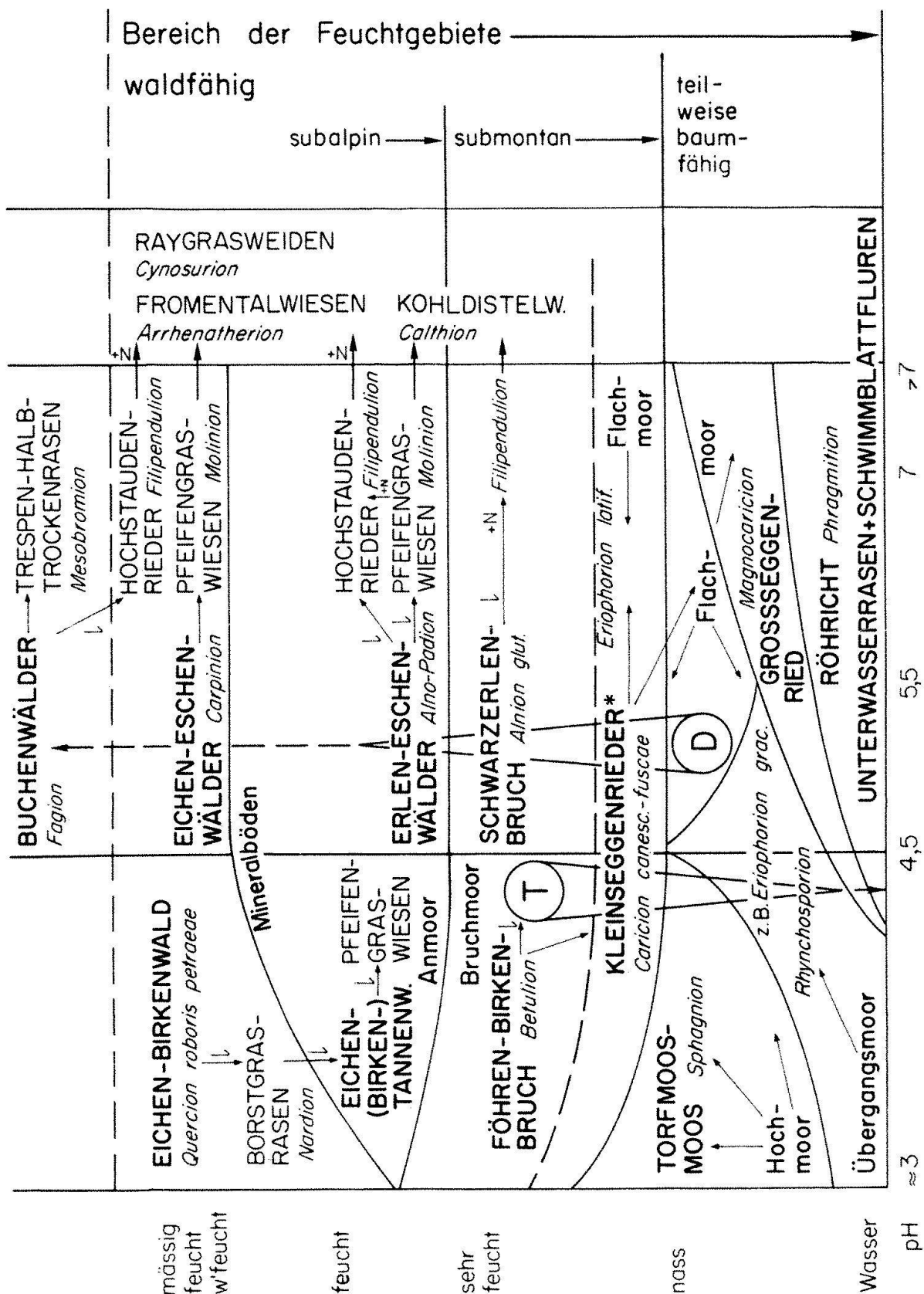
recht ähnlich ausgebildet. Ähnliches gilt für die Vegetation von Schlenken und Rüllen mit vorherrschend *Carex limosa* und/oder *Carex lasiocarpa*.

Neben den natürlichen Pflanzengesellschaften lässt sich im Schema von Abb. 3 noch angeben, welche Einheiten bei Torfstichen oder Drainage, bzw. welche bei Rodung des Moorwaldes, nachfolgender Mahd, bzw. Düngung (und Drainage) entstehen. Denn auch wenn ein Moorwald zur Futterwiese umgewandelt wurde, so bleibt der Boden doch ein Moor, und es ist von vegetationskundlichem Interesse zu wissen, welche anthropogene Abwandlung der ursprünglichen Vegetation sich nun auf dem nämlichen, aber hydrologisch und nährstoffmässig abgewandelten Standort einfindet (vgl. hier auch Jelmini et al. 1981). Dabei muss man sich klar sein, dass schon die Wiederbewaldung (bzw. Verbuschung) von Streuland und erst recht die Düngung, auch in indirekter Art, zu kaum reversiblen Umwandlungen des Standorts führt, namentlich durch Vererdung und Nährstoffumlagerung in den Torfen (vgl. Abb. 4).

Für eine detaillierte Bearbeitung der Moorvegetation sei auf die einschlägige Literatur verwiesen (z. B. Ellenberg 1978, s. auch Göttlich 1980).

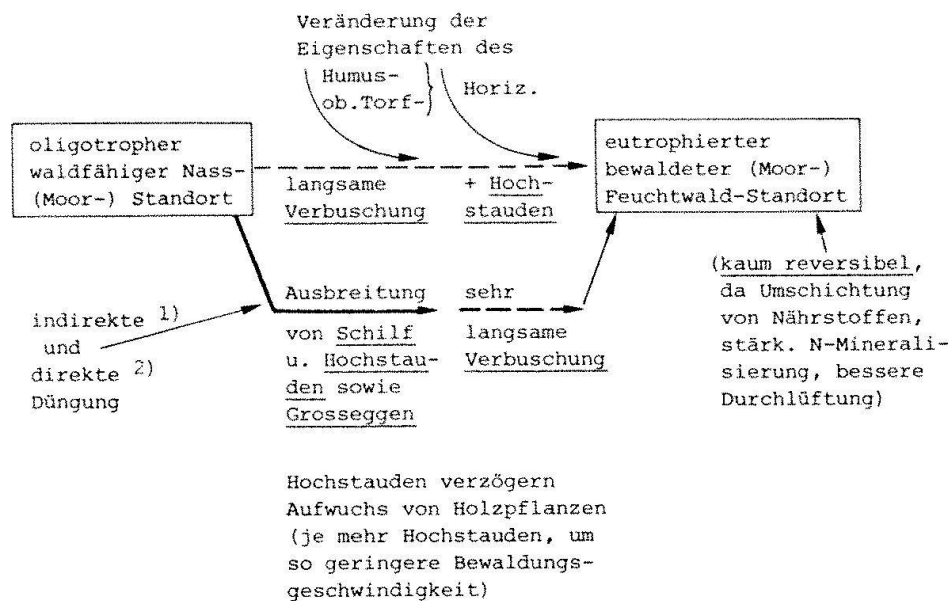
Bemerkungen zu Tabelle 2

- *Ombrosoligene Hangmoore* (also Moore mit Hangwasseranschluss) mit oft hangaufwärts anschliessendem Quellmoor oder Sickerflur
Spezialfälle mit teilweise reliefbedingten Übergängen zum Sattelmoor (ausführlich in Ringler 1981; dort auch Hydrologie):
 Quellnischenmoor (Hangmoor mit ausgeprägten eingestreuten Quellnischen)
 Riedelmoor (Hangmoor auf flachen Hangrippen zwischen zwei Bachtälern, teilweise sattelmoorartig, oft mit laggartigem Einhang zum Bachtal; ähnlich z. B. Kallwald im Bereich Obersaxen)
- *Sattelmoor i. w. S.* (also Moore \pm ohne Hangwasseranschluss)
Spezialfälle mit charakteristischem Relief:
 Halbsattel, Halbsattel mit einseitigem Hanganschluss (ferner einseitiges Sattelmoor: nur ein Teil des Sattels moorfähig)
 Kammoor (in Kammlage, Grindenmoor auf Kuppe, «Herde» auf eine Kammseite beschränkt)
 Plateaumoor (auf flacher Kuppe oder Hochplateau)
 Karbodenmoor (Hochmoorentwicklung in abgeschirmtem Kar)
 Staumäandermoor (nur teilweise Hochmoorentwicklung auf Niedermoor im Bereiche genügend isolierter Mäander eines Hochtalsflusses)
- *Kratermoor* (Hochmoor mit eingesenkter Moorweite)
 Entwicklung möglich durch rüllenbedingte rückschreitende Erosion in ein flussnahes Hochtalmoor mit Längskolk; beide können durch bachnahe Niedermoore scharf begrenzt sein (z. B. asymmetrisches Hochmoor oder Staumäandermoor).
- *Schwingrasen*
 Spezialfall in Felskesseln: Schwimmendes Kesselmoor.
 Weitere *komplexe Spezialfälle* bei komplexen Geländeformen:
 Kargehängemoor, Karstufenmoor, Blockhaldenmoor, Bandmoor (auf Nagelfluhbändern) sowie Deckenmoor, im Sinne eines soliombrogenen terrainbedeckenden Moores.



* z.T. KLEINBINSENRIEDER (*Juncion acutiflori*) je nach Klima; im feuchteren Bereich natürlich
 ↓ Rohdung / Mahd
 +N starke Nährstoffzufuhr
 ⊙ Drainage/Mahd, es bilden sich obenstehende Einheiten (je nach Standort)

Abb. 3. Übersicht über die Pflanzengesellschaften der Moore der Schweiz



- 1) Einschwemmung aus Kulturland (vgl. Boller-Elmer 1977)
Transport über Grundwasser
Rückstau von Grabenwasser
Eigendüngung durch mangelnde Pflege (kein Schnitt) (→ Veränderung des Standorts)
Laubfall u.ä.
↙ Mineralisierung und Aufbereitung von N bei Austrocknung s. bei Jelmini et al. (1981)
- 2) gelegentliche Düngung mit Hof-/Handelsdünger in günstigen Jahren, sonst nur einschürig bei herbstlichem Schnittzeitpunkt

Abb.4. Zur Wechselbeziehung Hochstauden ↔ Holzpflanzen *)

*) Einzelheiten zur Verbuschung bzw. Wieder- oder Erstbewaldung s. z.B. bei Briemle (1980).

Zur Erhaltung der natürlichen Moorvegetation

Alles in allem dürfte trotz allgemeiner Nährstoffanreicherung sogar (sub-)alpiner Lagen die Existenz auch empfindlicherer Moortypen und Moorstrukturen gewährleistet sein, sofern direkt zufließende Nährstoffe abgepuffert werden können. Entsprechende Untersuchungen sind bei einzelnen Pflanzengesellschaften, bzw. Moortypen noch im Gange. Schwieriger dürfte die Erhaltung halbwegs intakter Hochmoorkomplexe in niedrigeren Lagen sein, da durch die Veränderungen im Wasserhaushalt der Randbereiche kaum rückgängig zu machende Schäden entstanden sind, die manchmal die zentralen Teile ebenso betreffen. Im Verein mit Stichgräben bis in die Moorweite sind die früheren Bedingungen dann kaum mehr wiederherstellbar (vgl. die Eingriffe am Moor Gamperfin/

SG). In einzelnen Fällen lohnt sich aber doch ein Versuch, zunächst in kleinerem Rahmen mit technischen Mitteln einzugreifen, um die früheren hydrologischen Verhältnisse einigermaßen wiederherzustellen (vgl. die Versuche im Eigentäl/LU und die geglückte Regulation mittels Pumpen beim Moorkomplex Moos bei Wallisellen/ZH, Klötzli 1980).

Literatur

- Aeberhard, F. 1973: Soziologisch-ökologische Untersuchungen im Naturschutzgebiet Burgmoos (BE/SO). Mitt. Natf. Ges. Kt. Solothurn, Heft 26, 1-104.
- Briemle, G. 1981: Untersuchungen zur Verbuschung und Sekundärbewaldung von Moorbrachen im südwestdeutschen Alpenvorland. Diss. Bot., Heft 57, 286 S.

- Dierssen, B., Dierssen, K. 1984: Vegetation und Flora der Schwarzwaldmoore. Beihefte zu den Veröffentlichungen für Naturschutz und Landschaftspflege in Baden-Württemberg, 39, 1–512.
- Domergue-Greter, F. 1981: Les tourbes: matière organique, minéralisation et classification. Lab. Pédol. EPFL, Heft 8, 134 S.
- Ellenberg, H. 1978: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. 2. Aufl. Ulmer Stuttgart, 982 S.
- Gallandat, J.-D. 1980: Phytosociologie et écologie des prairies humides du Haut-Jura suisse et français. Diss. Universität Neuenburg, 361 S.
- Gobat, J.-M. 1981: Ecologie des contacts entre tourbières acides et basmarais alcalins dans le Haut-Jura suisse. Diss. Universität Neuenburg, 313 S.
- Göttlich, K. 1980 (Hrsg.): Moor- und Torfkunde. 2. vollst. überarb. und erweiterte Aufl. Schweizerbart Stuttgart, 338 S.
- Hölzer, A. 1977: Vegetationskundliche und ökologische Untersuchungen im Blindensee-Moor bei Schonach (mittlerer Schwarzwald), unter besonderer Berücksichtigung des Kationengehalts. Diss. Bot., Heft 36, 195 S.
- Jelmini, G., Dubois, J.-P., Dubois, D. 1981: Etude préliminaire de l'influence du drainage sur la migration des éléments dans une tourbe eutrophe. Lab. Pédol. EPFL, Heft 7, 55 S.
- Kats, N.J. 1971: Die Moore der Erde (russ.). Nauka Moskau, 295 S.
- Kaule, G. 1973a: Typen und floristische Gliederung der voralpinen und alpinen Hochmoore Süddeutschlands. In: Landolt, E. (Hg.): Pflanzengesellschaften nasser Standorte in den Alpen und Dinariden. Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich, Heft 51, 127–143.
- Kaule, G. 1973b: Die Seen und Moore zwischen Inn und Chiemsee. Schriftenreihe Naturschutz u. Landschaftspflege (Bayer. Landesamt für Umweltschutz), Heft 3, 72 S.
- Klötzli, F. 1978: Zur Bewaldungsfähigkeit von Mooren der Schweiz. Telma, Heft 8, 183–192.
- Klötzli, F. 1980: Naturschutz im Reusstal – Fragen aus ökologischer Sicht. Schweiz. Ing. u. Arch., Heft 98 (14), 312–318.
- Krisai, R. 1973: Hochmoorverbreitung und Hochmoorvegetation im Ostalpenraum. In: Landolt, E. (Hg.): Pflanzengesellschaften nasser Standorte in den Alpen und Dinariden. Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich, Heft 51, 144–153.
- Lüdi, W. 1943–51 (n. publ.): Moore der Schweiz. Gutachten (Manuskript).
- Ringler, A. 1981: Die Alpenmoore Bayerns – Landschafts-ökologische Grundlagen, Gefährdung, Schutzkonzept. Ber. ANL, Heft 5, 4–98.
- Wildi, O. 1977: Beschreibung exzentrischer Hochmoore mit Hilfe quantitativer Methoden. Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich, Heft 60, 128 S.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. F. Klötzli
Geobotanisches Institut ETH
Stiftung Rübel
Zürichbergstrasse 38
CH-8044 Zürich

Landwirtschaftliche Nutzung der Moorböden

Hans Paul Käser

Zusammenfassung: Die Moorböden sind für den intensiven Hackfruchtbau besonders gut geeignet. Nach den Drainagearbeiten und dem Wasserentzug wird aber der Torf langsam abgebaut. Die Mächtigkeit der verbleibenden organischen Schicht ist entscheidend, um neue zukünftige Kulturmassnahmen zu wählen.

Résumé: La culture sarclée intensive s'avère particulièrement intéressante sur les sols organiques bien drainés. Malheureusement, la couche tourbeuse se dégrade lentement et disparaît. L'épaisseur de la couche organique encore en place permet de choisir des techniques culturelles appropriées.

Landwirtschaftlich genutzte Mineralböden haben einen Humusgehalt (organisches Material) von 4–7%. In Moorböden ist der Anteil der organischen Masse zehnmal grösser, etwa 40–70%. Deshalb verhalten sich diese schwarzen Böden anders als die bekannten Braunerdeböden.

Moorböden sind in der Schweiz relativ selten. Sie befinden sich im westlichen Teil des bernischen Seelandes, im freiburgischen Seebezirk, im Gürbetal, im Broyetal, in der Orbe-Ebene, Linth-Ebene, im Rheintal, im aargauischen Reusstal, im luzernischen Wauwilermoos und weiteren kleineren Flächen. Sie umfassen eine Fläche von etwa 5000 ha. Von der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz (1 Mio. ha) machen sie nur ½% aus. Hoch- und Niedermoor, die als Streue- und Weideland, als Wald oder Naturschutzgebiete benutzt werden, sind dabei nicht inbegriffen.

Bis vor etwa 150 Jahren wurden die Moorböden fast ausschliesslich als Streue- und Weideland genutzt. Infolge hohen Wasserstandes konnten sie nur während der Trockenperioden im Sommer befahren oder beweidet werden. Die Siedlungen entstanden nicht im Moos sondern an den nahe gelegenen Abhängen. Hier betrieb die Bevölkerung Ackerbau, Weinbau

und Viehzucht. Die Moosgebiete wurden regelmässig überschwemmt. In den Tümpeln und Teichen war Malaria zu Hause.

Mit den Gewässerkorrekturen Mitte des 19. Jahrhunderts änderten sich die Verhältnisse in den bereits genannten Gebieten. Nach der Korrektur der grossen Flüsse, konnten die Seitenkanäle (Vorfluter) und anschliessend die Detailentwässerungen (Drainagen) gebaut werden. Dadurch gelang es allmählich, die Ebenen für die Landwirtschaft nutzbar zu machen. Dabei spielte die knappe Versorgungslage während der beiden Weltkriege eine entscheidende Rolle. Sie wirkte wie ein Motor, dieses öde, fast wertlose Land für die Nahrungsmittelproduktion zu erschliessen. In der Folge entstanden zwei ganz verschiedene landwirtschaftliche Betriebstypen nebeneinander auf diesem neuen Land:

- Staatliche oder halbstaatliche Grossbetriebe (über 100 ha Fläche) wie Bellechasse, Bouchuz, Murimoos, St. Johannsen, Tannenhof, Wauwilermoos, Witzwil u. a. m. Damit sind auch gerade ein paar Namen wichtiger schweizerischer Strafanstalten und Heime erwähnt! Sie entstanden deshalb, weil die Gemeinden die durch die Gewässerkorrekturen entstandenen Schulden nicht bezahlen konnten und das Land dem Staat oder juristischen Personen verkauften.
- Kleinbauern- und Arbeiterbauernbetriebe, die unter Mithilfe der ganzen Familie die Mühe der Moorbodenbewirtschaftung nicht scheuten.

Beide Betriebstypen spezialisierten sich auf Hackfrüchte wie Gemüse, Kartoffeln, Zuckerrüben sowie Getreide und ein wenig Vieh. Eines war den Gross- wie den Kleinbetrieben gemeinsam: Sie hatten viele Arbeitskräfte, um den arbeitsintensiven Hackfruchtbau zu betreiben. Der Privatbetrieb hatte seine eigenen Familienangehörigen und die Anstaltsbetriebe ihre Insassen, welche bereits Ende des letzten Jahrhunderts eine Arbeit im Freien verrichten durften.

Diese humusreichen Böden sind für den Acker- und Gemüsebau deshalb geeignet, weil praktisch alle Kulturpflanzen gedeihen, insbesondere auch die kleinkörnigen Gemüsesamen. Moorböden sind locker, verschlämmen nicht, speichern Feuchtigkeit und nehmen wegen ihrer dunklen Farbe die Wärme sehr stark auf. Dadurch keimen Nutzpflanzen und Unkräuter schneller als auf Mineralböden. Nach Niederschlägen trocknen sie oberflächlich rasch ab, lassen sich kurzerhand wieder bearbeiten, was im Hackfruchtbau besonders wichtig ist. Wegen ihrem hohen Anteil an organischem Material haben sie eine natürliche Fruchtbarkeit, indem die gespeicherten Nährstoffe freigesetzt werden.

Durch den Wasserentzug, die zeitweise Austrocknung und durch den Zutritt von Luftsauerstoff in den grobporigen Torf zersetzen sich die Moorböden langsam. Sie unterliegen einem biochemischen Abbau, der solange andauert, bis die organische Substanz auf unter 15% gesunken ist. Durch exakte Messungen haben wir festgestellt, dass die Oberfläche der bei uns mit Moorboden bedeckten Ebene jährlich um etwa 2 cm sinkt, während der im gleichen Gebiet liegende Mineralboden der Flussufer oder Dünen das Niveau unverändert beibehält.

Was passiert nun in Zukunft mit diesen organischen Böden?

1. Moormächtigkeit unter 40 cm. Mit der herkömmlichen Bodenbearbeitung wird bald Unterboden eingemischt; der Niveauverlust klingt ab, es entsteht ein humusreicher Mineralboden.

- Untergrund Sand oder Lehm, Entwässerung lösbar: Es entsteht ein magerer (im Dünenbereich) zur Trockenheit neigender Ackerboden, der für alle Kulturen geeignet ist.
- Untergrund Seekreide, Entwässerung lösbar aber teuer: Die längerdauernde Nutzung als Grünland ist angezeigt. Ob später daraus ein Ackerboden entsteht, wissen wir nicht.

2. Moormächtigkeit über 150 cm

- Bei ackerbaulicher Nutzung ist ein weiteres Absinken der Oberfläche unvermeidbar. Das ist solange tragbar, als die Entwässerungsprobleme gelöst und bezahlt werden können.
- Bei Grünlandnutzung als Wiese/Weide ohne jeglichen Umbruch sinkt die Oberfläche auch ab, doch nur etwa halb soviel wie bei Ackerland. Kann der Grundwasserstand künstlich konstant bei 60–80 cm unter der Grasnarbe gehalten werden, dann dürfte der Abbau noch etwas geringer sein. Ihn ganz zu stoppen, wird auch hier fast nicht möglich sein.
- Bei Naturschutzgebieten ohne landwirtschaftliche Nutzung stellt sich dasselbe Problem.

Nur ein konstant hoher Grundwasserstand mit Überflutungen (z.B. während der Schneeschmelze im Mai) könnte das Zersetzen der Moore verhindern oder sie sogar wachsen lassen.

3. Moormächtigkeit zwischen 40 und 150 cm

Wenn der Untergrund lehmig/sandig ist, die Entwässerung mit Detaildrainagen, Vorfluter und Pumpwerken möglich ist und tragbare Kosten für Bau und Unterhalt entstehen, dann ergeben sich langfristig gute landwirtschaftliche Nutzungsmöglichkeiten. Sie wurden vor 300 Jahren von den Holländern «erfunden» und sind seither durch Deutsche und Holländer verbessert worden. Im Raume Amsterdam–Bremen sind in der Folge rund 300 000 Hektaren armseliges, fast wertloses Land in fruchtbares Ackerland umgewandelt worden. Die dabei angewandten Methoden werden unter dem Thema: «Tiefpflügeversuche 1979 und weitere geplante Massnahmen in Witzwil» erörtert.

Adresse des Autors:

Hans Paul Käser
dipl. Ing. agr. ETH
Anstalten Witzwil
CH-3236 Gampelen

Influence du drainage et du type de culture sur l'exportation des éléments nutritifs majeurs (N, P et K) dans une tourbe eutrophe

Jean-Pascal Dubois, Daniel Dubois, Giorgio Jelmini

Résumé

L'influence du drainage et du type de culture sur l'exportation des éléments nutritifs majeurs (N,P,K) dans une tourbe eutrophe, ont été étudiées en vase de végétation.

Les résultats montrent que la prairie offre une meilleure protection que la culture maraîchère contre la lixiviation et, par conséquent, contre l'eutrophisation des eaux de surface et souterraines. L'effet protecteur est dû surtout au système racinaire du ray-grass qui, par sa densité et sa ramification, absorbe davantage d'éléments et recycle la plus grande partie de l'eau qui percole dans la tourbe.

Sous prairie, la tourbe peut être drainée jusqu'à une profondeur de 1,4 m sans que l'azote nitrique formé soit entraîné par l'eau. De surcroît, les quantités de nitrates ainsi disponibles, rendent superflu une fumure azotée (la première année de culture, en tout cas). Le phosphore, apporté sous forme d'engrais, n'est pratiquement pas lixivié, même en culture maraîchère. En revanche, la perte en potassium, négligeable sous prairie, est importante en culture maraîchère si l'apport en engrais dépasse la capacité d'absorption immédiate de la plante.

Zusammenfassung

Im folgenden Beitrag wird auf den Einfluss der Dränierung und der Kulturarten auf den Nährstoffhaushalt von Stickstoff, Phosphor und Kalium eingegangen. Die Untersuchung erfolgte mit eutrophem Torf in grossen Töpfen.

Die Untersuchungen ergaben, dass Wiesen einen erheblich besseren Schutz gegen Auswaschung bieten als etwa der Gemüseanbau und damit auch besser vor der Eutrophierung von Fliess- und Grundwasser schützen. Dieser Schutzeffekt ist vor allem durch den Wurzeleffekt von Raygras zu erklären; auf Grund der hohen Dichte der Wurzelhaare können grosse

Mengen von Nährstoffen und der grösste Teil des perkolierenden Wassers aufgenommen werden. Eine Wiese lässt sich auf Torfboden bis zu einer Tiefe von 1,4 m dränieren, ohne dass die gebildeten Nitrate durch das perkolierende Wasser ausgewaschen werden. Wegen dem für die Pflanzen reichlich verfügbaren Stickstoff ist, zumindest im ersten Jahr, keinesfalls eine Stickstoffdüngung erforderlich. Eingebrachter Phosphordünger wird praktisch nicht ausgewaschen, auch nicht bei Gemüsekulturen. Die Kaliumauswaschung ist im Boden von Wiesen vernachlässigbar; demgegenüber kann sich eine bedeutende Auswaschung beim Gemüseanbau ergeben, falls mit der Düngung die Absorptionskapazität der Pflanzen überschritten wird.

Introduction

L'assainissement des bas-marais et leur mise en culture rend de plus en plus difficile la conservation des sols tourbeux.

- Le drainage provoque une compaction des structures fibreuses par disparition de l'eau interstitielle. Ce tassement est d'autant plus accentué que les drains sont profondément enfouis (Frei et al. 1972, Mundel 1976, Jatton 1977).
- L'abaissement du niveau de la nappe favorise l'aération de la masse tourbeuse et crée un milieu propice à l'oxydation biologique et chimique. La minéralisation produit une libération d'éléments solubles (NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-}) et de gaz (CO_2 , N_2 , N_2O). L'aération modifie également le degré d'oxydation de certains éléments; le fer, en particulier, passe de l'état ferreux (Fe^{II}) soluble à l'état ferrique (Fe^{III}) insoluble. Cette oxydation est à l'origine du colmatage des drains (Kuntze 1978).
- Les sols sans couverture végétale sont soumis à l'érosion éolienne.

La compaction des structures fibreuses et la minéralisation sont des problèmes discutés en

détail par Eggelsmann (1978). La minéralisation de la tourbe en relation avec le cycle de l'azote a été abordée par plusieurs auteurs (Scheffer 1976, Beck 1979, Levanon et al. 1979, Kuntze 1980, Waydbrink 1980).

Selon ces chercheurs, l'état d'oxydation de la tourbe, l'humidité, la température et le pH sont les paramètres qui jouent le rôle principal dans le processus de minéralisation.

Afin de limiter au maximum les pertes importantes de tourbe dans les basmarais drainés et cultivés, les solutions suivantes ont été proposées :

- culture sur couverture sableuse de la tourbe (Frei et al. 1972, Hagemann 1978, Kuntze et al. 1981);
- mélange de sable et de tourbe par labour profond à condition qu'une couche de sable à granulométrie adéquate soit disponible à une profondeur de 1 à 2 mètres sous la tourbe (Kuntze et Wetter 1980);
- mise en culture d'une prairie avec drainage modéré.

Nos recherches ont trait à cette dernière solution. Elles ont pour but d'évaluer l'effet protecteur d'une prairie et d'un drainage modéré sur la perte en éléments de la tourbe.

Nous avons abordé ce problème par le biais d'une étude globale de la migration des éléments dans des colonnes de tourbe eutrophe, soumise à deux types de culture (fourragère et maraîchère) et trois conditions de drainage (fig. 1b). Nous présentons ici les résultats de deux essais distincts relatifs à :

- l'influence de la profondeur de drainage sur l'exportation des éléments par l'eau et la plante dans une tourbe cultivée en prairie;
- l'influence comparative de la prairie et de la culture maraîchère suivie du sol nu sur l'exportation des éléments par l'eau et la plante dans une tourbe drainée à une profondeur de 90 cm.

La discussion est limitée aux éléments nutritifs majeurs (azote, phosphore, potassium).

Matériel et méthodes

Le dispositif expérimental présenté en fig. 1a, est décrit en détail par Dubois et al. (1982). Nous nous contenterons d'en donner ici les caractéristiques principales.

Le premier essai est composé de 12 tubes simulant une prairie soumise à trois conditions de

drainage (nappe à 30, 60 et 90 cm de la surface) et de trois tubes supplémentaires destinés à compléter l'étude de la dynamique de l'azote nitrique pour des épaisseurs de tourbe drainée plus élevées (jusqu'à 190 cm). Le deuxième essai comprend huit tubes simulant deux types de cultures (prairie et culture maraîchère suivie du sol nu) soumises à une même situation de drainage (nappe à 90 cm). L'ensemble des dispositifs a été installé dans la halle de végétation de la Station Fédérale de Recherches Agronomiques de Changins.

Les tourbes utilisées proviennent des marais de Porsel (FR) et de la haute Plaine de l'Orbe (Orny VD). Ce sont des tourbes sapristes, minéralisées, pauvres en fibres et saturées en calcium. Leur pH varie entre 5.9 et 6.3 et leur rapport C/N est de l'ordre de 15 (2,1–2,9% d'azote total). En raison de la pauvreté de la tourbe en éléments extractibles à l'eau, une fu-

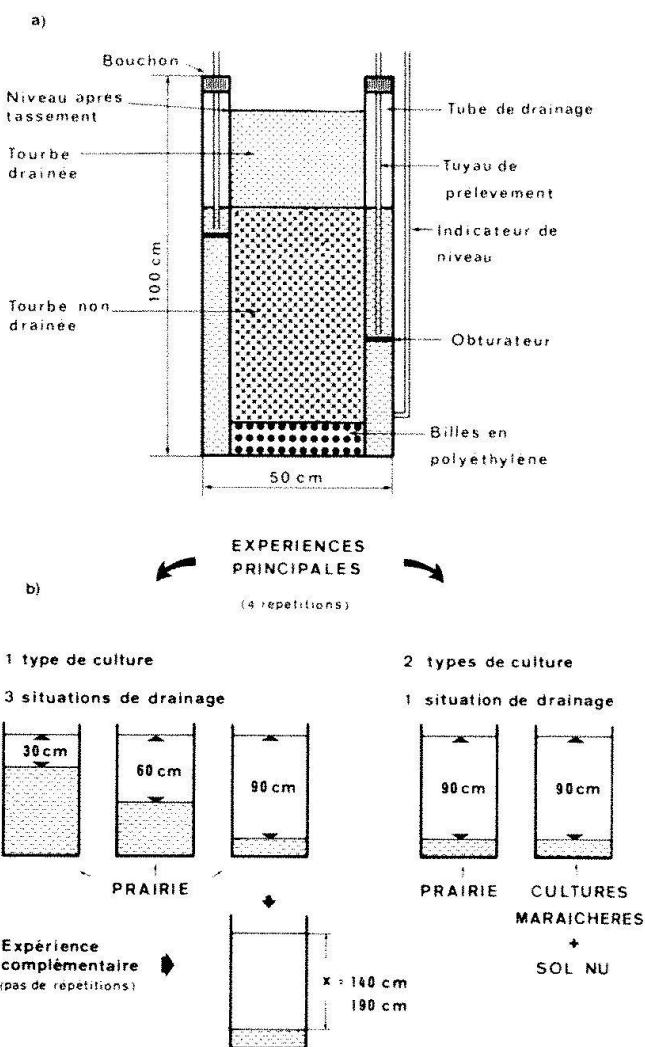


Figure 1. Dispositif expérimental.

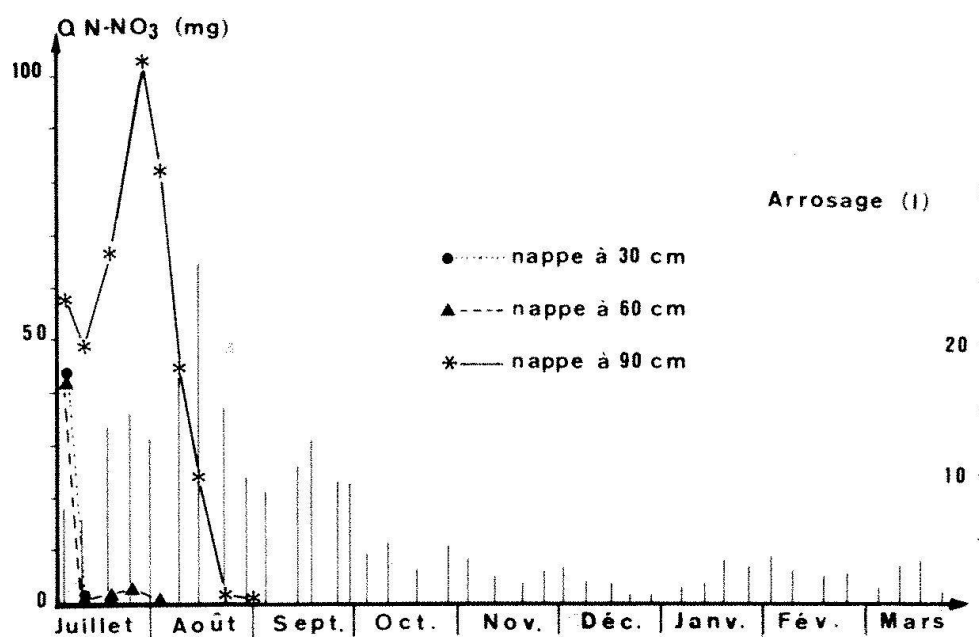


Figure 2. Evolution des exportations d'azote nitrique par l'eau de drainage sous prairie (Expérience principale).

mure complémentaire, adaptée à chaque cas, a été incorporée à la couche supérieure du sol.

La couverture végétale se compose d'un mélange trèfle – ray-grass pour la prairie et d'une combinaison épinard – salade pour la culture maraîchère. L'eau d'arrosage (deminéralisée) est ajoutée de façon à permettre le maintien des niveaux de nappes; pour un essai donné, une même quantité est ajoutée à chaque tube. Les eaux de drainage sont recueillies et analysées chaque semaine. Les méthodes d'analyse du sol, de la plante et de l'eau sont décrites en détail par Jelmini et al. (1981).

Influence du drainage

Comportement de l'azote nitrique

Au début, la quantité d'azote nitrique entraînée par l'eau de drainage varie dans le même sens que les volumens d'eau d'arrosage. Cette évolution est bien visible dans le cas de la nappe à 90 cm, perceptible à 60 cm et invisible à 30 cm (fig. 2). Progressivement, d'une situation de drainage à l'autre, les nitrates disparaissent jusqu'à la fin de l'expérience. En augmentant l'épaisseur de tourbe drainée, le même phénomène se reproduit jusqu'à 140 cm (fig. 3). Au-delà, la charge nitrique de l'eau de drainage passe par un minimum puis se maintient, jusqu'à la fin de l'expérience (6 mois), à un niveau varia-

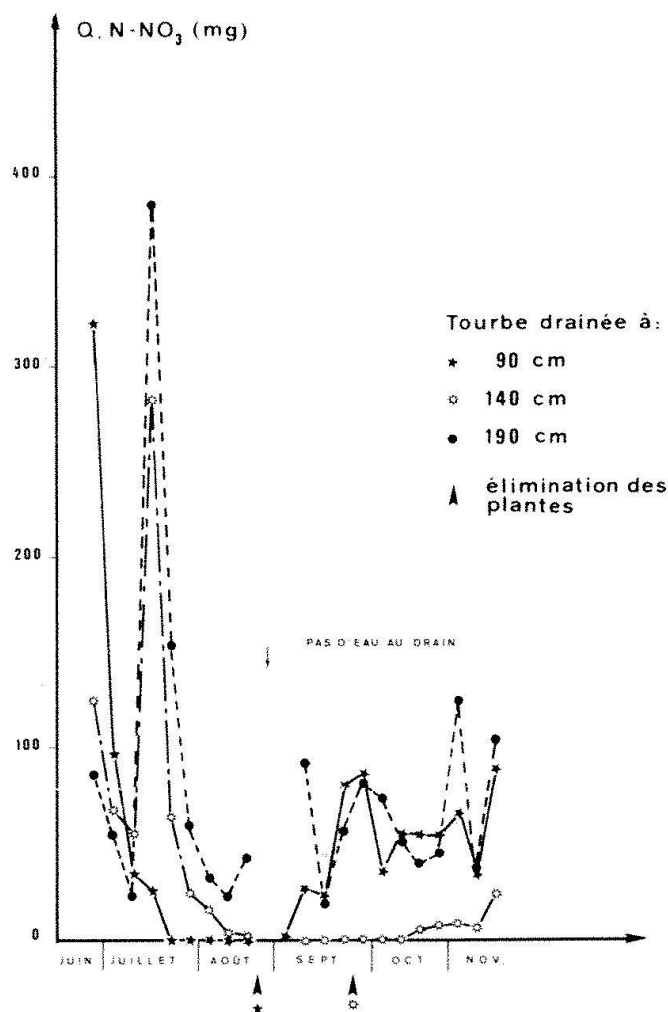


Figure 3. Evolution des exportations d'azote nitrique par l'eau de drainage sous prairie (Expérience complémentaire).

ble selon la saison et l'état physiologique des plantes.

Nos conditions expérimentales ne permettent pas d'expliquer en détail le mécanisme de cette disparition des nitrates. En revanche, notre travail apporte la preuve que la couverture végétale choisie (surtout le ray-grass) est étroitement impliquée dans le processus. Nous avons observé que la disparition de l'azote nitrique dans l'eau coïncide avec une extension latérale du réseau racinaire qui, selon Kutschera (1960), se produit lorsque les racines principales sont en contact avec une zone très humide (ici la nappe). Ensuite, la forte teneur en azote total de la première récolte, soit environ le double de celle de la même plante sur sol minéral, indique que les nitrates formés dans la tourbe sont absorbés massivement par le réseau racinaire des plantes qui occuperait à ce moment-là tout le volume de la tourbe drainée. Dans le cas du drainage à 190 cm, les racines ne doivent pas coloniser toute la masse de tourbe drainée de sorte que la production de nitrates dépasse la consommation par les plantes. Le surplus est donc lixivé.

Comportement du phosphore et du potassium

Le comportement du phosphore n'est pas discuté pour deux raisons: d'une part, nous avons constaté, dans le travail préliminaire (Jelmini et al. 1981), que les concentrations d'ortho-phosphate dans l'eau de drainage étaient trop faibles ($< 0,05$ mg/l) et d'autre part, des difficultés analytiques ont rendu inutilisables une partie des résultats du phosphore total. Signalons, simplement, que les quantités lixiviées ne dépassaient pas 1 mg P par semaine dès le mois d'août. La corrélation existant entre le phosphore total et le carbone organique indique que le phosphore lixivié provient de la matière organique hydrosoluble.

La charge en potassium de l'eau de drainage à 60 et 90 cm est insignifiante et disparaît très rapidement. A 30 cm, l'évolution irrégulière du potassium tend à montrer que la lixiviation provient de l'engrais fourni à la plante. Cette hypothèse est confirmée par la faible quantité de potassium extractible à l'eau dans la tourbe de départ. Cet élément est donc rapidement immobilisé dans les 30 premiers centimètres de sol, zone principale de l'extension racinaire.

Exportation de l'azote et du potassium (fig. 4)

Au cours de la période d'essai, l'azote et le potassium ont été fortement recyclés par la végétation (2–8 % de la réserve totale de la tourbe), mais très faiblement lixiviés ($< 0,1$ %). La quantité d'azote absorbée par les plantes est d'autant plus élevée que le drainage est profond. La fraction entraînée par l'eau de drainage (3 % de la perte totale) se présente sous forme nitrique et organique; la forme ammoniacale est négligeable et son faible taux d'exportation montre bien qu'elle est rapidement nitrifiée, absorbée par les plantes et les microorganismes ou fixée sur le complexe absorbant. L'exportation d'azote organique diminue avec la profondeur du drainage alors que l'inverse se produit pour l'azote nitrique. Comparée à la réserve azotée de la tourbe, la perte par drainage reste très faible.

L'exportation de potassium par l'eau de drainage est insignifiante; les quantités absorbées par les plantes sont pratiquement les mêmes dans les 3 situations de drainage et représentent 75 % du potassium fourni sous forme d'engrais. Ceci s'explique par la pauvreté en K assimilable de la tourbe utilisée. Ainsi, sous prairie la perte en potassium n'est pas liée à la profondeur du drainage mais plutôt à la quantité d'engrais ajoutée.

Influence de la couverture végétale

Le régime des exportations par les plantes et par l'eau de drainage est différent dans les deux

| Éléments | | N-NO ₃ | N-NH ₄ | N-tot | K |
|---------------------------------|---------------|-------------------|-------------------|---------|---------|
| Quantités en début d'expérience | Tourbe (mg) | | | 648848 | 126957 |
| | Fumure (mg) | | | 4375 | 11647 |
| EXPORTATION | SITUATION 1 | Plantes (mg) | | 10434 | 9777 |
| | | (%) | | 1,6 | 6,9 |
| | Nappe à 30 cm | Eau de (mg) | 206 | 356 | 49 |
| | | drainage (%) | | $< 0,1$ | $< 0,1$ |
| | SITUATION 2 | Plantes (mg) | | 11897 | 10388 |
| | | (%) | | 1,8 | 7,4 |
| | Nappe à 60 cm | Eau de (mg) | 183 | 349 | 15 |
| | | drainage (%) | | $< 0,1$ | $< 0,1$ |
| | SITUATION 3 | Plantes (mg) | | 13034 | 10646 |
| | | (%) | | 2,0 | 7,6 |
| | Nappe à 90 cm | Eau de (mg) | 456 | 634 | 6 |
| | | drainage (%) | | $< 0,1$ | $< 0,1$ |

Figure 4. Exportation de l'azote et du potassium sous prairie en fonction de la profondeur du drainage.

types de culture (fig. 5). Sous prairie, les exportations par les plantes sont un peu plus élevées mais la lixiviation ne représente qu'une petite partie de la perte en éléments par la tourbe (1 à 2%). En revanche, sous culture maraîchère, les plantes absorbent moins d'éléments mais l'appauvrissement de la tourbe par lixiviation est beaucoup plus important: environ 15% pour le phosphore et le potassium, 43% pour l'azote. Dans ce dernier cas, il faut noter que la proportion d'azote organique lixivié est du même ordre de grandeur que celles des deux autres éléments. La différence est due aux nitrates dont la lixiviation est 1000 fois plus élevée que sous prairie.

Les exportations par l'eau sous ces deux couvertures végétales différentes varient aussi selon la saison. La majeure partie de la lixiviation se produit en automne sous prairie mais en été sous culture maraîchère. De même, bien que la salade absorbe 4 à 6 fois moins d'éléments que l'épinard, la lixiviation durant sa période de culture est 3 à 5 fois plus importante.

Comparée à la réserve totale de la tourbe, les exportations sont faibles pour l'azote et le phosphore (1 à 2%), plus élevées pour le potassium (environ 10%). Les résultats de la fig. 5 montrent également qu'une partie des éléments exportés provient de la minéralisation de la tourbe. Dans le cas de l'azote, nous ne tenons pas compte de la quantité qui pourrait être fixée sous forme symbiotique ou non. Toutefois, avec la réserve dont dispose la tourbe (2 à 3%) et les bonnes conditions de minéralisation qui existent dans notre dispositif expérimental, il est hors de doute que l'apport d'azote par fixation doit être négligeable sinon nul (les racines du trèfle ne contenaient, d'ailleurs, que quelques rares nodules, non colorés). La différence d'absorption des éléments par les plantes est liée au type de culture. La combinaison trèfle et ray-grass dispose d'un nombre plus élevé de plantes par unité de surface cultivée (8 trèfles + 8 ray-grass contre 5 épinards et 3 salades). De plus, elle prélève ses éléments plus longtemps et plus régulièrement (pas de sol nu

| P E R I O D E | | 3 juin-8 juillet | | 9 juillet-5 août | | 6 août - 2 sept. | | 3 sept. - 9 déc. | | 3 juin - 9 déc. | |
|----------------|----------------------|------------------|---------|------------------|---------|------------------|---------|-------------------|---------|-----------------------|---------|
| C U L T U R E | | EPINARD | PRAIRIE | SOL NU ETE | PRAIRIE | SALADE | PRAIRIE | SOL NU AUTOMNE | PRAIRIE | CULTURE MARAICHERE | PRAIRIE |
| POTASSIUM (mg) | Exportation-plantes | 12235 | 6727 | - | 4794 | 2037 | 4900 | - | 4159 | 14272 | 20580 |
| | Lixiviation | 222 | 15 | 764 | 10 | 1064 | 33 | 830 | 229 | 2880 | 287 |
| | Fumure | 4947 | 12232 | - | - | 4314 | - | - | - | 9261 | 12232 |
| | Fourni par la tourbe | 7510 | - | 764 | - | - | 4247 | - | 4388 | 8274 | 8635 |
| | Fourni à la tourbe | - | 5490 | - | 686 | 1213 | - | 383 | - | 383 | - |
| PHOSPHORE (mg) | Exportation-plantes | 706 | 585 | - | 423 | 178 | 517 | - | 536 | 884 | 2061 |
| | Lixiviation | 13 | 3 | 29 | 2 | 62 | 2 | 67 | 17 | 171 | 24 |
| | Fumure | 1045 | 1071 | - | - | 787 | - | - | - | 1832 | 1071 |
| | Fourni par la tourbe | - | - | - | - | - | 461 | - | 553 | - | 1014 |
| | Fourni à la tourbe | 326 | 483 | 297 | 58 | 844 | - | 777 | - | 777 | - |
| AZOTE (mg) | Exportation-plantes | 5749 | 4435 | - | 2434 | 1157 | 2627 | - | 3515 | 6906 | 13011 |
| | Lixiviation | N org. | 58 | 11 | 188 | 12 | 399 | 18 | 406 | 103 | 1051 |
| | | NH ₄ | 1 | 527 | - | 14 | 23 | 726 | - | 12 | 60 |
| | | NO ₃ | 468 | 3 | 515 | - | 1297 | - | 1650 | - | 3930 |
| | Fumure | NH ₄ | 1206 | 2350 | - | - | 800 | 2309 | - | - | 2006 |
| | | NO ₃ | 1144 | - | - | - | 1509 | - | - | - | 2653 |
| | Fourni par la tourbe | 3926 | 4449 | 726 | 2446 | 604 | 2645 | 2072 | 3619 | 7328 | 13159 |
| | Fourni à la tourbe | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Figure 5. Exportation comparée de l'azote, du phosphore et du potassium sous prairie et sous culture maraîchère.

durant la période de végétation). Son réseau racinaire est aussi plus dense et plus ramifié que celui des légumes, ce qui lui permet d'absorber davantage d'éléments mais surtout davantage d'eau, de sorte que la lixiviation est freinée à sa base. La fig. 6 illustre bien ce phénomène. On constate que les quantités de phosphore et de potassium, lixiviées au cours des mêmes périodes dans les deux types de culture, varient de la même façon que la proportion de l'eau d'arrosage non retenue par le système tourbe-plante. L'effet de la couverture herbacée serait ainsi essentiellement dû à la rétention d'eau. En revanche, nos conditions expérimentales ne nous permettent pas de mettre en évidence un éventuel impact de la plante, par l'action de ses racines, sur la minéralisation.

Conclusions

L'abaissement du niveau de la nappe dans une tourbe eutrophe cultivée en prairie favorise l'exportation des éléments nutritifs (N, P, K). Cependant, la part exportée par l'eau seule diminue grâce à l'effet régulateur de la couverture végétale. L'exemple de l'azote nitrique illustre parfaitement cet effet: dès que la prairie est suffisamment développée, les nitrates ne sont plus lixiviés et cette protection se poursuit jusqu'à 1,4 m de profondeur de drainage. Le rôle actif des plantes est démontré puisque la suppression de la couverture végétale entraîne une reprise de la lixiviation. D'autres résultats (Dubois et al. 1982) montrent également que les nitrates formés dans la tourbe sont en quantités suffisantes pour assurer un excellent rendement à la culture fourragère; une fumure azotée est donc superflue, du moins pendant la première année. Le mélange de trèfle et de ray-grass offre une meilleure protection contre la lixiviation des éléments nutritifs (N, P, K) que la culture maraîchère. Il permet de disposer d'un nombre plus élevé de plantes par unité de surface qui, de surcroît, prélèvent régulièrement les éléments au cours de la saison. La prairie possède également un réseau racinaire plus ramifié et plus dense lui permettant d'absorber davantage d'éléments et surtout d'eau; elle contribue ainsi plus efficacement à freiner l'appauvrissement des couches profondes par lixiviation.

En résumé, bien que les résultats de nos essais en vase de végétation ne puissent être extrapolés sans précaution, ils démontrent que la mise en prairie d'une tourbe eutrophe drainée offre une meilleure protection que la culture maraîchère contre la perte en éléments par l'eau de drainage et, par conséquent, contre l'eutrophisation des eaux de surface ou souterraines.

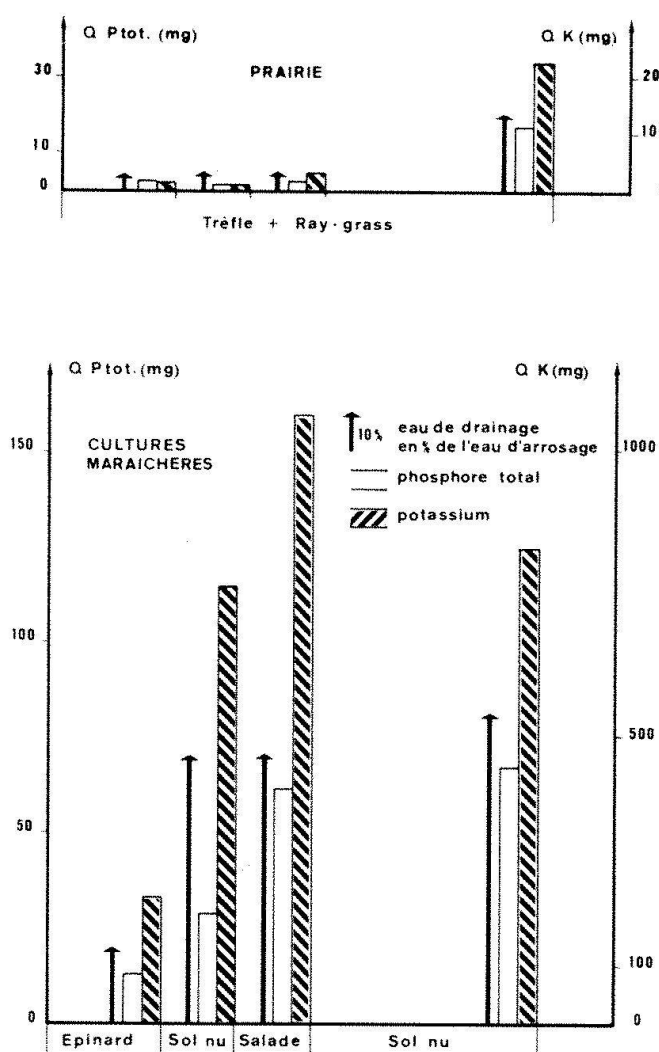


Figure 6. Lixiviation comparée du phosphore et du potassium dans les deux types de cultures.

Bibliographie

- Beck, Th. 1979: Verlauf und Steuerung der Nitrifikation in Bodenmodelleversuchen. Landwirtschaft Forschung, Vol. 33, Nr. 1, 85-94.
- Dubois, D., Jelmini, G., Dubois, J.-P. 1982: Influence du drainage sur la migration des éléments dans une tourbe eutrophe cultivée en prairie. Laboratoire de Pédologie PED9, EPFL, Lausanne.
- Eggelsmann, R. 1978: Oxidativer Torfverzehr in Niedermoor in Abhängigkeit vom Klima und mögliche Schutzmassnahmen. Telma, Vol. 7, 75-81.

- Frei, E., Peyer, K., Jäggi, F. 1972: Verbesserungsmöglichkeiten der Moorböden des Berner Seelandes. Mitteilungen für die Schweizerische Landwirtschaft, Vol. 20, 197–210.
- Hagemann, P.-C. 1978: Bodentechnologische und moorkundliche Faktoren zur nachhaltigen Entwicklung von Sanddeck- und Sandmischkulturen. Diss. Göttingen.
- Jaton, J.-F. 1977: Etude de quelques propriétés des sols tourbeux et leur influence sur le drainage. Institut du Génie Rural, EPFL, IGR no 133.
- Jelmini, G., Dubois, J.-P., Dubois, D. 1981: Etude préliminaire de l'influence du drainage sur la migration des éléments dans une tourbe eutrophe. Laboratoire de Pédologie PED7, EPFL, Lausanne.
- Kuntze, H. 1978: Verockerung. Diagnose und Therapie. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- Kuntze, H. 1980: Belastung und Schutz von Gewässern durch die Landbewirtschaftung. Die Bodenkultur, Vol. 31, 12–25.
- Kuntze, H., Vetter, H. 1980: Bewirtschaftung und Düngung von Sandmischkulturen. Landwirtschaftsblatt Weser – Ems, Nr. 9–27.
- Kuntze, H., Niemann, H., Röschmann, G., Schwertfeger, G. 1981: Bodenkunde. 2. Aufl., Verlag Ulmer, Stuttgart.
- Kutschera, L. 1960: Wurzelatlas Mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. DLG Verlag – GmbH, Frankfurt am Main.
- Levanon, D., Denis, Y., Okon, Y., Dovrat, A. 1979: Alfalfa Roots and Nitrogen Transformations in peat. Soil Biology and Biochemistry, Vol. 11, 343–347.
- Mundel, G. 1976: Untersuchung zur Torfmineralisation in Niedermooren. Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde, Berlin, Vol. 20, 669–679.
- Schefer, B. 1976: Zur Frage der Stickstoffumsetzung in Niedermoorböden. Landwirtschaft Forschung, Vol. 33, 20–28.
- Waydbrink, W. V. d. 1980: Die Effektivität der Stickstoffdüngung auf dem Niedermoorgrasland. Feldwirtschaft, Vol. 5, 22–223.

Adresses des auteurs:

Jean-Pascal Dubois
Laboratoire de pédologie, EPLF
CH–1024 Ecublens

Daniel Dubois
Laboratoire de pédologie, EPLF
CH–1024 Ecublens

Giorgio Jelmini
Sous-station fédérale de
recherches agronomiques
CH–6593 Cadenazzo TI

Spezielle Probleme bei der Düngung und Bewirtschaftung organischer Böden

Albrecht Siegenthaler

Zusammenfassung

Bei der Düngung und Bewirtschaftung organischer Böden (in der Praxis mehr als 20% Humus) stehen unter anderem die Versorgung der Böden mit Pflanzennährstoffen, die Ernährung der Kulturpflanzen, sowie der Einfluss der Bodenreaktion zur Diskussion. Anhand einer Anzahl untersuchter organischer Böden aus dem Tätigkeitsgebiet unserer Forschungsanstalt und einer ausgewählten Untersuchung, wird das Problem der Versorgung mit Pflanzennährstoffen dargestellt. In einem abgeschlossenen Gebiet mit teils organischen Böden wurde die absolute Höhe der ausgewaschenen Nährelemente gezeigt. Neben Stickstoff (Nitrat-N) sind dabei die hohen Mengen an Kalzium und Magnesium auffallend. In der Arbeit werden die aktuellen Düngungsprobleme bei landwirtschaftlich genutzten Böden sowie Verbesserungsvorschläge zur Nutzung dargelegt.

Résumé

La fertilisation et la culture des sols organiques – dont la teneur en humus dépasse pratiquement 20% – soulèvent, entre autres, des problèmes de fertilisation des cultures, comme aussi de l'influence de la réaction des sols.

A l'exemple d'une série de sols organiques prélevés dans le rayon d'activité de notre station de recherches ainsi que d'une analyse sélectionnée, le problème de l'approvisionnement des cultures en éléments fertilisants est mis en lumière. Les valeurs absolues des quantités d'éléments fertilisants lessivés pour une région délimitée donnée, comportant partiellement des sols organiques, sont rapportés. A côté de l'azote (azote nitrique), on peut signaler les quantités importantes de calcium et de magnésium qui sont lessivées. Les problèmes actuels de fertilisation pour des sols exploités à des fins agrico-

les sont présentés et des propositions d'amélioration des techniques culturales sont proposées.

Einleitung

Böden, deren Humusgehalt 20% übersteigt, werden in der landwirtschaftlichen Praxis als Humusböden oder organische Böden bezeichnet (vgl. Düngungsrichtlinien für den Acker- und Futterbau). Nach Scheffer (1960) macht in ausgesprochenen Moorbildungen der Humusgehalt – auf den trockenen Boden bezogen – definitionsgemäss wenigstens 30, im Anmoor 30 bis wenigstens 15 Gew.-% aus.

Ähnlich werden organische Böden im englischen Sprachgebiet definiert. Buckmann und Brady (1965) sprechen Böden mit Gehalten über 20% organischer Substanz als organische Böden an. Im Gegensatz dazu geben Thompson und Troeh (1978) als grundsätzliches Kriterium das Dominieren der organischen Substanz über die übrigen Bodeneigenschaften an. Die beiden Autoren sprechen von «organischen Böden», wenn der organische C-Gehalt 12% bei Fehlen von Ton übersteigt. Für jedes % mehr Ton wird der Mindest-C-Gehalt um $\frac{1}{10}$ % erhöht.

Vielfach wird zwischen organischer Substanz und Humus unterschieden. Scheffer und Schachtschabel (1970) bezeichnen als Humus alle abgestorbenen organischen Stoffe, die sich in und auf dem Boden befinden und einem stetigen Ab-, Um- und Aufbauprozess unterliegen oder unterlegen haben.

In den folgenden Ausführungen werden wir uns von der Praxis gesehen, an die erste Definition halten.

Bei der Düngung und Bewirtschaftung organischer Böden ist das Ziel aller pflanzenbaulichen Massnahmen, hohe Pflanzenerträge von einwandfreier Qualität zu erreichen unter möglichst geringen Nährstoffverlusten und der Erhaltung und Förderung der Bodenfruchtbarkeit.

Demgegenüber stehen folgende Probleme von Bedeutung im Vordergrund:

- Versorgung der organischen Böden mit Pflanzennährstoffen
- Ernährung der Kulturpflanzen, Einfluss der Bodenreaktion
- Humusabbau und seine Folgen
- geringe Tragfähigkeit des Bodens
- Frostgefährdung

Als Folge dieser Probleme resultiert eine Ertragsunsicherheit, die agronomisch von wesentlicher Bedeutung ist. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die *landwirtschaftlich genutzten Flächen* im Einzugsgebiet unserer Forschungsanstalt und auf die beiden ersten Problemkreise. Wir erwähnen die restlichen nur dort, wo dies unbedingt erforderlich ist.

Untersuchte organische Böden

An unserer Anstalt wurden in den Jahren 1976 bis 1980 insgesamt etwas über 43 000 Bodenproben aus Praxisbetrieben auf pH-Wert und auf die Nährstoffbedürftigkeit untersucht. Die Probenahme erfolgte in der Regel durch den Betriebsleiter. Bei Ackerland und Kunstwiese wurden aus der Bodenschicht 0–20 und bei Naturwiesen aus 0–10 cm Proben gezogen. Diese Proben wurden bei 40 °C luftgetrocknet. Die Bestimmung des pH-Wertes erfolgte in Aufschwemmung des Bodens mit destilliertem Wasser (1:2,5). Phosphat und Kali wurden mit den an den Forschungsanstalten üblichen Methoden nach Dircks und Scheffer modifiziert gemessen, das heisst, die Extraktion erfolgte mit CO₂-gesättigtem Wasser bei einem Bodenzu-Wasser-Verhältnis von 1:2,5. Nach dem Filtrieren wurde eine mögliche Störung des Phosphates durch Nitrit mit Sulfaminsäure unterdrückt und der blaue Phosphormolybdänkomplex mit Ascorbinsäure entwickelt und anschliessend fotometrisch gemessen. Die Bestimmung des Magnesiums erfolgte nach der Methode von Schachtschabel: Das austauschbare Mg wurde mit Kalziumchlorid ausgeschüttelt und mit dem Atomabsorptionsgerät gemessen. Von der eingangs erwähnten grossen Anzahl Böden wurden mittels Handtaxierung 265 als Humusböden (Gehalt an organischer Substanz > 20%) festgestellt. Nach Abzug von Böden aus Obst-, Wein- und Gartenbau und denjenigen aus Forstgärten und Versuchen verblieben

146 Böden, deren Gehalte in der Tabelle 1 dargestellt sind. Auffallend ist, dass im stark sauren Bereich der Anteil untersuchter Böden gering ist. Der Hauptanteil der Böden unter Naturwiesen ist schwach sauer bis neutral. Kunstwiesenböden und diejenigen des offenen Ackerlandes liegen im schwach sauren bzw. sauren Bereich. Eine mögliche Erklärung für den Umstand, dass hier mehr Böden zwischen pH-Werten 5,3–5,8 liegen, könnte sich aus der erhöhten Auswaschung und dem höheren Pflanzenentzug von Natrium, Kalium und Kalzium-Ionen ergeben. Rund die Hälfte der obersten Schicht aller Böden war frei von Kalziumcarbonat. Bei der Phosphatversorgung (P-Test) fällt der hohe Anteil an phosphatarmen und mässig mit Phosphat versorgten Böden auf. Für das offene Ackerland übersteigt dieser Anteil 80%. Ein Grossteil der Böden ist genügend mit Kalium versorgt oder zeigt Vorräte. 11–24% der Böden sind mit Kalium angereichert.

Die Gegenüberstellung der Phosphat- und Kaliversorgung der gleichen Böden (Abbildung 1) zeigt, dass schliesslich nur ein sehr kleiner Teil

Tabelle 1: Ergebnisse der Bodenuntersuchung von Humusböden (0–20 cm) aus den Jahren 1976–80 bezüglich pH-Wert, sowie Phosphat- und Kaliversorgung unterteilt nach verschiedenen Kulturen (Anteil in %)

| | Kulturen | | |
|---------------------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------------|
| | Naturwiesen < 1000 m. ü. M. | Kunstwiesen | Offenes Ackerland |
| Anzahl Proben | 44 | 17 | 85 |
| <i>Bodenreaktion (pH in H₂O)</i> | | | |
| stark sauer (unter 5,3) | 4,5 | 0 | 2,4 |
| sauer (5,3 – 5,8) | 9,1 | 29,4 | 37,6 |
| schwach sauer (5,9 – 6,7) | 54,6 | 58,8 | 41,2 |
| neutral (6,8 – 7,2) | 22,7 | 5,9 | 15,2 |
| schw. alkalisch (7,3 – 7,6) | 6,8 | 5,9 | 3,6 |
| alkalisch (über 7,6) | 2,3 | 0 | 0 |
| <i>Kalk (CaCO₃)</i> | | | |
| kalkfrei | 52,3 | 58,8 | 50,6 |
| Spuren | 2,3 | 23,5 | 17,6 |
| > 0,1 % | 45,4 | 17,7 | 31,8 |
| <i>Phosphatversorgung (P-Test)</i> | | | |
| arm (0 – 7,5) | 43,2 | 17,6 | 49,3 |
| mässig (8 – 15,5) | 22,7 | 41,2 | 34,1 |
| genügend (16 – 24) | 20,5 | 17,6 | 7,1 |
| Vorrat (24,5 – 48) | 13,6 | 23,6 | 7,1 |
| angereichert (> 48,5) | 0 | 0 | 2,4 |
| <i>Kaliversorgung (K-Test)</i> | | | |
| arm (0 – 0,9) | 2,3 | 11,8 | 2,4 |
| mässig (1 – 1,9) | 22,7 | 17,6 | 18,8 |
| genügend (2 – 4) | 45,5 | 17,6 | 30,6 |
| Vorrat (4,1 – 8) | 18,1 | 29,4 | 27,0 |
| angereichert (> 8) | 11,4 | 23,6 | 21,2 |

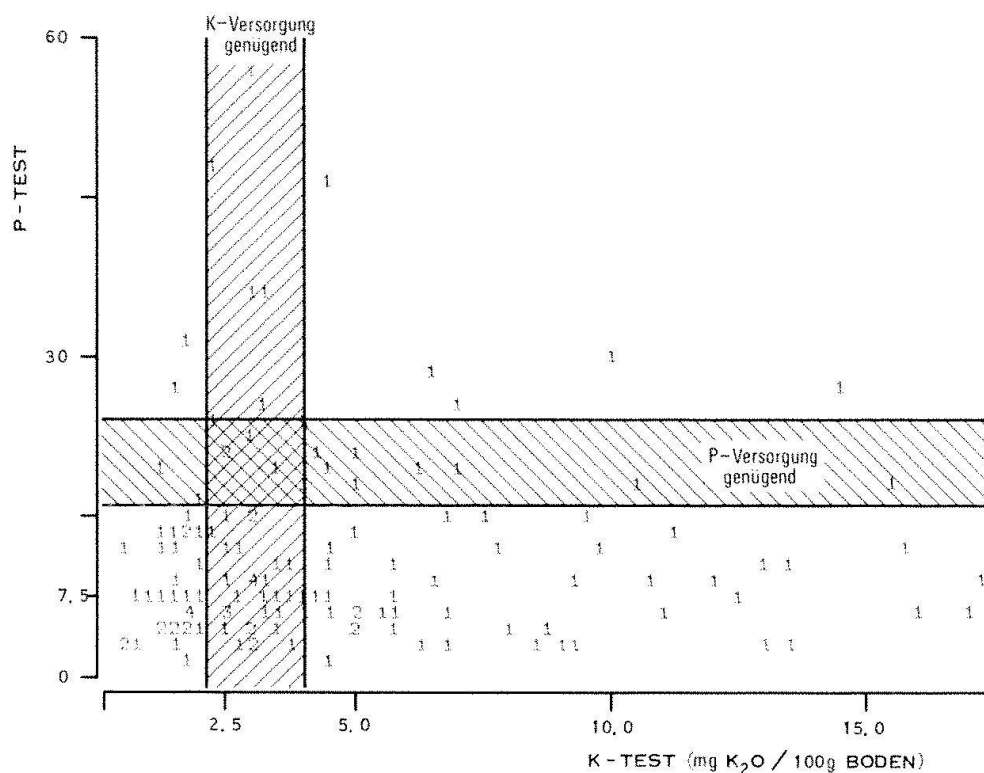


Abbildung 1. Phosphat- und Kaliversorgung organischer Böden (Forschungsanstalt Liebefeld 1976–80, N=140)

(5%) aller Böden bezüglich P und K genügend versorgt ist. Die Phosphatunterversorgung muss durch eine verstärkte P-Düngung korrigiert werden, da sonst der Landwirt das Risiko von Ertragseinbußen bzw. Phosphatmangelsituationen eingeht. Hingegen kann die Kalidüngung auf vielen Parzellen stark reduziert oder sogar weggelassen werden. Es ist allgemein bekannt, dass Moorböden zwar ein schwaches K-Nachlieferungsvermögen haben (Finck, 69). Andererseits können sich extrem hohe K-Gehalte in Futterpflanzen, bedingt durch Luxuskonsum, für Tiere nachteilig auswirken.

Die Untersuchung von 78 Parzellen auf Magnesium ergab die folgenden Werte:

| | |
|-------------------|------------------------------------|
| Naturwiesen | 132–228 ppm Mg (\bar{x} 158) |
| Kunstwiesen | 113–241 ppm Mg (\bar{x} 179) |
| Offenes Ackerland | 115–231 ppm Mg (\bar{x} 153) |

Die Böden sind ausreichend mit Magnesium versorgt. Die Beziehung zwischen der Magnesium- und Kaliversorgung (Abbildung 2) lässt die gute Versorgung mit Magnesium ebenfalls erkennen. Auch hier könnten sich die zum Teil extrem hohen Kaligehalte durch eine Senkung der Aufnahme des Mg bedingt durch Antagonismus, nachteilig auswirken.

Bodenuntersuchung und Nährstoffauswaschung in einem abgeschlossenen Gebiet (natürliches Lysimeter) mit teils organischen Böden

Das Lüscherzmoos, im bernischen Seeland gelegen, wird im Nordwesten vom Bielersee durch Schaltenrain und Feiberg getrennt. Im Nordosten wird es durch den Hagneckkanal (Aare), im Südosten durch den Höhenzug des Grosswaldes und im Südwesten durch eine Wasserscheide der Drainagen begrenzt. Das Gebiet wurde in einer früheren Arbeit durch Geologen untersucht, ist hydrologisch geschlossen und wird einzig vom Moosbach entwässert, welcher durch einen Stollen in den Bielersee führt. Es kann als «grosses Lysimeter» angesehen werden.

Die Gesamtfläche des Gebietes beträgt 694 Hektaren, wobei zirka 33% bewaldet und 6% unproduktive Flächen sind. Die landwirtschaftliche Kulturfäche wird im Nordostteil intensiv acker- und futterbaulich genutzt, während im Südwestteil vorwiegend intensiver Gemüsebau betrieben wird. Charakteristisch für die Betriebe sind der Besitz und die Bewirtschaftung eines Teils mit vorwiegend mineralischen Böden einerseits und organischen Böden andererseits. In der Talsohle, welche knapp die Hälfte ausmacht, herrschen die grundwasserbeeinflussten organischen Nassböden vor. Die Un-

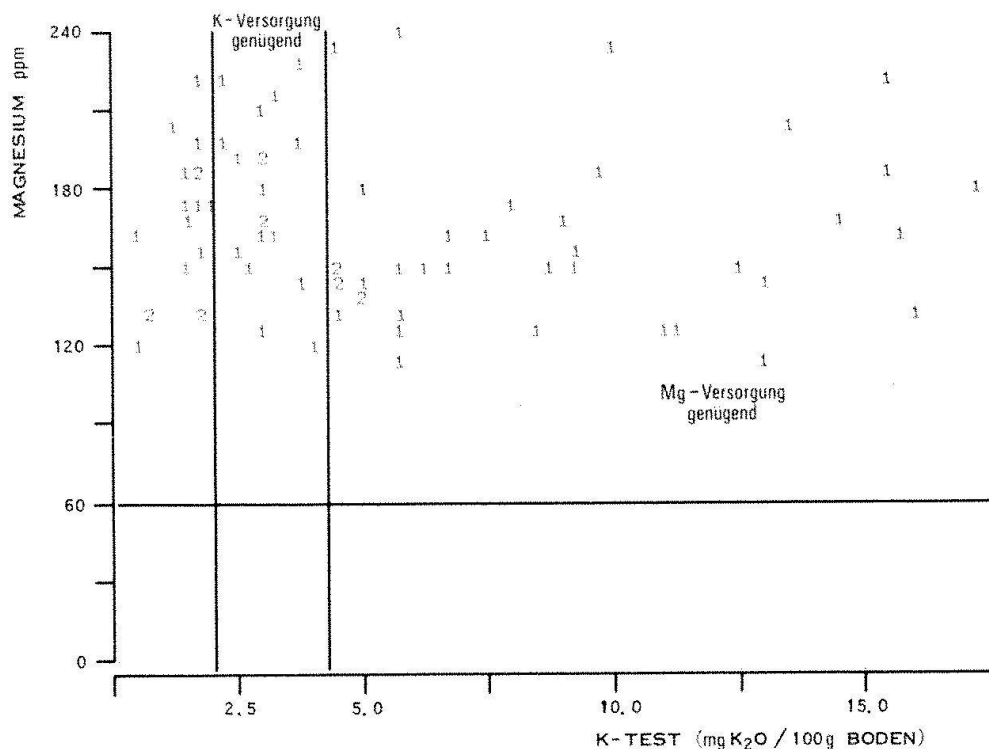


Abbildung 2. Magnesium- und Kaliversorgung organischer Böden (Forschungsanstalt Liebfeld 1976–80, N=78)

terlage der 0,2 bis 5 und mehr Meter mächtigen Torfschicht besteht aus Seekreide und/oder Lehm und Ton. Entlang der meist bewaldeten Hügelläuge geht der Moorboden in mehr oder weniger humose teils sandige Lehmböden über. In 23 ausgewählten Betrieben mit einer Gesamtfläche von 130 Hektaren wurden die in den Abbildungen 3 und 4 zusammengestellten Nährstoffverhältnisse des Obergrundes der Böden gefunden. Der pH-Wert (H_2O) der mineralischen Böden liegt im Bereich 5,4 bis 7,7 und derjenige der Humusböden schwankt von 5,2 bis 7,4. Während mineralische Böden zu einem sehr geringen Teil arm bezüglich Phosphat und Kali sind, fallen mehr als ein Viertel der Humusböden in die Versorgungsstufe «arm». Mehr als die Hälfte der Humusböden sind reich an Kali. Ein Grossteil der Böden ist karbonatfrei oder weist Spuren von Kalziumcarbonat auf. Der höchste Kalkanteil beträgt 5,8%. In dieser lokal begrenzten Untersuchung wurden sehr ähnliche Resultate gefunden, wie für das gesamte Untersuchungsgebiet unserer Anstalt. Auch die Magnesiumversorgung dieser Böden kann hier als gut bezeichnet werden. Es wurden gefunden für

| | |
|-------------------|-------------------------|
| Naturwiesen | 132–228 ppm Mg (N = 10) |
| Kunstpiesen | 113–241 ppm Mg (N = 15) |
| offenes Ackerland | 115–231 ppm Mg (N = 53) |

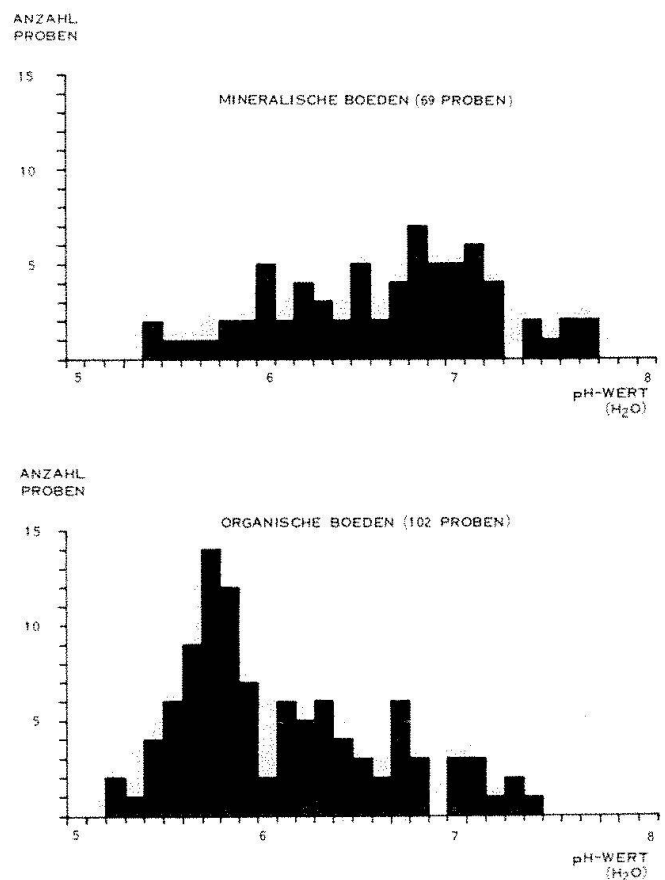


Abbildung 3. pH-Werte der Böden von 23 ausgewählten Betrieben im Lüscherzmoos

Seit Mai 1976 wurden am Ausfluss des Stollens alle 14 Tage (Mitte und Ende des Monats) Wasserproben entnommen. Mit der Probenahme wurde jeweils mittels Pegelstandmessung der Wasserabfluss des Moosbaches bestimmt. Der gesamte Wasserabfluss wurde an der gleichen Stelle kontinuierlich über den ganzen Untersuchungszeitraum gemessen. Die ausgewaschene Menge an Pflanzennährstoffen wurde aus Gehalt und Wasserabfluss errechnet.

Die Messung des Nitrat-Stickstoffs ($\text{NO}_3\text{-N}$) erfolgte mittels ionensensitiver Elektrode. Das Phosphat wurde durch Peroxid-Schwefelsäure-Aufschluss in Ortho-Phosphat übergeführt und als Gesamtphosphat gemessen. Kalium (K) und Natrium (Na) wurden flammenfotometrisch direkt aus der Lösung bestimmt, während Kal-

zium (Ca) und Magnesium (Mg) mittels Atomabsorption gemessen wurden.

In der Abbildung 5 sind die jährlichen Nährstofffrachten des aus dem Gebiet in den Bielersee führenden Moosbaches für die Jahre 1976–79 dargestellt. Die Nährstoffmengen wurden dabei auf das Wasserwirtschaftsjahr (1. Mai–30. April) bezogen und in kg je ha Fläche und Jahr ausgedrückt. Im Durchschnitt der drei Jahre wurden für die einzelnen Nährstoffe die folgenden ausgewaschenen Mengen festgestellt:

| | |
|-----------------------|----------------------------|
| 45,3 kg/ha Stickstoff | ($\text{NO}_3\text{-N}$) |
| 0,33 kg/ha Phosphat | (P) |
| 15,3 kg/ha Kalium | (K) |
| 561,1 kg/ha Kalzium | (Ca) |
| 34,3 kg/ha Natrium | (Na) |
| 79,1 kg/ha Magnesium | (Mg) |

Auffallend sind dabei die hohen Mengen Kalzium und Magnesium. Nach Untersuchungen von Czeratzky (1973), Jäggli (1978), Furrer (1981) und anderen Autoren ist bekannt, dass insbesondere während der Zeit, da ein Boden unbewachsen ist, d.h. keine Pflanzendecke trägt, grosse Auswaschungsverluste auftreten. Es ist festzustellen, dass die Winterteilbrachflächen vor allem in Gebieten mit organischen Böden – entsprechend hoher N-Mobilisierung – gross sind. So waren im frühen Frühjahr 1982

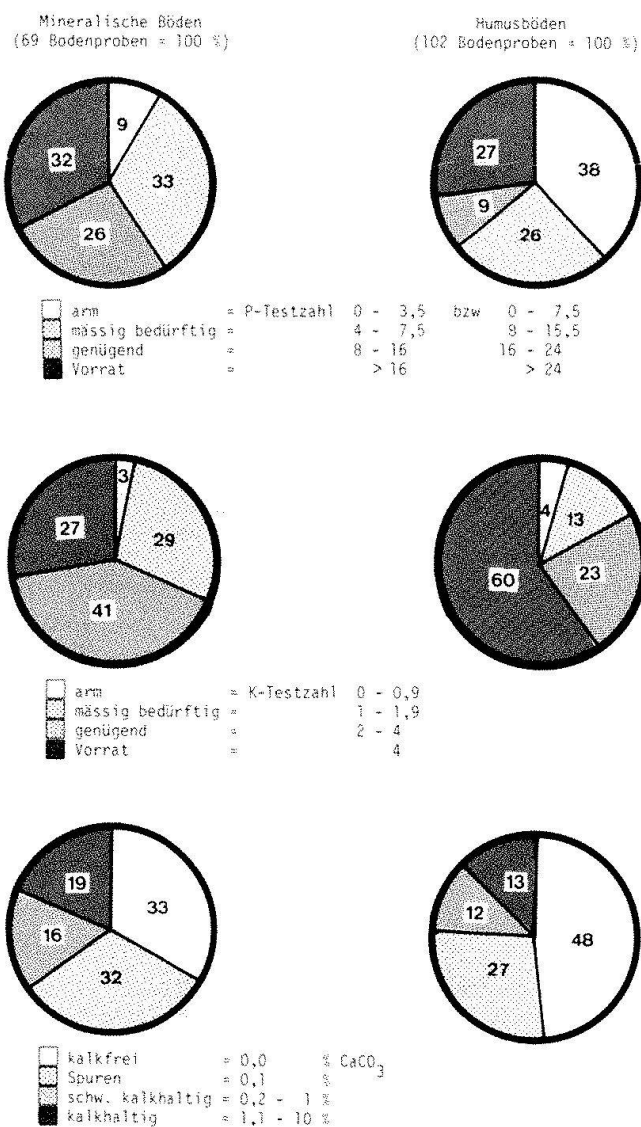


Abbildung 4. Prozentuale Aufteilung der Phosphat-, Kali- und Kalkversorgung in Versorgungsstufen des Bodenobergrundes (0–20 cm) von 23 ausgewählten Betrieben im Lüscherzmoos.

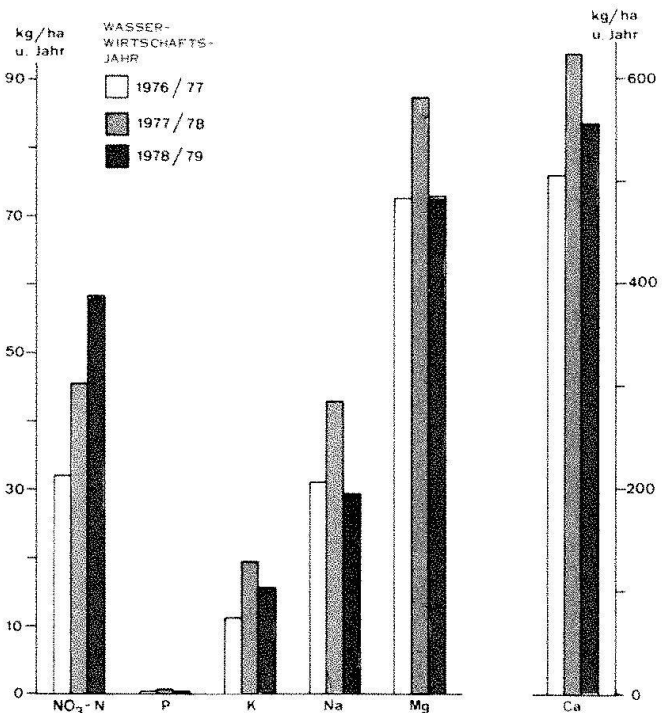


Abbildung 5. Jährliche Nährstofffrachten des Moosbaches 1976–79

im Lüscherzmoos über 60% der gesamten Fläche teilbrach.

Aktuelle Düngungsprobleme bei landwirtschaftlich genutzten organischen Böden

Wie auf mineralischen Böden ist bei dem für Pflanzen optimalen Kalk- und Säurezustand der Stickstoff ebenso grösster Impuls für Quantität und Qualität der Produkte. Im Übermass kann auch hier die vegetative zu ungunsten der fruktativen Entwicklung gefördert und die Güte der Produkte beeinträchtigt werden. Dabei ist es nach Baden (zit. in Linser-Scharrer 1965) einerlei, ob der Stickstoff aus der natürlichen (organischen) Quelle, ob er als Leguminosenstickstoff oder ob er mit Hof- und Handelsdüngern verabfolgt wird. Die grosse Unbekannte ist auch heute noch das natürliche Stickstoffnachlieferungsvermögen in organischen, teilweise auch in mineralischen Böden. Neueste Inkubationsversuche von Stadelmann et. al (1982) zeigten, dass der mobilisierte Stickstoff stark mit dem leicht abbaubaren Stickstoff, mit dem Gesamtstickstoff, dem organischen C- und Tongehalt, nicht aber mit dem pH-Wert und dem Schluffgehalt der Böden korrelierten. Eine praxisreife Methode zur Ermittlung des potentiell mobilisierbaren Stickstoffs fehlt bis heute. Die Gefahr von temporärem N-Überangebot – damit Luxuskonsum und/oder Auswaschung – ist damit höher.

Seit langem bekannt ist die herabgesetzte Löslichkeit und Aufnehmbarkeit des Mangans. Für die ausreichende Versorgung der Pflanzen mit Mangan ist der Gehalt an Gesamt-mangan nicht unbedingt massgebend; dagegen liessen sich auf Moorböden Beziehungen zwischen dem Gehalt an austauschbarem Mangan und dem Auftreten von Mangelerscheinungen (Dörrfleckenkrankheit) feststellen (Gisiger, 1952; Finck, 1969). Die Praxis begegnet dieser Insuffizienz mit Spritzungen von Mangan, insbesondere im Getreidebau.

Bor wird bei borbedürftigen Kulturen (Futter- und Zuckerrüben, Raps usw.) zuge düngt.

Organische Böden werden in der Literatur oft als Kupfermangelstandorte angesprochen (Kuntze und Vetter, 1980; Vetter und Klasink, 1977; Scheffer-Schachtschabel, 1970; Finck, 1970). Von unserer Seite konnte keine Kupfermangelsituation festgestellt werden. Das gleiche gilt für Molybdän, obschon in der Praxis

des Gemüsebaus Molybdändünger eingesetzt werden (Ridly, 1982).

Verbesserungsvorschläge zur landwirtschaftlichen Nutzung organischer Böden

1. Die Betriebsleiter sind bestrebt, auch organische Böden *gezielt* zu düngen. Mittels Analyse der Böden könnte die Zielsetzung des landwirtschaftlichen Pflanzenbaus noch besser erreicht werden. Unbedeckte Flächen (Teilbrachen) sind womöglich immer zu vermeiden und mittels Zwischenfutterbau oder Gründüngung zu überbrücken. Auch organische Böden sind für eine Gründüngung dankbar (Baden 1965). Als Vor- bzw. Zwischenfrucht kann der Gründüngung insbesondere auf erosionsgefährdeten Kulturen eine überragende Bedeutung zukommen.

2. Die Torfübersandung scheint vor allem bei tieftorfigen Flächen ein gangbarer Weg zur vielseitigen Nutzung mit nachhaltiger guter Bodenfruchtbarkeit zu sein (Frey et al., 1972). Die Nährstoffauswaschung könnte – aufgrund von theoretischen Überlegungen – stark reduziert werden. Die mechanische Belastbarkeit wird erhöht und der Landwirt könnte sich eher zu einer Winterzwischenfrucht bzw. Gründüngung entschliessen.

3. Tiefpflügen zeichnet sich als gangbarer Weg ab auf Profilen mit geringer Torfmächtigkeit und einer entsprechenden Qualität des Sandes im Untergrund (Hagemann, 1978; Kuntze und Vetter, 1980). Aus der Tabelle 2 sind die Bodenuntersuchungen auf dem Gutsbetrieb Witzwil ersichtlich. Die alten Untersuchungen wurden in den Jahren 1958 bzw. 1967 gemacht; neuere Untersuchungen stammen von den gleichen Parzellen aus den Jahren 1981 bis 82. Der Humusgehalt sank von rund 40 auf rund 4 bis 9%. Auffallend ist die grosse Menge Kalk, welche an die Oberfläche gebracht wurde. Während früher Spuren von Kalk gefunden wurden, bewegt sich nach dem Tiefpflügen der Kalkgehalt zwischen 10 und 40%. Teile der Parzellen sind nach wie vor als magnesium- und manganarm zu beurteilen.

4. Der alten Forderung, in organischen Böden den Grundwasserstand möglichst knapp an der Bodenoberfläche zu halten und wo möglich Futterbau zu betreiben, ist vermehrt Beachtung zu schenken. Wir wissen zwar sehr wohl, dass dies für private Betriebe mit mehreren Einzelin-

Tabelle 2: Bodenuntersuchungen auf dem Gutsbetrieb Witzwil (Parzellengrösse je zirka 15 ha)

| Parz. Nr. | Anzahl Proben (Datum) | Bodenart | Humus % | pH in H ₂ O | Kalk % | P-Test Ø | K ₂ O mg/100 g B Ø | Anzahl Proben (Datum) | Bodenart | Humus % | pH in H ₂ O | Kalk % | P-Test Ø | K ₂ O mg/100 g B Ø | Mg ppm Ø | Mn ppm Ø | Zn ppm Ø |
|-----------|-----------------------|---------------------|---------|------------------------|---------|----------|-------------------------------|-----------------------|----------------------------------------|-----------------|------------------------|-------------------|----------|-------------------------------|--------------|-------------|----------|
| 21 | 6 (1958) | Moor | — | 6,5–7,5 | Sp.–2,1 | 7,9 | 14,2 | 3 (Okt. 81) | — | 4,4 | 7,6–7,8 | 29,6–37,2 | 8,0 | 4,1 | — | — | — |
| | 1 (1967) | | 38,8 | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 4 (1958) | Moor | — | 6,6–6,8 | Spur | 6,9 | 9,9 | 3 (Okt. 81) | — | 5,1 | 7,4–7,7 | 21,8–36,0 | 6,8 | 3,7 | — | — | — |
| 27 | 5 (1958) | Sand. Moor bis Moor | — | 6,4–6,8 | 0 | 9,2 | 7,9 | 4 (Okt. 81) | — | 8,8 6,1–13,6 | 7,4–7,7 | 18,8 11,2–26,6 | 6,6 | 5,6 | 77 36–166 | 34 22–59 | 9,08 |
| 51 | 5 (1958) | Moor | — | 6,8–7,3 | Sp.–4,5 | 7,0 | 13,9 | 4 (Aug. 82) | Humoser lehmiger Sand | — | 7,6–8,0 | 24,8 14,4–38,0 | 2,5 | 1,2 | 56 37–67 | 36 29–39 | — |
| | 1 (1967) | | 43,4 | | | | | | | | | | | | | | |
| 52 | 6 (1958) | Moor | — | 6,6–7,1 | Sp.–8,5 | 6,6 | 13,4 | 2 (Aug. 82) | Schwach humoser Sand bis h. Leimboden | — | 7,6–7,9 | vorhanden | 3,5 | 1,0 | 53 35–98 | 32 26–40 | — |
| 53 | 3 (1958) | Moor | — | 6,9–7,3 | Sp.–2,2 | 6,8 | 7,7 | 2 (Aug. 82) | Humoser Leimboden bzw. toniger Schluff | — | 7,7–7,8 | vorhanden | 0,75 | 0,8 | — | — | — |

teressen und *einem* Wassermeister sehr oft problematisch ist und zudem der hohe Grundwasserstand im Frühjahr die mechanische Belastbarkeit der Böden stark reduziert, so dass oft Pflegearbeiten nicht termingerecht ausgeführt werden können.

Verdankungen

Für die wertvollen Hinweise sowie die Durchsicht des Manuskriptes danke ich den Herren Dir. Dr. E. Bovay, Dr. H. Häni und Dr. S.K. Gupta. Die Analysen wurden durch Herrn F. Schär und Mitarbeiter durchgeführt. Das Erstellen der Grafiken besorgte Frau I. Knecht, Herrn Dr. P. Lischer verdanken wir die Statistik. Die Herren Ing. agr. P. Käser und Ridly gaben mir wertvolle Hinweise. Herr P. Affolter besorgte die Reinschrift des Manuskriptes.

Literatur

- Baden, W., 1965: Die Kalkung und Düngung von Moor und Anmoor, zit. in Linser-Scharrer: Handbuch der Pflanzenernährung und Düngung, 3, 2, Wien, New York, 1445–1516.
- Bonauer, W., 1976: Untersuchungen über die Bewirtschaftungsweise von landwirtschaftlichen Betrieben im Lüscherzmoos, insbesondere unter Berücksichtigung von Bodenart und Düngeranfall, Diplomarbeit ETHZ.
- Buckmann, H. O., Brady N. C., 1965: The nature and properties of soils, New York, Macmillan, 7th. Ed., 355–377.
- Czeratzky, W., 1973: Die Stickstoffauswaschung in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion, Landbauforschung Vökenrode, 23, 1–18.
- Eidg. Landw. Forschungsanstalten, 1977: Düngungsrichtlinien für den Acker- und Futterbau, Mitt. f.d. Schweiz. Landwirtschaft 18, 2, 72, Nachdruck 33–40.
- Finck, A., 1979: Dünger und Düngung, Weinheim, New York, 263ff.
- Frey, E., Peyer K. und Jäggli F., 1972: Verbesserungsmöglichkeiten der Moorböden des Berner Seelandes, Mitt. f.d. Schweiz. Landwirtschaft, 20, 197–210.
- Furrer, O. J., 1981: Verhinderung der Nitratauswaschung in der Landwirtschaft durch kulturtechnische Massnahmen. Der Gemüsebau 9, 13–15.
- Gisiger, L., 1949: Von den Anbauschwierigkeiten auf Moorböden, Referat SLV.
- Gisiger, L., 1952: Die Manganversorgung des landwirtschaftlich genutzten Bodens der Schweiz. Die Phosphorsäure, 12, 4, 209–218.
- Hagemann, P. C., 1978: Bodentechnologische und moorkundliche Faktoren zur nachhaltigen Entwicklung von Sanddeck- und Sandmischkulturen, Diss., Göttingen.
- Jäggli, F., 1978: Sickerverluste an Mineralstoffen, Mitt. f.d. Schweiz. Landwirtschaft, 26, 130–136.
- Kuntze, H. und Vetter, H., 1980: Bewirtschaftung und Düngung von Sandmischkulturen, Oldenburg, 1980.
- Ridly, P., 1982: Mündliche Mitteilung.
- Scheffer, F. und Schachtschabel P., 1970: Lehrbuch der Bodenkunde, Stuttgart, 64.
- Scheffer, F. und Ulrich B., 1960: Humus, zit. in Scheffer-Schachtschabel, Lehrbuch der Bodenkunde, Stuttgart, 1970, 64–89.
- Stadelmann, F. X., Furrer, O. J., Gupta, S. K. und Lischer, P., 1982: Einfluss von Bodeneigenschaften, Bodennutzung und Bodentemperatur auf das N-Mobilisierungsvermögen von Kulturböden, Giessen (im Druck).
- Thomson, L. M. und Troeh, F. R., 1978: Soils and soil fertility, New York, 132–135.

Adresse des Autors:

Albrecht Siegenthaler
dipl. Ing. agr. ETH
Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene
CH-3097 Liebefeld-Bern

Assainissement des sols organiques du point de vue de l'ingénieur du génie rural

Jean-François Jaton

Résumé

L'abaissement du plan d'eau constitue la principale action d'assainissement des sols organiques. Elle a toutefois des conséquences importantes: tassement et minéralisation accélérée de la tourbe, ce qui oblige à reconstruire périodiquement les réseaux de drainage et parfois à relever les eaux par pompage. Le coût de tels travaux d'assainissement est élevé, et dépend de décisions politiques par les pouvoirs publics.

Zusammenfassung

Die Sanierung der organischen Böden wird durch eine Senkung des Wasserspiegels erreicht, hat aber eine bemerkenswerte Sackung und Mineralisierung des Torfes zur Folge. Die Drainagerwerke müssen periodisch neugeschaffen werden, und manchmal muss das Wasser in die höherliegende Hauptleitung gepumpt werden. Solche Arbeiten kosten ziemlich viel Geld, und ihre Durchführung hängt von politischen Beschlüssen ab.

Introduction

Le drainage des sols organiques est pratiqué depuis plusieurs décennies dans notre pays. Les premiers travaux d'assainissement de la Plaine de l'Orbe et du Seeland, pour ne citer que ceux-là, datent de la fin du siècle dernier. La mise en valeur de ces zones humides, tout en contribuant à lutter contre le paludisme, permet un développement de l'agriculture en fournissant de nouvelles terres.

L'abaissement du plan d'eau par drainage et le travail du sol (destruction de la végétation originelle, mélange des horizons) constituent le principal amendement d'un tel milieu. Ces sols deviennent alors prospères et différentes cultures à hauts rendements peuvent s'y développer.

Cette amélioration modifie toutefois singulièrement les caractéristiques physico-chimiques des tourbes. L'aération du milieu a notamment pour conséquence une accélération des processus de minéralisation et d'humification. L'alternance aérobie-anaérobie modifie également la microfaune et la microflore et, par suite, l'action physique et chimique de celles-ci sur le sol.

Ainsi le sol drainé, que ce soit par fossés à ciel ouvert ou par drainage souterrain, évolue rapidement et présente après un certain temps, des propriétés physico-chimiques très différentes de celles qu'il avait précédemment. Cette transformation est à l'origine du mauvais fonctionnement actuel de certains réseaux de drainage qui donnaient naguère satisfaction.

Problèmes principaux soulevés par les travaux d'assainissement en milieu organique

Un des problèmes majeurs posés par l'assainissement des anciens marais est celui du «*tassement*» des tourbes, qui résulte de l'action de deux phénomènes: le retrait physique dû à la perte en eau d'une part, la réduction de volume dû à la minéralisation de la matière organique d'autre part. Cet abaissement peut être considérable (1 à 2 cm par année, parfois plus) et après quelques dizaines d'années, la profondeur des ouvrages de drainage étant insuffisante, les collecteurs étant écrasés ou déformés, un nouveau réseau s'avère nécessaire (voir figure 1).

Une des conséquences importantes du phénomène de tassement, qui se manifeste principalement dans les anciennes plaines marécageuses, est la nécessité de recourir au relevage des eaux de drainage par pompage. De plus en plus fréquemment en effet, les nouveaux ouvrages à mettre en place doivent l'être à des profondeurs telles qu'un écoulement gravitaire n'est plus possible; de telles solutions sont évidemment plus onéreuses (construction des stations de

pompage, alimentation en électricité, surveillance).

Le tassement du sol n'est malheureusement pas le seul point qui préoccupe les praticiens chargé de la mise en valeur des sols tourbeux. Le problème du colmatage physico-chimique du drain et de son voisinage se pose actuellement en maints endroits où il contribue à diminuer la durée de vie du réseau d'assainissement. La formation des hydroxydes ferriques, principaux responsables du colmatage en milieu organique, est un phénomène relativement bien connu. De nombreuses expériences faites en laboratoire ont montré l'influence des conditions de pH et d'oxydoréduction sur ce phénomène (fig. 2), de même que le rôle joué par les ferro-bactéries du type *Leptotrix ochracea* ou *Gallionella ferruginea*. Ce que l'ingénieur connaît moins, par contre, ce sont les remèdes à apporter en vue de lutter contre cette forme de colmatage. Une des solutions souvent recommandée consiste à envelopper le drain d'une chemise drainante en gravier, et ceci à raison de 50 à 100 l/m'. La formation du gel ferrugineux (qui agit sur la conductivité hydraulique du sol) ne sera pas stoppée par ce moyen, mais le temps de colmatage sera ralenti et deviendra ainsi compatible avec la longévité des systèmes de drainage (fig. 3). Mais une fois encore, on peut constater

que les conséquences financières sur le coût des drainages ne sont pas nulles.

Perspectives d'avenir: drainage à tou(s)t prix?

Comme nous venons de le voir, remédier aux problèmes majeurs posés par l'assainissement des sols organiques est possible moyennant certaines solutions qui exigent des investissements considérables. La question qu'il convient donc de se poser est de savoir si l'on veut maintenir dans ces zones une économie agricole et quel prix on est disposé à mettre pour l'y maintenir. En ce qui concerne la Plaine de l'Orbe, dont nous parlons plus haut, le Conseil d'Etat et le Grand Conseil du Canton de Vaud ont admis cette nécessité et cette volonté d'y conserver une agriculture, sans laquelle la plaine retournerait, du moins en partie, à l'état de marécage.

Les pouvoirs publics de nombreux cantons sont donc amenés ou seront amenés à choisir. Choisir entre le maintien d'une vocation agricole et l'abandon de ces terres. La première solution est-elle réaliste? Est-elle possible dans des limites d'investissements compatibles avec l'économie agricole? Dans l'affirmative, l'ingénieur du Génie rural doit faire tout son possible pour trouver les solutions idoines aux problèmes du

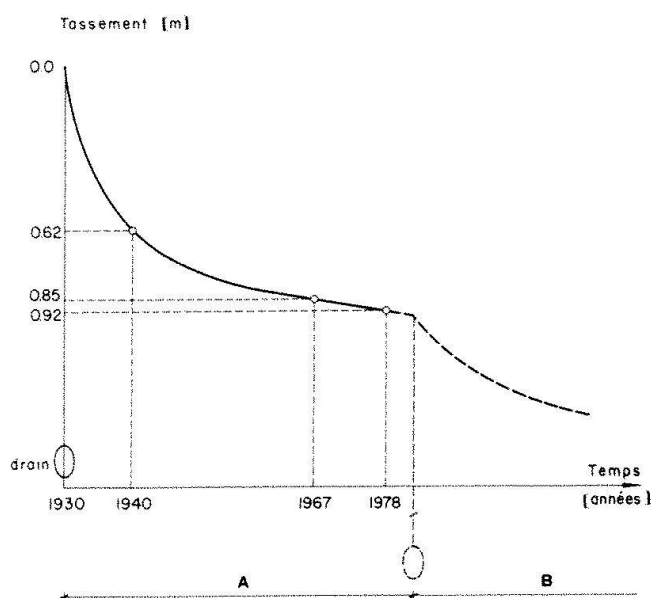



Figure 1. Observation du tassement de sols organiques drainés dans la plaine de l'Orbe, Commune de Mathod, «au Bochet»

Zone A: Tassement des tourbes drainées, valeur moyenne
Zone B: Tassement probable à la suite d'un nouveau drainage profond.

 = domaine de variation de Eh et pH du sol témoin

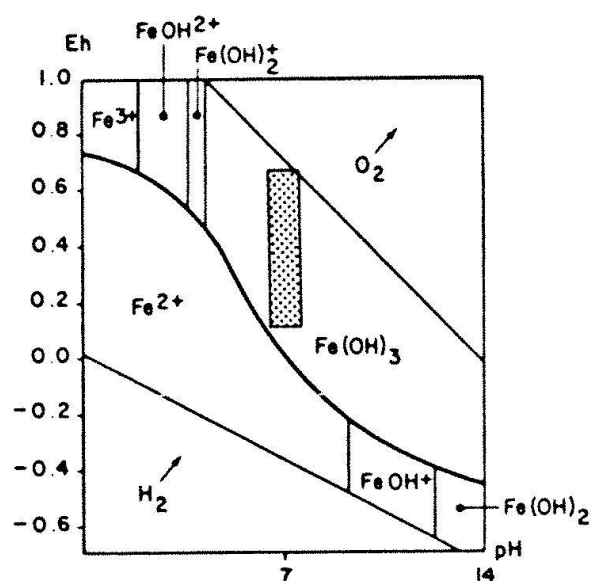


Figure 2. Diagramme d'équilibre des formes de fer en fonction de Eh et pH (extrait de «Le fer dans les sols», de P. Segalen).

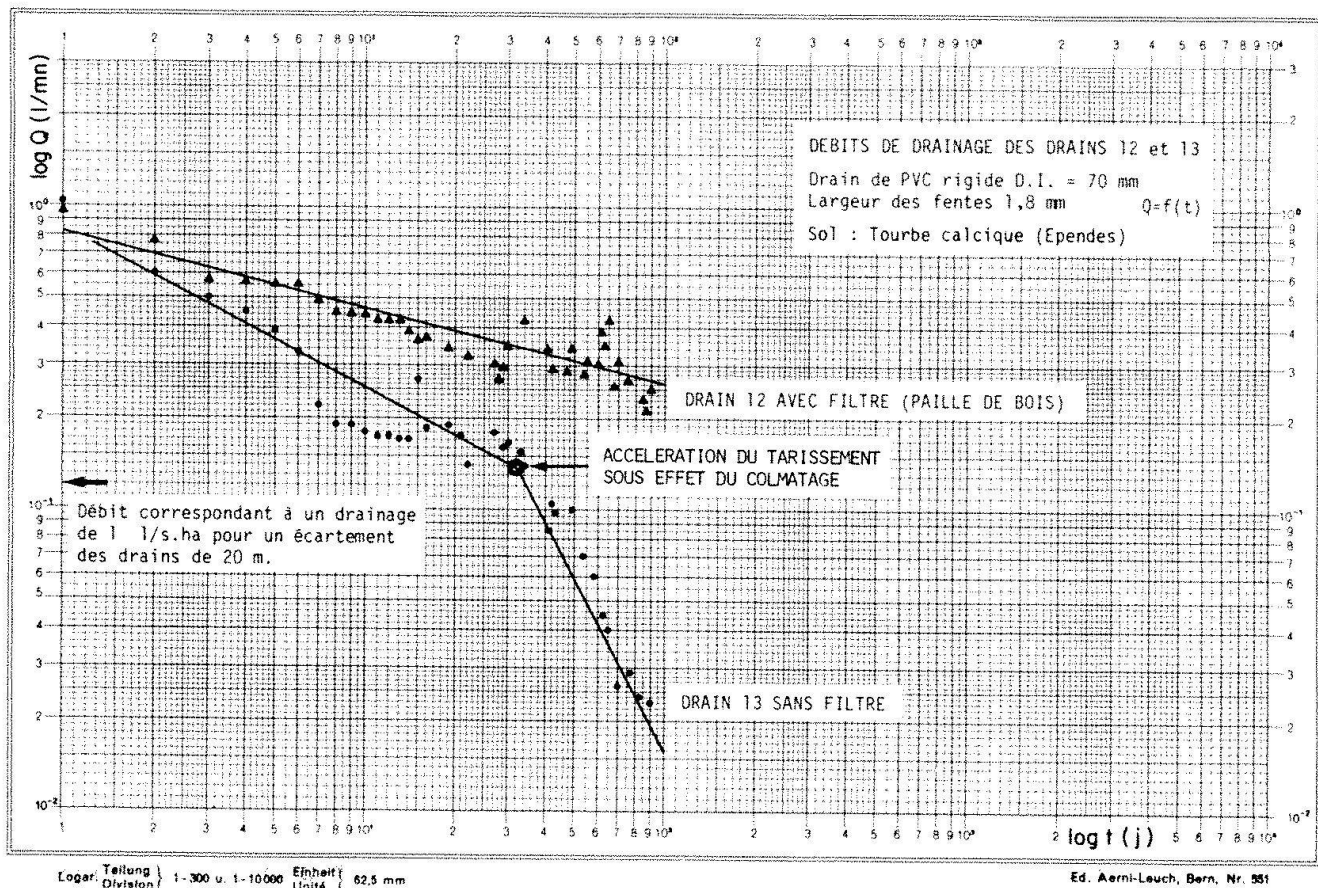


Figure 3. Influence d'une chemise drainante sur le débit du drain.

tassement et du colmatage (bonne gérance des pompages et maintien d'un niveau phréatique favorable en vue d'une limitation des tassements, plan de culture d'assolement limitant l'appauvrissement du sol en humus, en particulier dans les endroits où la couche de tourbe est mince, etc). Dans la négative, la solution consiste à renoncer à drainer tout ou partie de certains périmètres. Pourquoi ne rendrait-on pas à l'état naturel certains des nombreux marais «mis en valeur» au cours de ce dernier siècle (72 km² pour le seul canton de Vaud)? Politi-

quement cette solution est difficile à prendre, et il faut reconnaître que les termes économie et écologie ne se marient guère, même si dans le cas présent ils ne divergent pas.

Adresse de l'auteur:

Dr Jean-François Jatton
 Institut de génie rural
 Hydrologie et Aménagements
 EPFL - Ecublens
 CH-1015 Lausanne

Tiefpflügeversuche 1979 und weitere geplante Massnahmen in Witzwil

Hans Paul Käser

In meinem Referat «Landwirtschaftliche Nutzung der Moorböden» wurde dargelegt, dass Moorböden (über 40% organische Bestandteile) einem biochemischen Abbau unterliegen. In Norddeutschland und Holland, wo die Moore eine viel grössere Flächenausdehnung haben als bei uns, beschäftigt sich die Wissenschaft schon lange mit dem Problem der Moordynamik, ihren Folgen und Lösungsmöglichkeiten.

Im deutschsprachigen Raum ist es vorallem das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung, Bodentechnologisches Institut Bremen, Friedrich-Misslerstr. 46/50, D-2800 Bremen, Prof. Dr. H. Kuntze und Dr. R. Bartels. In Holland ist es das Ministerium für Land- und Wasserbau, Technischer Dienst in Utrecht.

Die folgenden Ausführungen basieren teils auf den wissenschaftlichen Erkenntnissen aus dem deutschen Weser- und Emsgebiet und den holländischen Provinzen Drenthe und Groningen. Andererseits auf der Bodenkarte von Witzwil, welche 1969 durch die Forschungsanstalt für Pflanzenbau, Zürich-Reckenholz, erstellt und seither durch unsere Spezialingenieure und Projektleiter verfeinert wurde. Weiter auf eigenen Versuchen, Beobachtungen, Erfahrungen und Ertragerhebungen.

Um in landwirtschaftlich genutzten Moorböden den Bodenabbau zu verhindern oder mindestens stark einzuschränken, gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- a) *Grünlandnutzung* mit dauernd hohem Grundwasserstand. Der zur Zersetzung neigende Moorboden liegt an der Oberfläche, ist jedoch durch die Grasnarbe einigermaßen geschützt. Der Grundwasserspiegel muss vorallem im Sommer auf etwa 60–80 cm unter der Oberfläche angehoben werden können.
- b) *Übersandung* der Oberfläche mit ca. 10 cm Sand für Wiese und Weide oder mit 20–30 cm Sand für Ackerbau. Dies kann hydraulisch (kolmatieren) oder mechanisch (Sand-

hengst, Bulldozer) geschehen. Nach erfolgter Übersandung wird etwas humusreicher Moorboden eingepflügt, um den fast sterilen Sand zu beleben.

- c) *Wühlen*. Mit Spezialgeräten – die eine Tiefe von 1–2 Meter erreichen – wird der Moorboden mit dem darunterliegenden sandigen Unterboden vermisch. Der Humusgehalt in der Ackerkrume (oberste 30 cm) wird dabei auf unter 20% gesenkt.
- d) *Tiefpflügen*. Mit einem Spezialpflug wird der Moorboden und der Unterboden zwischen 80 cm bis 230 cm tief umgebrochen. Die bisherige horizontale Schichtung zwischen Moorboden und Unterboden wird gewendet und schräg gestellt, wie in Abb. 1 schematisch dargestellt ist.

Je nach Beschaffenheit des Moorbodens resp. Untergrundes beträgt das Mischungsverhältnis 1:2, 1:1, 2:1. In Witzwil wurde 1:1 als Verhältnis gewählt. Der Humusgehalt wird dabei auf unter 15% gesenkt und sollte sich nach einigen Jahren bei 8% stabilisieren.

Welches Verfahren man wählt, hängt vom Standort und vom Unterboden ab. Deshalb ist für alle Verfahren eine Bodenkartierung bis auf mindestens 2 Meter Tiefe erforderlich und darf auf keiner Meliorationsfläche unterlassen werden. Sie erfordert in Moorböden Spezialkenntnisse. Ein Projekt und die Durchführung einer Melioration in Moorböden bedarf der Erfahrung und einer Gabe zur Beobachtung der auf dem neuen Boden wachsenden Kulturpflanzen. Mit anderen Worten, darf eine Moormelioration nicht dem Zufall überlassen werden. Selbst wenn alle Voraussetzungen optimal sind, können immer noch störende Faktoren das Geschehen beeinflussen. So zum Beispiel das Wetter während den Meliorationsarbeiten und während dem darauffolgenden Anbau der Kulturpflanzen.

Wir wollen uns nun den Massnahmen in Witzwil zuwenden. Witzwil ist eine Staatsdomäne

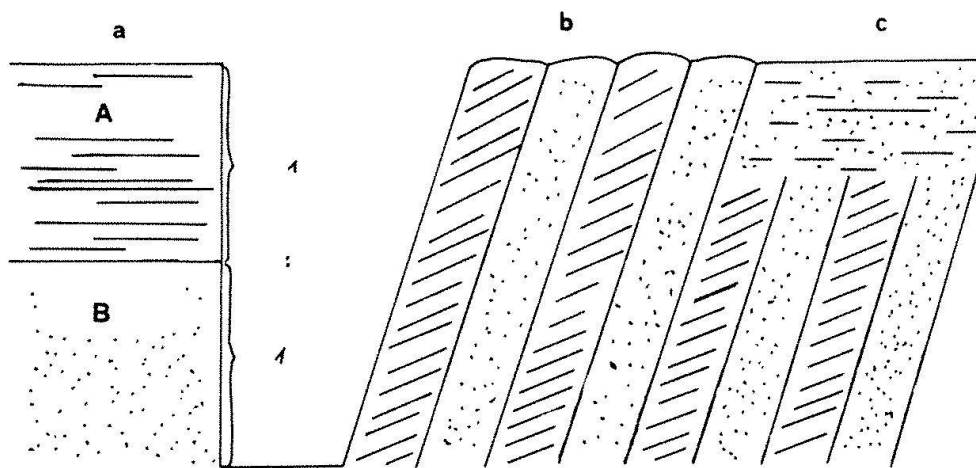


Abb. 1: Schematische Wirkungsweise des Tiefpflügens. A. Moorboden, B. Sand/Lehm Unterboden, a: vor dem Tiefpflügen, b: nach dem Tiefpflügen, c: Inkulturnahme der gemischten Ackerkrume.

und gehört dem Kanton Bern. Sie umfasst heute eine Fläche von 860 ha, wovon 450 ha Moorboden. Dabei besprechen wir jene Flächen, wo 1979 52 ha, 1982 83 ha und 1984 voraussichtlich 65 ha – also zusammen 200 ha – tiefgepflügt werden: Die Bodenkartierung ist abgeschlossen, der Aufbau der Böden bis 2,0 m Tiefe bekannt (Stellenweise bis 20 m!). Die Kontakte mit ausländischen und schweizerischen Spezialisten haben stattgefunden. Die Flächen, die nach dem erwähnten Tiefpflügevorgang bearbeitet werden, sind ausgeschieden. Die Vorbereitung wie Vorentwässerung und Absenken des Grundwasserstandes, sind getroffen. Die Folgemassnahmen nach erfolgtem Tiefpflügen sind geplant und festgelegt. Wie z.B. die Detailentwässerung, die Nährstoffbedürftigkeits-Untersuchungen, der Dünger, die Maschinen für die Bodenbearbeitung und die Wahl der ersten Kulturpflanzen. Es ist eine kleine Generalstabsarbeit, die – selbst im Fall Witzwil, wo nur ein Grundbesitzer beteiligt ist – viel Arbeit erfordert hat.

Kosten Tiefpflügen: 3000.– bis 5000.– Fr./ha.

Gesamte Meliorationskosten: 20000.– bis 30000.– Fr./ha.

Ziel aller Massnahmen: Den Bodenabbau stoppen oder zumindest stark verlangsamen, damit auf diesen fruchtbaren Ebenen Pflanzen und Tiere gedeihen können. Damit wird ein Teil der Ernährung aus eigenem Boden sichergestellt, ohne dass dadurch die Bodenfruchtbarkeit gefährdet wird. Wir sind zuversichtlich, dass wir dieses Ziel durch die getroffenen Massnahmen erreichen können.

Verfehlt wäre es dagegen, nichts zu unternehmen, die Moorebenen versumpfen zu lassen, um dann Nahrungsmittel aus dem Ausland zu beziehen.

Adresse des Autors:

Hans Paul Käser
dipl. Ing. agr. ETH
Anstalten Witzwil
CH-3236 Gampelen

Regeneration von Hochmoortorfen durch Naturschutzmassnahmen

Otto Wildi

Zusammenfassung

Seit einigen Jahren wird die Möglichkeit, Hochmoore mitsamt ihren Torflagern zu regenerieren, in Deutschland und auch in der Schweiz diskutiert. Im vorliegenden Bericht werden einige Voraussetzungen und die Erfolgsaussichten auf theoretischem Wege untersucht. Zunächst wird ein mathematisches Modell zur Simulation von Hochmooren dargestellt. Mit diesem wird anschliessend die Auswirkung menschlicher Störungen untersucht, nämlich eine einmalige Düngung des Moores und eine lokale Zerstörung der Vegetation. Die Resultate zeigen, dass in jedem Falle sämtliche Elemente des Ökosystems beeinflusst werden, mässige Störungen jedoch reversibel sind. Die vollkommene Regeneration dauert aber wie die ursprüngliche Entwicklung Jahrhunderte bis Jahrtausende. Abschliessend werden Folgerungen und Regeln für Regenerationsexperimente vorgestellt. Versuche grösseren Umfanges sind demzufolge nur zu empfehlen, wenn a) die ursprüngliche Form der wasserundurchlässigen Bodenschichten unverändert geblieben ist, b) Wasser- und Nährstoffzufuhr nicht gestört sind, c) der Aufstau in vielen kleinen Stufen langsam erfolgen kann und d) eine wissenschaftliche Überwachung der Vorgänge gewährleistet ist.

Résumé

Depuis quelques années, on discute, tant en Suisse qu'en Allemagne, la possibilité de régénérer les hautes-tourbières. Dans le présent rapport, quelques hypothèses et des perspectives de succès sont étudiées du point de vue théorique. Premièrement, un modèle mathématique de simulation d'une haute-tourbière est présenté. À l'aide de celui-ci on analyse ensuite la répercussion de perturbations humaines, notamment d'un épandage unique d'engrais sur le marais

ainsi que d'une destruction de la végétation. Les résultats montrent qu'en tout cas l'ensemble des éléments de l'écosystème est influencé, des perturbations modérées étant toutefois réversibles. La régénération complète s'étend sur des siècles voire des millénaires, tout comme l'évolution originelle. Des conclusions et des règles concernant les expériences de régénération sont enfin émises. On en déduit que des essais de grande envergure ne sont à conseiller qu'à condition: a) que la constitution originelle des couches imperméables du sol soit encore intacte, b) que l'apport d'eau et d'éléments nutritifs soit inchangé, c) que la retenue d'eau puisse être réalisée lentement en de nombreux petits paliers successifs, et d) que le processus puisse se dérouler sous contrôle scientifique.

Einleitung und Zielsetzung

Naturschutz bezweckt im allgemeinen die Erhaltung natürlicher Elemente unserer Umwelt, ist also seinem Wesen nach eine konservative Disziplin. Mit dem Verschwinden oft letzter Reste der Naturlandschaft aus grösseren Regionen unseres Landes stellt sich aber vermehrt die Frage nach der Neuschaffung oder doch Regeneration von Lebensräumen. Solange es sich dabei um Pionierstandorte wie Teiche oder Kiesinseln handelt, ist der Erfolg solcher Bestrebungen kaum anzuzweifeln. Das im folgenden zu behandelnde Thema, die Regeneration von Hochmoortorfböden, ist dagegen nicht unbestritten. Hochmoore sind Lebensräume, die nachweislich im Laufe von Jahrtausenden entstanden sind. Sie verändern sich sehr langsam und reagieren empfindlich auf menschliche Einflüsse (Ellenberg 1978). Die Anstrengungen, welche der Hochmoorregeneration gelten, sind noch jung (vgl. Übersicht bei Dierssen, 1981), und dementsprechend gering sind die Erfahrungen. Die Regenerationsmassnahmen zielen dabei auf die Wiederherstellung des Wasserhaus-

haltes ab. Durch Verschliessen von Drainagegräben und Aufstauen von Torfstichen soll der Abbau organischer Bodensubstanz gestoppt werden, so dass sich das Hochmoor langfristig aus eigener Kraft seinem ursprünglichen Zustand wieder annähern kann. Die entscheidende Frage ist dabei, ob Störungen des Moorsystems reversibel sind, ansonsten ja regenerationsfördernde Massnahmen sinnlos wären. Ziel meines Vortrages ist es, dieser einen Frage auf theoretischem Wege nachzugehen.

Im ersten Teil der Ausführungen sollen die Prozesse und Randbedingungen dargestellt werden, welche zur Hochmoortorfentstehung führen. Dies geschieht anhand eines früher publizierten mathematischen Modelles (Wildi 1978), welches einige der hauptsächlichen Vorgänge innerhalb eines Moores nachzuvollziehen erlaubt. Mit diesem Instrumentarium werden im zweiten Teil zwei Störungsexperimente simuliert und die Reaktionen des Natursystems dargestellt. Aus den Resultaten sollen Schlussfolgerungen für Experimente in der Natur gezogen werden. Die Voraussetzungen für erfolgversprechende Massnahmen sind kurz zu diskutieren.

Methodik der Simulation der Hochmoorentwicklung

Das hier vorzustellende Modell (Wildi 1978) diene zunächst der Abklärung der Randbedingungen eines speziellen Falles der Hochmoorbildung. Es ist bekannt, dass Hochmoore in der Regel mehr oder weniger kreisrunde, gegen das Zentrum aufgewölbte Torflager sind (vgl. Overbeck 1975, Imboden 1976). Wie beispielsweise Ellenberg (1978) erwähnt, trifft dies öfters als angenommen nicht zu. Gerade in den Schweizer Voralpen befinden sich viele Hochmoore auf sattel- oder sesselförmiger Unterlage (Wildi 1977). Der Bedeutung der Form dieser Unterlage galt das primäre Interesse. Zu diesem Zwecke musste zunächst das Moorökosystem modelliert werden mit den Elementen Glazialton, Torf, Nährstoff (Kationen), Wasser, Hoch- und Zwischenmoorvegetation (Fig. 1). Funktionell werden diese Elemente nach bekannten Gesetzmässigkeiten miteinander in Beziehung gesetzt, nämlich z. B. mit dem Gesetz von Darcy für die Wasserbewegungen im Torf, mit logistischen Wachstumsfunktionen für die Vegetation, mit pH- und durchlüftungsabhän-

gigen Funktionen für den Torfabbau usw. So dann werden verschieden geformte Unterlagen auf ihre Eignung als Moorstandort getestet (Fig. 2): Eine schiefe Ebene (A), ein normaler Sessel (B) und ein sattelförmiger Sessel (C). Das Ergebnis (Fig. 3) verdeutlicht, dass nur letzterer zur hochmoortypischen Verarmung an Nährstoffen, zur Akkumulation von Torfen und zur Entwicklung einer Hochmoorvegetation führt. Günstigste Wasser- und Nährstoffbedingungen vorausgesetzt, ist also immer die Form der Unterlage entscheidend für den Erfolg einer Hochmoorbildung.

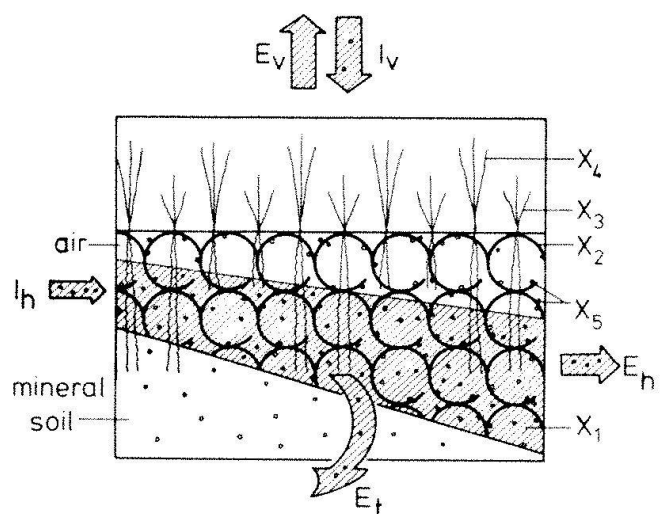


Fig. 1: Die wichtigsten Elemente des Moormodells: X_1 – Wasser, X_2 – Torf, X_3 und X_4 – Hoch- und Zwischenmoorpflanzen unterschiedlicher Wurzelungstiefe, X_5 – Nährstoffe. E_v und I_v – vertikaler Export und Import, I_h und E_h – horizontaler Transport, E_t – lateraler Transport (nach Wildi 1978).

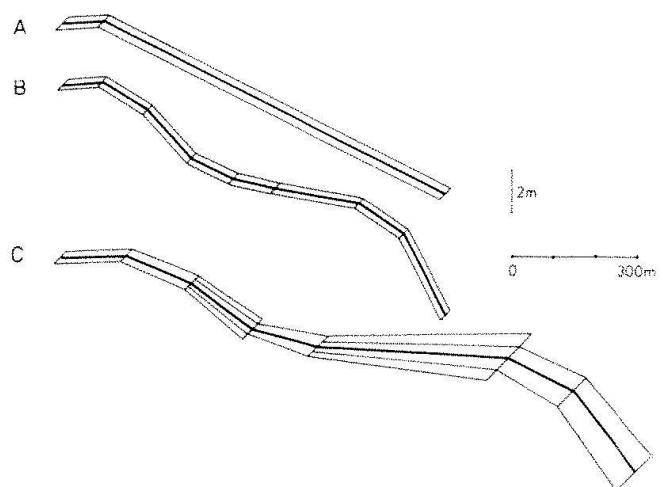


Fig. 2: Verschieden geformte Geländeunterlagen (Profil A, B, C) für Simulationsläufe des Moormodells (nach Wildi 1978).

Störungs- und Regenerationsversuche

Die Ergebnisse in Fig. 3 stellen Gleichgewichtszustände reifer Moore bei konstanter Wasser- und Nährstoffversorgung dar. Ob diese Zustände nach einer Störung überhaupt wieder erreicht werden können, ist die erste, wie lange dies gegebenenfalls dauert, die zweite Frage. Die dazu angestellten Experimente sind in den Abbildungen 4 und 5 dargestellt.

In Fig. 4 wird das Moor lokal gedüngt, alle anderen Elemente werden nicht angetastet. Das Resultat zeigt, dass das System jedoch in Kürze

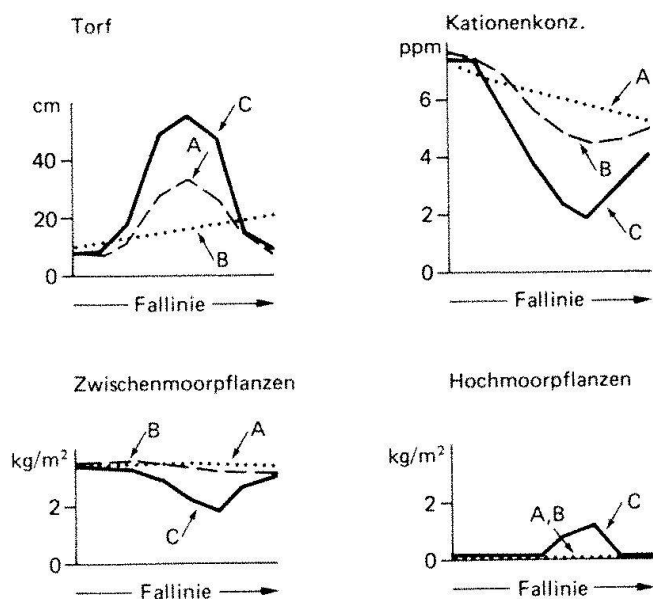


Fig. 3: Gleichgewichtszustände entwickelter Moore auf den Geländeunterlagen A, B und C (Fig. 2). Nur Unterlage C führt zur Entwicklung eines Hochmoores.

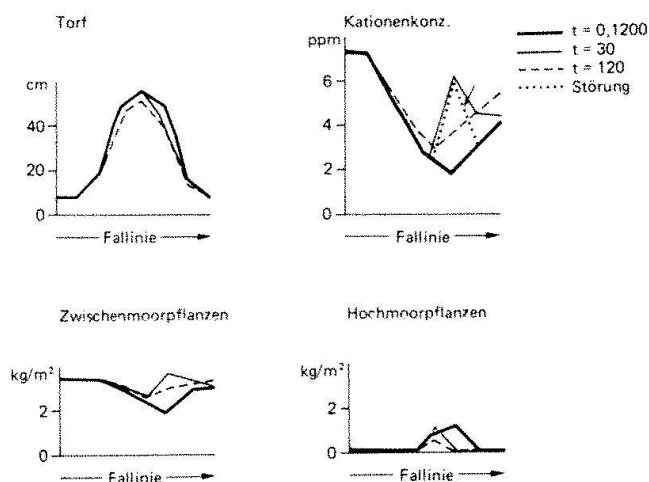


Fig. 4: Störung des Moorsystems durch eine einmalige Düngung (Pfeil). Nach zahlreichen Übergangsstadien erreicht das Moor mit ca. $t = 1200$ Jahren wieder seinen Gleichgewichtszustand.

als Ganzes reagiert, dass auch das Torflager sich abzubauen beginnt. Nach verhältnismässig kurzer Zeit erholt sich jedoch das Moor, zeigt aber noch deutliche Spuren der einmaligen Störung. Der ursprüngliche Zustand wird tatsächlich wieder erreicht, doch dauert die Erholung etwa gleich lange wie die ursprüngliche Entstehung des Hochmoores.

Das zweite Experiment zeigt Fig. 5. Hier wird ein Teil der Modellvegetation entfernt. In der Folge treten Abbauvorgänge auf, welche den verbleibenden Torf vermehrt mit Nährstoff versorgen und zu einer Aufschaukelung (Rückkoppelung) des Störungsprozesses führen. Die uneben gewordene Oberfläche des Moores lässt Teile des Torfes austrocknen, was den Abbau organischer Substanz ebenfalls beschleunigt. Aufstaumassnahmen, also eine zusätzliche Ver-nässung, könnten in diesem Moment den Niedergang des Systems stoppen, allenfalls sogar seine Erholung beschleunigen. Eine vollständige Regeneration von Torf, Nährstoffhaushalt und Vegetation tritt auch hier wieder ein, doch dauert sie auch diesmal ebenso lange wie die ursprüngliche Entwicklung, mithin Jahrhunderte bis Jahrtausende.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Es liegt auf der Hand, dass sich die hier modellmässig erworbenen Erkenntnisse im Experiment aus zeitlichen Gründen nur unvollständig überprüfen lassen. Immerhin bestätigen Beob-

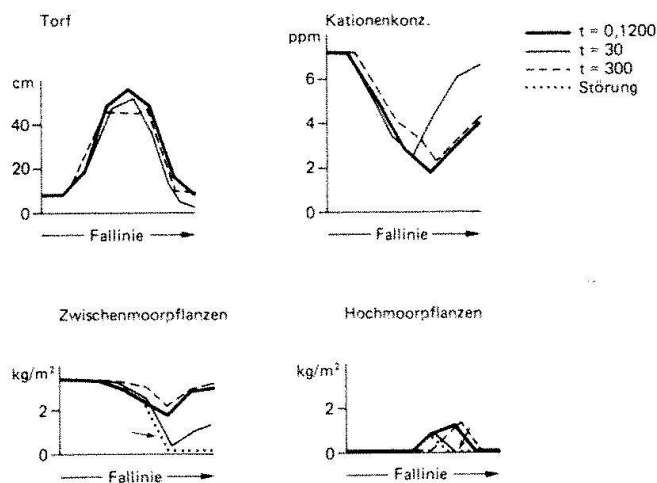


Fig. 5: Entfernung der Vegetationsdecke aus Teilen des Moores (Pfeile). Nach verschiedenen Übergangsstadien erholt sich das System wieder und ist nach ca. $t = 1200$ Jahren im Gleichgewicht.

achtungen an ehemals extensiv abgebauten Mooren, dass erste Regenerationsphasen, wie im Modell beobachtet, oft schon innert Jahrzehnten kräftig einsetzen. Es scheint daher gerechtfertigt, für zukünftige Projekte einige Regeln aus dem Modellversuch zusammenzufassen:

- a) Hochmoore entstehen offensichtlich nur auf wenig geneigten, allseitig gewölbten, annähernd wasserundurchlässigen Geländestellen (Profil C in Fig. 2). Regenerationen sollten deshalb nur dort versucht werden, wo diese Voraussetzungen gut erfüllt sind, was sich am ursprünglichen Zustand des Torflagers und an der Vegetation abschätzen lässt. Ist die tonhaltige Unterlage durch Drainagen verändert, ist der Erfolg der Regenerationsmassnahmen in Frage gestellt.
- b) Wo sich die Menge und/oder die Nährstoffbelastung des zufließenden Wassers nachweislich irreversibel verändert haben, kann der ursprüngliche Gleichgewichtszustand nicht mehr erreicht werden. Von einem Versuch ist abzusehen.
- c) Der Aufstau von Drainagegräben soll in möglichst vielen Stufen und nur langsam erfolgen. Damit kann die zukünftige Form des Grundwasserspiegelverlaufes gut nachgebildet werden und frühe Entwicklungsstadien gleichen eher dem Endzustand.
- d) Hochmoore reagieren äusserst empfindlich auf chemische und physikalische Veränderungen der Umwelt. Bis zum Vorliegen genügender Erfahrung sollten Regenerationen stets wissenschaftlich überwacht werden bezüglich Nährstoffkonzentration, Wasserversorgung, Vegetations- und Torfentwicklung (Oberflächenform in drei Dimensionen).

Grössere Dammbauten sollten von Fachleuten überwacht und nur aus geeignetem Baumaterial hergestellt werden (vgl. auch Dierssen, 1981).

Abschliessend darf wohl festgestellt werden, dass unsere Kenntnisse genügen, um erste Regenerationsversuche in die Wege zu leiten. Eine Inventarisierung der Hochmoore der Schweiz, welche in diesen Monaten ihren Abschluss findet, hat gezeigt, dass geeignete Objekte existieren. Ungestörte, sich fast im Naturzustand befindliche sind jedoch extrem selten geworden.

Literatur

- Dierssen, K., 1981: Regeneration von Hochmooren – Zielsetzung, Möglichkeiten, Erfahrungen. *Natur und Landschaft* 56, 2. 48–50.
- Ellenberg, H., 1978: *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart. 982 S.
- Imboden, C., 1976: *Leben am Wasser*. Verlag Schweizerischer Bund für Naturschutz, Basel. 240 S.
- Overbeck, F., 1975: *Botanisch-geologische Moorkunde unter besonderer Berücksichtigung Nordwestdeutschlands usw.* Karl Wachholz Verlag, Neumünster, 719 S.
- Wildi, O., 1977: Beschreibung exzentrischer Hochmoore mit Hilfe quantitativer Methoden. *Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel* 60, 128 S.
- Wildi, O., 1978: Simulating the development of peat bogs. *Vegetatio* 37, 1. 1–17.

Adresse des Autors:

Dr. Otto Wildi
Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen
CH-8903 Birmensdorf

La valeur naturelle des marais de la rive sud du lac de Neuchâtel

Christian Roulier

Résumé

La rareté des milieux humides en Suisse, et la diversité de la flore et de la faune palustres justifient l'intérêt de la protection de ces sites. La rive sud du lac de Neuchâtel est décrite au plan historique, géographique et botanique. On distingue 5 types principaux de milieux riverains: beine lacustre, étangs et roselières lacustres, prairies marécageuses, dunes littorales et forêts riveraines. Les milieux riverains servent de site de reproduction, de refuge hivernal ou migratoire à une importante faune. Les diverses menaces pesant sur le site sont énumérées et diverses démarches de protection sont proposées.

Zusammenfassung

Die Seltenheit der feuchten Standorte in der Schweiz, sowie die Mannigfaltigkeit ihrer Flora und Fauna rechtfertigen einen Schutz dieser Biotope. Das südliche Ufer des Neuenburgersees wird historisch, geographisch und botanisch beschrieben: fünf typische feuchte Standorte werden unterschieden. Das Gebiet dient auch einer grossen Anzahl von Vögeln als Schutzinsel. Verschiedene Prozesse bedrohen das Gebiet, und einige Schutzmassnahmen werden vorgeschlagen.

Introduction

La fonction du présent exposé est de mettre en évidence l'importance, certes non quantifiable, des sols organiques du point de vue de la protection de la nature, en prenant comme exemple le cas de la rive sud du lac de Neuchâtel. Il est clair que ce ne seront pas les sols eux-mêmes qui seront ici considérés, mais bien le rôle qu'ils jouent comme substrat d'une végétation et d'une faune du plus haut intérêt. En effet, la constitution d'un sol organique est liée à la pré-

sence d'une inondation permanente ou temporaire qui va induire la formation d'un marais.

Pourquoi la protection de la nature poursuit-elle avec tant d'insistance la sauvegarde des dernières zones humides qu'il s'agisse de prairies marécageuses, d'étangs, de bords de lacs ou de tourbières?

Deux raisons peuvent être invoquées: la première réside dans la diversité de la flore et de la faune palustres. D'après Imboden, 26 % des espèces de plantes vasculaires d'Europe centrale vivent en milieu aquatique ou marécageux. Par ailleurs, le contact entre deux milieux telles la terre et l'eau est générateur d'une diversité supplémentaire due à la juxtaposition des deux habitats et enrichie d'espèces typiques de ce lieu de transition. La deuxième raison réside dans la rareté des milieux humides en Suisse. Suite aux assainissements et aux travaux de correction de cours d'eau entrepris depuis le début du 19^{ème} siècle, on sait actuellement que 85 à 90 % de la surface des zones humides ont aujourd'hui disparu. Au sujet de la mise en valeur des marais, il est tout de même intéressant de constater que, sous nos latitudes les marais figurent au premier rang des écosystèmes quant à leur productivité biologique. Chaque année, sous forme de matière organique végétale ou animale, ils fabriquent plus de calories par unité de surface qu'une forêt, qu'une prairie ou qu'un terrain cultivé intensivement grâce aux engrais artificiels. On peut donc se demander dans quelle mesure il n'aurait pas été logique de rechercher par quels moyens la puissance productrice des marais n'aurait pu être utilisée par l'homme et les animaux sans recourir à leur destruction.

Laissons-là les réflexions générales pour nous concentrer sur l'objet principal de l'exposé.

Origine

Cette région n'a pas toujours eu la valeur naturelle exceptionnelle qui est la sienne aujourd'hui.

d'hui. Avant 1869, il semble bien que de hautes falaises molassiques bordaient le lac dans toute sa partie sud-est. Le lac rongea petit à petit cette berge escarpée et épandait le produit de l'érosion sous la forme d'une beine lacustre, ou haut-fond. Entre 1869 et 1888, la première correction des eaux du Jura permit la mise en culture des plaines alluviales de l'Orbe et du Seeland, ce qui représenta alors la perte de près de 400 km² de milieux humides. On abaissa le niveau des 3 lacs subjurassiens de 2,7 mètres, ce qui exonda une partie du haut-fond qui s'était créé au pied des falaises de molasse. 20 km² de grèves nouvelles apparurent et, parce que peu accessibles et régulièrement inondées, ces nouvelles terres n'intéressèrent que faiblement les communes riveraines; elles furent abandonnées à la nature et se couvrirent de végétation palustre.

Situation actuelle

Selon la hauteur du niveau de l'eau sur ou dans le sol, différents groupements végétaux colonisèrent ces nouvelles surfaces. Il est probable que la forêt prit pied directement dans les parties les plus élevées; les surfaces marécageuses se couvrirent de prairies à laiches alors que les zones inondées furent colonisées par la végétation aquatique et les roselières. Aujourd'hui la végétation, bien qu'équilibrée avec les conditions du milieu, évolue encore sous l'action de l'atterrissement et du niveau du lac.

Après cent ans d'évolution naturelle, cette région est actuellement un vaste bas-marais, presque plat, dont le substrat est constitué soit par les sables et les limons meubles déposés lors de l'érosion de la falaise, soit parfois par la molasse en place.

Géographiquement, la rive sud s'étend d'Yverdon (la Thièle) à Gampelen (la Thielle), sur une longueur d'environ 42 km. L'occupation du sol de la zone riveraine est la suivante:

- 780 hectares de marais non boisés
- 780 hectares de forêts riveraines naturelles ou exploitées
- 460 hectares de zones aménagées.

On y distingue 7 grandes zones naturelles de plusieurs kilomètres de longueur et de quelques centaines de mètres de largeur, séparées par des agglomérations riveraines de petite à moyenne importance.

Valeur naturelle

La valeur naturelle actuelle de la rive sud-est du lac de Neuchâtel tient à quatre grandes qualités:

- la *diversité* des milieux naturels riverains
- la *dimension* de ces milieux
- la *proximité* d'un *arrière-pays rural* encore diversifié
- la situation du lac et de ses rives comme *refuge hivernal* et migratoire pour les oiseaux.

Diversité des milieux

On distingue 5 types principaux de milieux riverains:

- la beine lacustre
- les étangs et les roselières lacustres
- les prairies marécageuses à laiches
- les dunes littorales
- les forêts riveraines.

On peut adjoindre à ces cinq milieux riverains les forêts de pente qui marquent l'ancien rivage de lac et qui limitent le paysage lacustre vers l'intérieur. Sur le terrain, ces différents milieux forment la zonation de la végétation; ils sont ordonnés en fonction de leur affinité pour l'eau. La *beine lacustre* correspond aux zones peu profondes du lac (0-12 mètres). Sa végétation se compose essentiellement d'algues et de plantes vasculaires à feuilles nageantes, en particulier les potamots (*Potamogeton* sp.). C'est un lieu de reproduction important pour de nombreux invertébrés littoraux (mollusques, vers) et pour les poissons (palée [*Coregonus fera*], perche [*Perca fluviatilis*]). Elle joue un rôle important dans l'alimentation de certains oiseaux nicheurs: grèbes (*Podiceps* sp.), foulque (*Fulica atra*) et hivernants: canards plongeurs, laridés, hérons [*Ardea* sp.]).

Les *étangs* et *roselières* ont en commun leur inondation quasi-permanente: de quelques dizaines de centimètres à environ deux mètres d'eau. Les roselières lacustres s'implantent directement dans le lac; les roselières intérieures entourent les étangs et sont généralement séparées du lac par la dune.

Dans les étangs, on rencontre une végétation typiquement aquatique dominée par les nénuphars blancs et jaunes (*Nymphaea alba*, *N. luteum*) et les utriculaires (*Utricularia* sp.). La composition végétale varie en fonction du degré d'eutrophisation de l'eau.

Ces roselières sont souvent constituées exclusivement du roseau (*Phragmites communis*). Dans certaines conditions, les massettes (*Typha sp.*) ou la marisque (*Cladium mariscus*) le remplacent. Pour les vertébrés, les étangs et les roselières remplissent de nombreuses fonctions.

C'est un lieu de fraie privilégié pour les poissons (brochet [*Esox lucius*], certains cyprinidés comme la tanche [*Tinca tinca*] ou la carpe [*Cyprinus carpio*]) et pour les batraciens, qu'ils soient sédentaires (grenouille verte [*Rana esculenta*]), ou migrateurs (grenouille rousse [*Rana temporaria*], tritons [*Triturus sp.*]). C'est surtout l'exemple des oiseaux nicheurs qui dépeint le mieux l'importance de ces milieux inondés: 24 espèces se reproduisent régulièrement dans les étangs ou leur sont étroitement liés. (Exemples: grèbes huppés et castagneux [*Podiceps cristatus*, *P. ruficollis*], le râle d'eau [*Rallus aquaticus*], le héron blongios [*Ixobrychus minutus*], la rousserolle turdoïde [*Acrocephalus arundinaceus*]. Deux espèces rares telles le héron pourpré (*Ardea purpurea*) et la mésange à moustaches (*Panurus biarmicus*) trouvent dans ces milieux leur seul lieu de reproduction en Suisse. Ces étangs et roselières ont également une fonction d'alimentation et de dortoir pour de nombreux animaux (mammifères, hirondelles [*Hirundo sp.*]).

Les prairies à laiches prennent pied dans les stations temporairement inondées (de 1 à 6 mois par années). Le niveau phréatique, la qualité chimique et texturale du substrat permettent à plus de 10 groupement végétaux de se différencier. On y distingue les prairies à grandes laiches (de 0,6 à 1 mètre de hauteur) montrant une importante affinité pour l'eau, et les prairies à petites laiches (0,2 à 0,6 m. de hauteur) moins humides.

L'exemple-type de prairie à grandes laiches est la prairie à laiche élevée (*Caricetum elatae*). Cette dernière espèce forme des buttes qui s'élèvent petit à petit par rapport à la surface de l'eau. Le choin noirâtre (*Schoenus nigricans*) forme un type particulier de prairie à petites laiches abritant de nombreuses plantes spécialisées telles des orchidées et la gentiane pneumonanthe (*Gentiana pneumonanthe*); à propos de cette dernière, ils est curieux de constater que les bas-marais constituent la seule station de plaine abritant cette espèce qui appartient à un genre s'étant diversifié en montagne. La faune des prairies est incontestablement plus pauvre que celles des étangs et des roselières. Elle n'en a pas

moins une valeur importante car certaines espèces leur sont étroitement inféodées. Parmi les oiseaux, on peut citer le bruant des roseaux (*Emberiza schoeniclus*), les locustelles (*Locustella sp.*), la bécassine des marais (*Gallinago gallinago*); le rat des moissons (*Micromys minutus*), minuscule micromammifère, construit son nid en boule dans les laiches et caractérise aussi ces prairies.

Un recensement exhaustif des vertébrés a permis de déterminer la présence régulière de 80 espèces se reproduisant dans les marais non boisés:

- 7 espèces de poissons
- 13 espèces de batraciens
- 3 espèces de reptiles
- 43 espèces d'oiseaux
- 14 espèces de mammifères.

Sur les 43 espèces d'oiseaux, 22 font partie de la «liste rouge des oiseaux rares et menacés de disparition en Suisse»; ces espèces rares représentent le 1/3 de toutes les espèces menacées en Suisse.

La dune littorale, formée par l'accumulation du sable par les vagues, sépare le lac des marais sur la plus grande partie de la rive. Large d'une dizaine de mètres, la dune est surélevée par rapport au reste du marais. De ce fait, l'évolution de sa végétation est différente. Le boisement de ce milieu intervient rapidement après les stades «sable nu» et «végétation pionnière». Ces étendues de sable sont favorables à l'arrêt et à l'alimentation des limicoles et laridés migrateurs.

Le stade boisé abrite quelques espèces préférées telles le sanglier (*Sus scrofa*) et la mésange des saules (*Parus montanus*).

Les forêts riveraines remplacent les marais non boisés dans les stations où l'atterrissement est suffisant pour permettre la croissance des espèces ligneuses. De nombreuses forêts riveraines ont encore une composition naturelle et jouissent d'une exploitation forestière modérée. Ces peuplements ont pour la plupart moins de 100 ans, âge relativement jeune pour des forêts.

Selon les conditions, différentes essences peuvent dominer, accentuant par là la diversité des milieux: saule blanc (*Salix alba*), aulne noir (*Alnus glutinosa*) ou blanc (*A. alba*), frêne (*Fraxinus excelsior*) et même pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) là où les conditions hydriques et pédologiques sont trop sévères pour l'installation des feuillus.

Concernant la faune, on dénombre environ 90 espèces de vertébrés se reproduisant. Si ce chif-

fre est supérieur à celui des marais non boisés, on constate néanmoins que la plupart des espèces se retrouvent dans les autres forêts environnantes. La faune des forêts riveraines, bien que diversifiée et comportant également des espèces rares, est moins originale et spécifique que celle des marais. En fait, le caractère boisé des forêts riveraines semble primer sur le caractère humide. Le rossignol (*Luscinia megarhynchos*), le pic cendré (*Picus canus*) et l'épeichette (*Dendrocopos minor*) et le muscardin (*Musccardinus avellanarius*) sont des espèces préférées. Les forêts de pente font partie du paysage et de l'écosystème riverains. Leur composition végétale est généralement celle des autres forêts de l'arrière-pays, à la différence près que leur escarpement a rendu leur exploitation sylvicole difficile.

De par leur situation, elles abritent quelques espèces liées au marais: le milan noir (*Milvus migrans*), le héron cendré (*Ardea cinerea*) et le putois (*Putorius putorius*) se reproduisent en forêt mais prélèvent leurs proies dans les marais pour nourrir leur progéniture.

Dimension des zones naturelles

Sur les 20 km² de zone riveraine, les $\frac{3}{4}$ de cette surface sont restés naturels. Or certaines espèces ont besoin de vastes territoires intacts pour se reproduire; c'est le cas de certains rapaces (busard [*Circus* sp.]), du héron pourpré (*Ardea purpurea*), de la loutre (*Lutra lutra*) et des laridés. Pour ces espèces exigeantes, la rive du sud du lac de Neuchâtel constitue un des seuls milieux en Suisse où elles peuvent encore se maintenir.

Pour les espèces territoriales, ces marais permettent la conservation de grandes populations, gage indispensable de la stabilité d'une espèce; ainsi la rive abrite:

- le 20% de l'effectif suisse de la bécassine des marais (*Gallinago gallinago*)
- le $\frac{1}{3}$ de celui du grèbe huppé (*Podiceps cristatus*), du butor blongios (*Ixobrychus minutus*) et de la rousserolle turdoïde (*Acrocephalus arundinaceus*)
- plus de la moitié des effectifs des locustelles tachetée et lusciniôide (*Locustella naevia*, *L. luscinioides*)
- la totalité des couples de hérons pourprés (*Ardea purpurea*), du goéland cendré (*Larus*

canus) et de mésanges à moustaches (*Panurus biarmicus*).

Arrière-pays

La proximité d'un arrière-pays agricole et forestier varié constitue la 3ème qualité de cette région.

Le paysage lacustre est formé des 3 espaces liés harmonieusement:

- le lac, le marais, l'arrière-pays.

C'est à nouveau la faune qui illustre les interrelations nombreuses existantes entre les 2 derniers ensembles, interrelations aboutissant à un enrichissement mutuel:

- les batraciens et le sanglier (*Sus scrofa*), vivant dans l'arrière-pays, viennent se reproduire dans les marais.
- le harle bièvre (*Mergus merganser*), au contraire, couve dans quelque infractuosité d'un arbre ou d'une falaise de l'arrière-pays, puis conduit ses jeunes nouveaux-nés au lac pour les y élever.
- les hirondelles (*Hirundo* sp.), nichant dans les villages environnants, se rassemblent dans les roselières en dortoirs pouvant compter des milliers d'individus.

Refuge hivernal et migratoire

Le refuge hivernal et migratoire constitué par le lac de Neuchâtel et ses rives constitue la 4ème qualité de cette région.

Les lacs du Moyen-Pays ont pris, depuis l'apparition de la moule zébrée (*Dreissena polymorpha*), une importance considérable pour l'hivernage de certaines espèces de canards. Pour le fuligule morillon (*Aythya fuligula*) notamment, c'est la principale aire d'hivernage connue en Europe (plus de 20 000 individus par hiver). La diversité des milieux naturels riverains offre à plus de 200 espèces d'oiseaux migrants abri et nourriture. Certains groupes s'arrêtent sur le lac (anatidés, laridés) ou sur les bancs de sable et les vasières (limicoles); beaucoup de passereaux s'alimentent et dorment dans les roselières, d'autres sont inféodés aux forêts riveraines.

En tout, ce sont probablement des millions d'oiseaux qui font halte dans la région du lac lors de chaque période migratoire.

Objectifs écologiques

Cette description assez détaillée des différents milieux a donc également permis de mettre en évidence la valeur naturelle d'ensemble de la rive sud-est. Rappelons, en résumé, les éléments constituant le fondement de cette valeur exceptionnelle:

- dimensions importantes constituant le plus grand marais de la Suisse,
- paysage lacustre presque intact,
- présence de groupement végétaux en voie de disparition en Suisse,
- présence d'espèces végétales et animales rares ou uniques dans notre pays (fonction de réserve biogénétique).

La volonté de conserver intactes l'ensemble de ces qualités a été décidée et définie en 1981 par un groupe de scientifiques, spécialistes de diverses branches. Il est ressorti de ces discussions un système d'objectifs écologiques ayant pour fonction d'orienter à long terme la conservation des milieux naturels de la rive tout en établissant un système de priorités.

Les options fondamentales, s'appliquant à l'ensemble de la rive, sont les suivantes:

- conservation des milieux naturels dans leur état actuel et dans leurs dimensions,
- conservation des conditions nécessaires à l'existence des communautés végétales et animales actuelles,
- conservation des marais non boisés prioritairement à celle des autres milieux. La surface des marais non boisés ne doit plus diminuer,
- au sein des marais non boisés, conservation des étangs et des roselières prioritairement à celle des autres milieux.

La réalisation de ces objectifs passe par la résolution de nombreux problèmes.

Menaces

Les menaces actuelles pesant sur l'avenir du site trouvent leur origine tant dans l'activité humaine que dans les processus naturels.

L'atterrissement des marais provoque l'assèchement progressif de tous les groupement végétaux. C'est le phénomène responsable de la dynamique de la végétation, conduisant en principe, toute dépression humide à un stade forestier.

Divers indices permettent de penser que l'atterrissement des marais de la rive sud-est rapide; après quelque 100 ans d'évolution, la situation est la suivante:

- les $\frac{3}{4}$ des marais non boisés ont évolué jusqu'au stade des prairies marécageuses (dernier stade avant le boisement),
- $\frac{1}{3}$ de ces prairies (195 hectares) sont colonisés par les buissons à des degrés divers,
- les étangs ne couvrent que 17 hectares, soit le 2% de la surface des marais non boisés.

L'érosion du rivage, surtout active dans la partie sud du lac, est due à la rupture d'équilibre du rivage engendrée par l'abaissement des eaux il y a 100 ans. Les vagues buttent actuellement contre les sédiments meubles de l'ancienne beine; elles emportent au large les sables ou limons mal colmatés par la végétation.

Entre Yverdon et Yvonand, 33 hectares ont disparu entre 1934 et 1974. Le recul du rivage est de 1 à 2 mètres par an.

L'eutrophisation touche tous les lacs du Moyen-Pays. La fertilisation de l'eau par les engrais agricoles et les déchets de la civilisation a des effets clairement mis en évidence:

- la croissance accélérée des algues filamenteuses qui, en s'accumulant au pied des roseaux tendent à les casser,
- l'accumulation de déchets organiques sur le rivage,
- l'affaiblissement des tissus de soutien des roseaux.

Les variations du niveau du lac ont été fortement réduites à la suite de la 2ème correction des eaux du Jura. L'amplitude maximale est actuellement de 1,8 mètres alors qu'elle était de 3 mètres avant 1970. Par conséquent, l'inondation périodique des marais n'a plus lieu; l'atterrissement s'accélère et la forêt progresse plus rapidement sur les marais.

Les menaces directement liées à l'activité humaine:

- urbanisation, construction de voies de communication, développement touristique, navigation, etc...

sont également nombreuses. Leur énumération sortirait du cadre de cet exposé.

Démarche suivie pour la protection du site

La première étape a consisté à réunir la documentation sur la valeur écologique du site. En

effet, jusqu'à la fin des années 70, la rive sud-est est restée à l'écart des grands projets de recherche. En 1976, la Division «Protection de la nature et du paysage de l'Office fédéral des forêts» mandate un vaste travail de cartographie de la végétation et de recensement d'espèces végétales et animales. Puis, sous la menace de la construction de l'autoroute N1, les milieux de la protection de la nature établissent différents rapports sur la valeur naturelle globale de la région.

En 1977, les Offices d'aménagement du territoire des cantons de Vaud et Fribourg collaborent dans l'élaboration d'un plan directeur intercantonal de la rive sud-est. Celui-ci définit les zones à vocation de protection de la nature et celles vouées à d'autres fins; il mentionne parallèlement un ensemble de recommandations détaillées concernant la réglementation de l'activité humaine et la sauvegarde des zones naturelles.

La même année, la Ligue suisse pour la protection de la nature (LSPN) commence également un plan de protection qu'elle oriente de prime abord vers la sauvegarde des zones naturelles. Les deux plans, actuellement terminés, présentent une bonne compatibilité ainsi qu'une complémentarité dans la précision des propositions (Cantons: zones urbanisées, LSPN: zones naturelles).

En automne 1980, Pro Nature Helvetica (organe commun de la LSPN et du WWF-Suisse) lance une vaste campagne d'information et de récolte de fonds sur le thème «La Grande-Caricaie» ou rive sud du lac de Neuchâtel.

Cette action aboutit à une prise de conscience nationale de la valeur du site; elle permet également de rassembler la somme de 3 millions de francs, fonds nécessaires pour commencer l'entretien des zones naturelles. En effet, une simple mise en réserve ne suffit pas pour assurer la conservation du site. Il faut procéder à une protection active pour parer aux différentes menaces citées plus haut.

Par la signature d'une convention, les cantons du Vaud et Fribourg ont, en date du 15 juin 1982, confié la gestion des zones naturelles à la LSPN pour une durée de 5 ans. Le terme de «gestion» ne recouvre pas seulement les mesures d'entretien proprement dites, mais également la surveillance scientifique de l'évolution des milieux et l'indispensable information du public. Pour cette dernière activité, il est prévu de créer 4 «fenêtres d'information» le long de la

rive; les visiteurs auront la possibilité de s'y documenter et de visiter certaines zones naturelles intéressantes mais peu sensibles au dérangement. Le Château de Champ-Pittet, près d'Yverdon ainsi qu'un sentier-nature à Châbles constituent les deux premières infrastructures ouvertes au public.

Les mesures de protection des zones naturelles ont été étudiées et reportées sur plans par un groupe de travail spécialement chargé de la gestion de cette région. Ces mesures consistent notamment:

- dans le fauchage périodique des marais pour limiter l'atterrissement,
- dans le débroussaillage des prairies à laiches afin de conserver la dimension actuelle des marais non boisés,
- dans la consolidation du rivage pour freiner l'érosion,
- dans le recreusage d'étangs anciennement existants,
- dans l'exploitation modérée de certains forêts riveraines pour conserver leur composition actuelle,
- dans une régulation du niveau du lac compatible avec le maintien des marais.

On peut le constater, les tâches sont importantes et de longue haleine. Or, seule la réalisation intégrale de toutes les mesures permettra de conserver la valeur actuelle inestimable de cette vaste région.

La conclusion de cet exposé, destiné à éclairer un autre aspect, souvent masqué, de l'importance des terres organiques en Suisse, aura la forme d'un paradoxe: n'est-il pas curieux de constater qu'à quelques kilomètres de distance, de l'argent est dépensé pour le réassainissement de la plaine de l'Orbe alors même que l'on en dépense également pour parer à l'assèchement des marais de la rive sud-est du lac de Neuchâtel. Cela constitue sans doute en des nombreux sujets d'étonnement propres à une Suisse où chaque mètre carré de sol devient précieux, qu'il soit urbain, agricole ou naturel!

Bibliographie

- Antoniazza, M. 1979: Les oiseaux nicheurs des marais non boisés de la rive sud-est du lac de Neuchâtel. Université de Neuchâtel, travail de licence.
- Bruderer, B. et Thönen, W. 1977. Liste rouge des espèces d'oiseaux menacés et rares en Suisse. Nos Oiseaux No. 34, suppl.

Groupe de travail «Rives du lac de Neuchâtel», 1979: Valeur naturelle des rives et de l'arrière-pays du lac de Neuchâtel, Rapport. 41. pp.

Imboden, C. 1976, Eaux vivantes. Ed. Ligue suisse pour la protection de la nature, Case postale 73, 4020 Bâle, 240 pp.

Instituts de botanique des Université de Lausanne et Neuchâtel et de l'EPF Zürich. 1977: Cartes et rapport adjoint aux cartes de végétation et de l'impact de l'homme le long de la rive sud-est du lac de Neuchâtel. Etude réalisée sur mandat de la Division «Protection de la nature et du paysage» de l'Office fédéral des forêts.

Pro Nature Helvetica. 1981: Plan de protection de la rive sud-est du lac de Neuchâtel. Rapport. 96 pp.

Roulier, C. 1980: Etude phytosociologique et dynamique des groupements végétaux de la rive sud du lac de Neuchâtel. Université de Neuchâtel, travail de licence.

Adresse de l'auteur:

Christian Roulier, lic. biol.
Pro Nature Helvetica
Champ-Pittet
CH-1400 Cheseaux-Noréaz

Beurteilung der landwirtschaftlichen Ertragsfähigkeit von Torfmoorböden

Fritz Jäggli und Karl Peyer

Zusammenfassung

Aus der Mitarbeit bei Meliorationswerken im Berner Seeland ergaben sich verschiedene Ergebnisse aus Untersuchungen über die Beurteilung und das Verhalten der Moorböden im Hinblick auf Meliorationsmassnahmen.

Tieftorfige Moorböden zeigten eine starke Sackung von durchschnittlich 3 cm pro Jahr. Aus dem Sackungsverlauf ist ersichtlich, dass die Höhe des Grundwasserstandes die Sackungsrate massgeblich beeinträchtigt.

Die Ermittlung der Tauschwerte für Güterzusammenlegungen auf Grund der Bodenprofil- und Standortseigenschaften unter Berücksichtigung der landbaulichen Nutzung ergab ein Tauschverhältnis von etwa 2 Flächenteilen stark grundnassem Moorboden zu 1 Flächenteil Braunerdeboden.

Aus Versuchen zur experimentellen Bestimmung der potentiellen Eignung und Ertragsfähigkeit ist ersichtlich, dass ein auf 60 cm u. T. stabilisierter Grundwasserstand eine optimale Voraussetzung von Höchsterträgen ist.

Beim Übersanden als Meliorationsmassnahme muss darauf geachtet werden, dass die Schichtstärke genügend gross ist (30 cm) und der Schluffanteil im Decksand nicht zu hoch ist. Ertragserhebungen auf einer 2 ha grossen Versuchsfläche zeigten, dass bereits nach dem zweiten Jahr landesübliche Erträge zu erwarten sind.

Résumé

A l'occasion de la collaboration aux programmes d'amélioration du Seeland bernois, l'estimation des sols tourbeux a été effectuée et leur comportement a été suivi en relation avec les mesures d'assainissement; il en est résulté ce qui suit.

Les sols tourbeux profonds témoignent d'un fort tassement d'environ 3 cm par an. Le type de

tassement indique que la hauteur de la nappe phréatique porte un préjudice décisif au taux de tassement.

Le calcul de la valeur d'échange (pour remaniements parcellaires), effectué par examen du sol et de sa situation selon le point de vue de l'exploitation agricole, a mis en évidence un rapport d'échange de 2 à 1 entre un sol tourbeux fortement influencé par la nappe phréatique et un sol brun.

Des essais expérimentaux sur l'aptitude et la capacité productive des sols ont montré qu'une stabilisation à 60 cm de profondeur de la nappe phréatique était la meilleure condition pour l'obtention de rendements maxima.

En ce qui concerne la technique par recouvrement de sable, il faut veiller à ce que la couche sableuse soit suffisamment épaisse (30 cm) et pas trop silteuse. Les rendements obtenus sur 2 ha d'essais ont montré qu'après 2 ans déjà, ceux-là équivalaient à ce qu'on obtient habituellement dans le pays.

Einleitung

Je einlässlicher man sich mit den Fragen über die landwirtschaftliche Nutzung der Moore befasst, um so beeindruckender ist es festzustellen, wie eingehend bereits im vorigen Jahrhundert diesen Problemen nachgegangen wurde. Als wohl markantester diesbezüglicher Hinweis ist der Beschluss der «Zentral-Moor-Kommission» des Deutschen Reiches vom 6. August 1876 zur Errichtung einer Moor-Versuchsstation zu erwähnen (Pflug, 1891). Auch in der Schweiz bildete sich 1891 eine Moor-Kommission «zur Erforschung der schweizerischen Torfmoore und Sumpfsgebiete». Es wurde auch eine «Untersuchung der schweizerischen Moore» mit Hilfe eines Fragenkataloges gestartet (Moor-Kommission, 1891). Eines der drei Kommissionsmitglieder war Dr. F. G. Stebler, Leiter der «Schweiz. Samenkontroll-Sta-

Tabelle 1: Chemisch-physikalische Eigenschaften eines tieftorfigen, basenhaltigen Halbmoores (Nr. 35)

| Probentiefe cm Horizont | pH (H ₂ O) | Körnung | | org. C % | C /N | Porenvol Vol. % | Raumgewicht g TS/cm ³ |
|----------------------------|--------------------------|---------|------|-------------|---------|--------------------|-------------------------------------|
| %Ton | %Schluff | | | | | | |
| 5 / Of | 6,4 | 22,6 | 13,0 | 34,0 | 18,2 | 75,5 | 0,45 |
| 40 / OfT | 6,0 | 40,1 | 11,9 | 27,8 | 20,8 | 88,8 | 0,22 |
| 90 / Tr | 5,0 | — | — | 43,3 | 29,2 | 93,0 | 0,11 |

tion», der Vorgängerin der heutigen landwirtschaftlichen Forschungsanstalt Zürich-Reckenholz. Wieder im näheren Kontakt mit den Problemen der Moorböden trat man dann im Zusammenhang mit den Meliorationsvorhaben der zweiten Juragewässerkorrektion, woraus sich im wesentlichen die nachfolgenden Untersuchungsergebnisse ergaben.

Moorbodentypen; Ausbildung und Flächenanteile

Tieftorfige Moorböden

Nach Definition bezeichnen wir Moorböden mit mehr als 90 cm Torfschicht als tieftorfig. Im

Berner Seeland beträgt die Torfmächtigkeit dieser Böden meistens 100 bis 200 cm. In der Talmitte findet man vereinzelt Torfe von 3 m Tiefe. Die wichtigsten chemisch-physikalischen Eigenschaften eines solchen Bodens zeigt Tab. 1. Typisch sind der grosse Porenanteil der bereits ab 30 cm Tiefe rund 90 Vol. % beträgt und der relativ geringe Anteil an pflanzenproduktivem (leicht verfügbarem) Wasser (Abb. 1). Der pH-Verlauf zeigt an, dass die meisten Torfe ursprünglich sauer waren. Sie wurden dann aber durch den Überflutungslehm und namentlich durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung und durch sehr verbreitete schwache Übersättigungen neutralisiert.

Physikalischer Aufbau eines tieftorfigen, basenhaltigen Halbmoores (Messstelle 35)

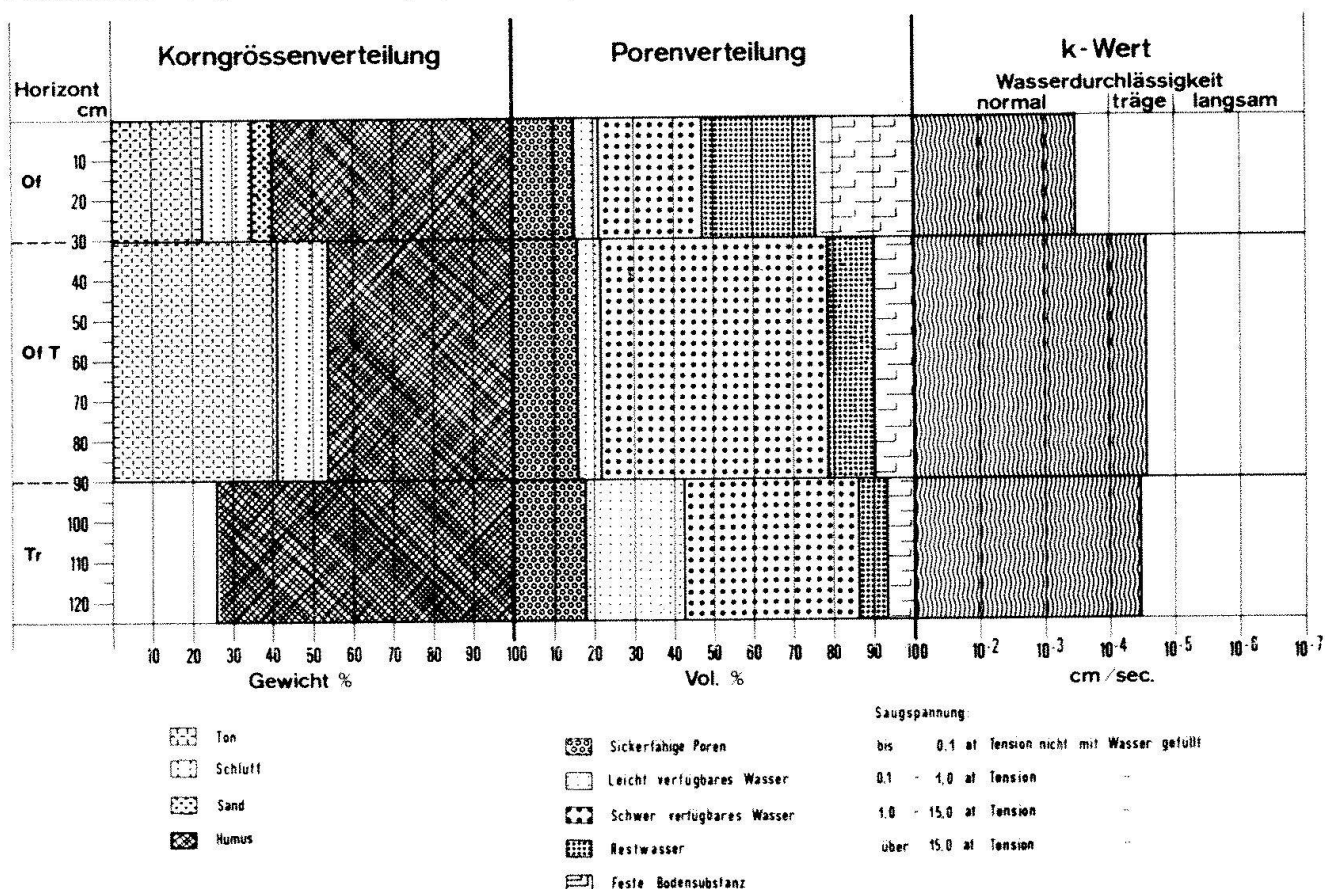


Abbildung 1: Physikalischer Aufbau eines tieftorfigen Halbmoores.

Flachtorfige Moorböden

Beträgt die Auflage an organischem Material zwischen 40 und 90 cm, so bezeichnen wir diese Böden als flachtorfige Moore. Ihr übriger chemisch-physikalischer Aufbau ist den tieftorfigen Böden sehr ähnlich. Misst die Moordecke weniger als 40 cm, so werden sie den mineralischen Nassböden als anmoorige Gleye zugeordnet.

Die Flächenanteile der Moorbödenuntertypen Im Berner Seeland sind seit 1969 umfangreiche Gesamtmeliorationen im Gange. In den Gemeinden Ins, Gampelen, Gals, Brüttelen, Finsterhennen, Siselen, Treiten, Erlach und Tschugg, sowie in Teilen der Gemeinden Lüscherz, Hagneck, Walperswil und Barga wurden durch die Eidg. Forschungsanstalt Zürich-Reckenholz Bodenkartierungen auf einer Fläche von insgesamt 5350 ha ausgeführt. Die Flächenanteile und der Zustand der Moorböden anfangs der 70er Jahre wurde dabei aufgenommen und kartographisch dargestellt.

In der Ebene des Berner Seelands zwischen Neuenburgersee, Zihlkanal, Bielersee und Hagneck-Kanal (430 bis 440 m ü.M.) liegt davon ein Anteil von 3743 ha. Die vorkommenden Böden gliedern sich in grundnasse organische Böden (Moore), ferner in grundnasse bzw. stau-nasse anorganische Böden (Gleye bzw. Pseudogleye) sowie in die künstlich oder natürlich drainierten jungen Alluvialböden (Fluvisole und alluviale Kalkbraunerden).

Tieftorfige Moore sind mit 1076 ha fast zusammenhängender Fläche im Berner Seeland stark verbreitet (Tab.2). Flachtorfige Moore finden sich vorwiegend an den Rändern der ausgedehnten tieftorfigen Areale oder in Gebieten mit jahrzehntealter starker Grundwasserabsenkung. Ihr Flächenanteil beträgt 812 ha.

Die geographische Ausbreitung dieser beiden Typen ist in Abbildung 2 dargestellt.

Tabelle 2: Flächenanteile der Alluvialebene

| | |
|------------------------|--------------------|
| Tieftorfige Moorböden | 1076 ha oder 28,6% |
| Flachtorfige Moorböden | 812 ha oder 21,6% |
| Anmoorgley | 631 ha oder 16,8% |

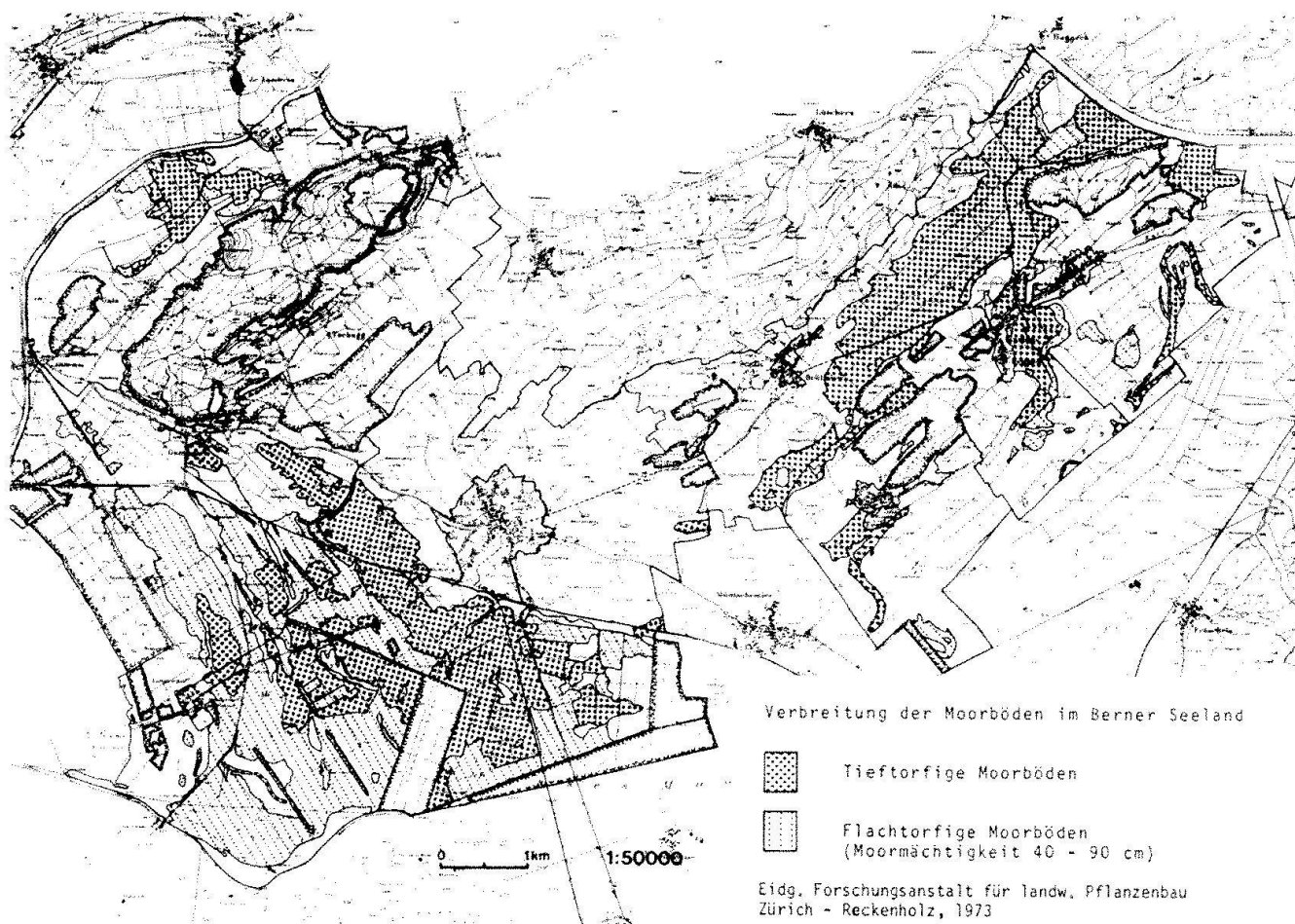


Abbildung 2: Verteilung der Moorböden im Berner Seeland.

Im Übergangsgebiet zu nicht grundwasserbeeinflussten Mineralböden liegen vornehmlich Anmoorgleye mit einer Fläche von 631 ha (Frei et al., 1972).

Die Sackung verschiedener Moorbodentypen

Obwohl die Sackung der Moorböden ein altbekanntes Problem ist, hat man bis anhin keine genauen Angaben über die Grösse und den Verlauf dieses Vorganges unter schweizerischen Verhältnissen. Aus diesem Grunde wurden drei Sackungsmeßstellen installiert. Je eine unter Dauergrünland auf einem tief- und einem flachtorfigen Halbmoor sowie eine unter ackerbaulicher Nutzung auf einem flachtorfigen Standort (Jäggli und Juhasz, 1982).

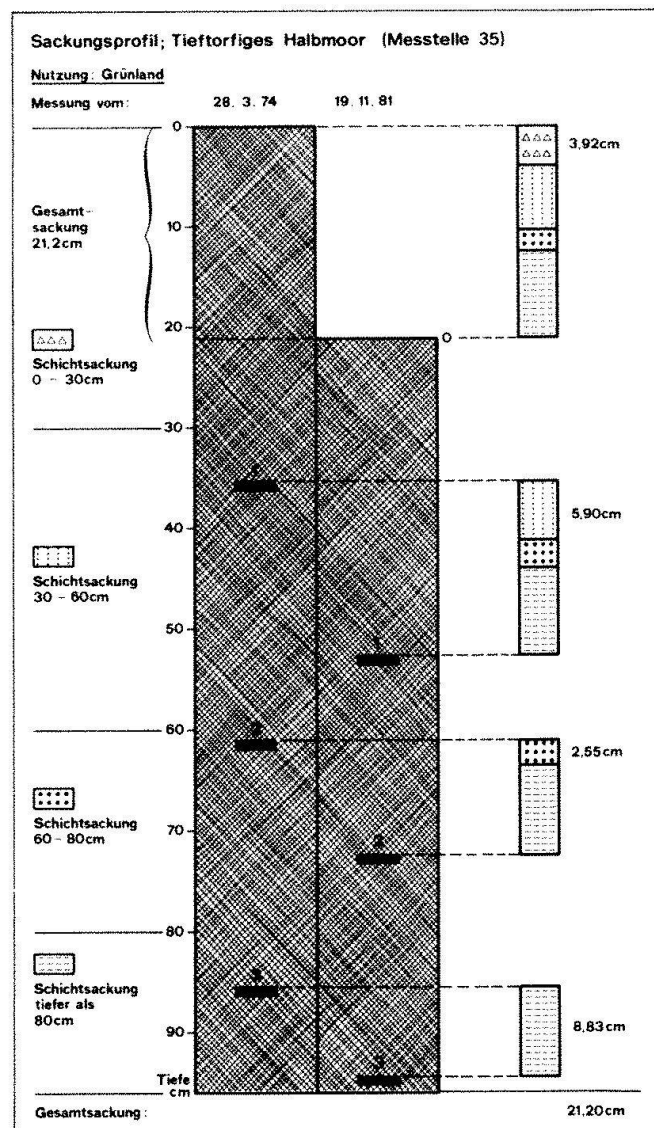


Abbildung 3: Sackungsprofil; Tieftorfiges Halbmoor.

Abbildung 3 zeigt als Beispiel die Verhältnisse in einem tieftorfigen Moor. Die an der Oberfläche gemessene Gesamtsackung zwischen 1974 und 1981 beträgt insgesamt 21,2 cm oder 3 cm pro Jahr.

Teilt man diesen Gesamtbetrag auf die einzelnen Schichten auf, so ergibt sich folgendes Bild:

| | |
|--------------------|--------------------------------------|
| Schicht 0–30 cm = | 3,9 cm |
| | entsprechend 1,3 cm je 10 cm-Schicht |
| Schicht 30–60 cm = | 5,9 cm |
| | entsprechend 2,0 cm je 10 cm-Schicht |
| Schicht 60–80 cm = | 2,6 cm |
| | entsprechend 1,3 cm je 10 cm-Schicht |
| tiefer als 80 cm = | 8,8 cm |
| Total = | 21,2 cm |

Auf Grund dieser Werte lässt sich folgendes festhalten:

- Der Anteil der Sackung im Untergrund (unterhalb 80 cm Tiefe) ist mit 8,8 cm entsprechend 41,5% wesentlich an der Gesamtsackung beteiligt.
- Mit einer Schichtsackung von 2 cm pro 10-cm-Schicht ist die Sackung zwischen 30–60 cm Tiefe, oberhalb 80 cm, am stärksten.
- Mit 1,3 cm pro 10-cm-Schicht liegt die Sackung zwischen 0–30 cm gleich gross wie zwischen 60–80 cm Tiefe.

Diese Werte zeigen, dass bei tieftorfigen Böden die Sackung ein Vorgang ist, der sich nicht allein auf die oberflächennahen Bodenschichten bezieht. Nebst dem momentanen Vergleich zwischen 1974 und 1981 gibt der Sackungsverlauf während dieser Zeitperiode ebenfalls wertvolle Hinweise. Der in Abbildung 4 zusammengestellte Sackungsverlauf scheint im wesentlichen auf zwei Punkte hinzuweisen:

- Relativ am ausgeglichensten ist der Sackungsverlauf in der oberflächen-nächsten Schicht bis 30 cm Tiefe. Die folgende Zusammenstellung zeigt die entsprechenden Sackungsraten zwischen den beiden Daten:

| Sackungsrate in cm | 25.4. | 3.11. | 14.5. | 7.10. | 18.8. | 3.5. | 30.4. | 19.11. |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|--------|
| | 75 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 |
| | 0,0 | 0,6 | 0,6 | 0,2 | 0,8 | –0,3 | 0,6 | 1,1 |

Sieht man von den für die gegebenen Versuchsbedingungen unvermeidlichen Extremwerten ab (Sackungsrate zwischen dem 15.4.1976 bis 7.10.1977 und vom 18.8.1978 bis 3.5.1979), so ergibt sich eine mittlere Jahresrate von 0,9 cm. Der höchste Wert ist dabei 1,20 cm (Periode 3.11.1975 bis

14.5.1976 = in 6 Mt. 0,6 cm = 1,2 cm Jahresrate) und der tiefste 0,6 cm (Periode 3.5.1979 bis 30.4.1980).

- Markant im Sackungsverlauf der tieferen Moorschichten ist dagegen der eher sprunghafte Ablauf. Ein solcher Sprung trat in der Schicht 30–60 cm Tiefe vom 14.5.1976 bis 7.10.1977 mit einer Sackung von 3,3 cm, entsprechend einer Jahresrate von 2,3 cm, auf. Eine ähnliche starke Setzung ergab sich auch in der Schicht tiefer als 80 cm zwischen dem 30.4.1980 und dem 19.11.1981 mit einer Rate entsprechend einem Jahreswert von 2,8 cm.

Diese sprunghaften Veränderungen deuten darauf hin, dass als Ursache dafür ein ebenfalls plötzlich auftretender Einfluss, wie zum Beispiel starke Austrocknung bedingt durch das starke Absinken des Grundwasserspiegels, am ehesten in Frage kommt. Vergleicht man die Messergebnisse aller Standorte miteinander, so ergeben sich folgende Feststellungen:

Gesamtsackung

Einen wesentlichen Einfluss auf die Setzung hat die Torfmächtigkeit, indem mit abnehmender Mächtigkeit auch die Sackung abnimmt (Tab. 3). Mit einer Gesamtsackung von 21,2 cm in sieben Jahren oder 3,0 cm pro Jahr wurden im tieftorfigen Halbmoor ganz erhebliche Setzungen festgestellt. Aber auch bei einer Torfmächtigkeit von nur 60 cm ergab sich noch eine Sackung von 8,5 cm oder 1,2 cm pro Jahr.

Diese Zahlen zeigen, dass die Sackung in diesen Böden, unabhängig von der Torfmächtigkeit, anhaltend weitergeht.

Sackungsverlauf und Schichtsaackungsanteile

Vergleicht man die verschiedenen Sackungsverläufe miteinander, so stellt man fest, dass insbe-

sondere beim tieftorfigen Standort sprunghaft, starke Sackungen im Unterboden auftraten. Erklärbar sind diese Erscheinungen am ehesten mit plötzlichem Austrocknen des Torfes. Da bei diesen Böden diese Untergrundsackungen einen beträchtlichen Anteil an der Gesamtsackung ausmachen, sollte bei ihnen unbedingt darauf geachtet werden, dass der Grundwasserstand immer genügend hoch ist.

Etwas anders sind die Verhältnisse bei den flachtorfigen Halbmooren, dort finden sich die grössten Schichtsaackungen in den oberflächennahen Bodenabschnitten. Sie betragen 1,9 resp. 1,2 cm für eine 10-cm-Schicht oder 0,2 bis 0,3 cm pro Jahr und 10 cm Mächtigkeit. Dieser Wert gilt auch für das tieftorfige Halbmoor und scheint eine standortunabhängige Verlustrate für die obersten 20 bis 30 cm zu sein. Dies würde bedeuten, dass der Torfabbau allein in der Ackerkrume pro Jahr rund 0,5 cm beträgt.

Potentielle Eignung und Ertragsfähigkeit der Moorböden

Um die potentielle Ertragsfähigkeit experimentell erfassen zu können, wurde an unserer Anstalt ein Kleinparzellenversuch mit den 12 wichtigsten Bodentypen der Schweiz angelegt. Darunter sind auch ein tieftorfiger und ein flachtorfiger Moorboden aus dem Berner Seeland. Das Wasserregime dieser Böden wird durch die Regulierung des Grundwasserstandes so gesteuert, dass er während der Vegetationszeit konstant bei 60 cm und während dem Winterhalbjahr bei 30 cm u. T. liegt. Die Relativerträge dieser Untersuchungsserie von 1972 bis 1976 sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Daraus geht eindeutig die grosse potentielle Ertragsfähigkeit der Moorböden hervor, erreichten sie doch mit insgesamt 100 resp. 97% die beiden höchsten Werte und war auch bei den Einzeljahreserträgen der Höchstertrag immer auf einem der beiden Moorböden. Wenngleich diese potentielle Leistungsfähigkeit auch nicht direkt auf den Grossanbau übertragbar ist, zeigten diese Versuchsergebnisse, dass die Grundwasserstabilisierung auf 60 cm u. T. während der Vegetationszeit eine optimale Voraussetzung zur Erreichung von Höchsterträgen ist. Eine Sackung der Moorböden bei diesem Wasserregime war bis heute (seit 10 Jahren) nicht festzustellen.

Tabelle 3: Zusammenstellung der Gesamtsackung und der Sackungsraten

| Bodentyp /-nutzung | Torfmächtigkeit in cm | Sackung | |
|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------|
| | | Insgesamt 1974–1981/80* in cm | Pro Jahr in cm |
| Tieftorf. Halbmoor Grünland | > 150 | 21,2 | 3,0 |
| Flachtorf. Halbmoor Grünland | 90 | 10,2* | 1,7 |
| Flachtorf. Halbmoor Ackerland | 60 | 8,5 | 1,2 |

Tabelle 4: Relative potentielle Ertragsfähigkeit verschiedener Bodentypen

(Höchstertag = 100)

| Bodentyp | Wasserhaushalt | 1973 Körnermais | 1974 S'weizen | 1975 Kartoffeln | 1976 S'gerste | Total 1973/76 |
|----------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|------------------|
| Karbonatreicher Fluvisol | } mässig trocken | 55 | 86 | 90 | 81 | 76 |
| Kalkbraunerde auf Schotter | | 56 | 71 | 63 | 69 | 64 |
| Sandiger Fluvisol | | 66 | 85 | 69 | 69 | 72 |
| Basenreiche Braunerde | } mässig frisch | 61 | 75 | 84 | 80 | 75 |
| Verbraunte Rendzina | | 57 | 83 | 79 | 67 | 71 |
| Saure Braunerde | | 74 | 88 | 98 | 92 | 88 |
| Alluviale Kalkbraunerde | } frisch | 61 | 79 | 86 | 92 | 79 |
| Braunerde-Gley | | 67 | 82 | 71 | 84 | 76 |
| Parabraunerde | | 45 | 70 | 82 | 73 | 66 |
| Flachtorfiges Halbmoor | } grundmass; GW- stand auf 60 cm u.T. stabilisiert | 90 | 100 | 100 | 95 | 97 |
| Fahler Gley | | 67 | 83 | 82 | 93 | 81 |
| Tieftorfiges Halbmoor | | 100 | 90 | 98 | 100 | 100 |

Zusammenfassend lässt sich daher bezüglich der potentiellen Eignung ableiten, dass es bei einem stabilisierten Grundwasserstand der Moorböden im Bereich von 60 cm u. T. für sie keine wesentlichen Einschränkungen gibt, im Hinblick auf die natürlichen Verhältnisse ein hoher Grundwasserstand die Grünlandnutzung aber sicher weniger beeinträchtigt.

Tauschwerte der vorkommenden Moore

Im Berner Seeland wurden zu Beginn der Gesamtmelioration die Bodentauschwerte ermittelt. Die Bewertung basiert auf der von den Bodenprofil- und Standortseigenschaften abgeleiteten potentiellen Ertragsfähigkeit unter Berücksichtigung der landbaulichen Nutzungseig-

Tabelle 5: Tauschwerte der Böden des Berner Seelands in Form von Fruchtbarkeitsstufen und Punktzahlen

| Böden der Talebenen | Fruchtbarkeits- stufen | Bodenpunkt- zahlen | Limitierende Eigenschaften |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------|
| <i>Organische Nassböden</i> | | | |
| Moore, tieftorfig, sauer, stark grundnass (Grdw. stand bis 30 cm u.T.) | 5 = genügend | 35 – 38 | dauernd grundnass, mangelnde Durchlüftung, stark abbauegefährdet |
| " " neutral, natürlich überschüttet mit tonig/schluff. Lehm | 5 = genügend u. 4 = gut | 46 – 55 | wechselnd grundnass |
| " " neutral, künstlich übersandet (Grdw. stand bis max. 70 cm u.T.) | 3 = sehr gut | 75 | |
| " flachtorfig, auf Schlufflehm (Seekreide), stark grundnass | 5 = genügend | 40 – 48 | dauernd grundnass gefügelabil, bei Entwässerung schwundrissig |
| " flachtorfig, auf Sand | 4 = gut | 52 – 60 | grundnass, bei Entwässerung wenig trittfest und befahrbar |
| <i>Anorganische Nassböden</i> | | | |
| Roh-Gley, Anmoor auf Grobsand | 4 = gut | 55 – 67 | grundnass, bei Entwässerung wenig trittfest und befahrbar |
| Fahler Gley, stark grundnass, anmoorig, Schlufflehm | 5 = genügend u. 4 = gut | 45 – 55 | grundnass, gefügelabil |
| Buntgley (drainierter Fahlgley, sandig/lehmig) | 4 = gut | 58 – 67 | wechsellnass |
| Pseudogley, staunass, tonig/schluffig | 4 = gut | 60 – 69 | stauend, gefügelabil |
| <i>Anorganische, senkrecht durchwachsene alluviale Böden</i> | | | |
| Fluvisole, kompakt, pseudogleyig | 4 = gut | 60 – 68 | mässig stauend, gefügelabil |
| Fluvisole, mullreich, tiefgründig | 3 = sehr gut | 70 – 75 | |
| Kalkbraunerden, alluvial, gleyig | 3 = sehr gut | 72 – 78 | |
| Kalkbraunerden, schwach pseudogleyig, tiefgründig | 3 = sehr gut | 78 – 84 | |
| <i>Zum Vergleich:</i> | | | |
| Braunerden, sehr tiefgründig, Terrassen | 2 = ausgezeichnet | 85 – 94 | |

nung. Mehr als 500 Bodenprofile stellten ein Netz von Tauschwert-Fixpunkten dar; diese und die Bodenpunktzahlkarten M 1:1000 bildeten die Grundlage für die Bodenbonitierung durch die Schätzungskommission.

In der Tabelle 5 sind die Tauschwerte ausgewählter Böden des Berner Seelands in Form von Fruchtbarkeitsstufen und Bodenpunktzahlen aufgeführt (Tab. 6). Tieftorfige, stark grundnasse Moore der Talebenen und Talmulden erzielten durchschnittlich weniger als den halben Tauschwert, verglichen mit der uneingeschränkt im Fruchtwechsel nutzbaren, sehr tief-

gründigen Braunerde der Terrassen und Flachhänge mit langfristig ausgezeichneter Fruchtbarkeit. Als limitierende Eigenschaften der Moore sind der hohe oder stark wechselnde Grundwasserstand, die damit zusammenhängende mangelhafte Durchlüftung und Durchwurzelung, der unausgeglichene chemisch-mikrobiologische Zustand der Torf- und Moormasse, die ungenügende Befahrbarkeit der grobporösen Mooroberfläche, insbesondere aber die Torfabbau- und Sackungsgefahr bei tiefer Grundwasserabsenkung zu betrachten. Die durchgeführte Bewertung der Böden des

Tabelle 6: Die Fruchtbarkeitsstufen und Bodenpunktzahlen der Böden der Schweiz

(= Ertragsfähigkeit des Bodens, unter Berücksichtigung d. standörtlichen, landw.-pflanzenbaul. Nutzungseignung, beurteilt aufgrund d. Profileigenschaften)

- | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| (1) <i>bevorzugt fruchtbar</i> | 90 – 100 Bodenpunkte |
| Standorte mit besten Bodenprofileigenschaften sowie mit besonders günstigen Bodentemperatur- und Niederschlagsverhältnissen im tieferen Mittelland. Intensivkulturen, wie Obstanlagen, Garten- und Gemüsebau, sind auf diesen Böden vorzüglich am Platze. Sie eignen sich vor allem auch für einen uneingeschränkten Ackerfruchtwechsel. | |
| (2) <i>ausgezeichnet fruchtbar</i> | 80 – 89 Bodenpunkte |
| Diese Standorte eignen sich für einen vielseitigen Fruchtwechsel. Der Landwirt ist in der Wahl der Kultur nicht eingeeengt, weil jede mit ausgezeichnetem Erfolg anbaubar ist. Bei Intensivkulturen bestehen jedoch Einschränkungen. | |
| (3) <i>sehr gut fruchtbar</i> | 70 – 79 Bodenpunkte |
| Bestimmte Kulturarten sind mit sehr gutem Erfolg anbaubar. Die Qualitätsverminderung gegenüber Stufe 2 äussert sich nicht in der Ertragsfähigkeit des Bodens, sondern vielmehr in der Begrenzung der Kulturwahl. | |
| (4) <i>gut fruchtbar</i> | 50 – 69 Bodenpunkte |
| Bestimmte Kulturarten sind mit gutem Erfolg anbaubar; bei richtiger Kulturwahl sind gute Erträge erzielbar. Kulturwahl und Ertragsfähigkeit des Bodens sind eingeschränkt. | |
| (5) <i>genügend fruchtbar</i> | 35 – 49 Bodenpunkte |
| Bestimmte Kulturarten sind mit genügendem Erfolg anbaubar. Eine durchschnittliche Ertragsfähigkeit wird jedoch auf die Dauer nur mit standortgerechten Kulturen erzielt. In diese Stufe fallen zum Beispiel die stärkere Limitierungen aufweisenden Böden des Mittellandes und die tiefgründigen Profile der Gebirgslagen. | |
| (6) <i>ungenügend fruchtbar</i> | 20 – 34 Bodenpunkte |
| Die Ertragsfähigkeit des Bodens ist auch bei guter Betriebsführung ungenügend. Grössere Investitionen können hier unwirtschaftlich sein. Daher ist eine ziemlich extensive Bebauung angezeigt (zum Beispiel Extensivweiden). | |
| (7) <i>gering fruchtbar</i> | 10 – 19 Bodenpunkte |
| Diese Böden sind nur beschränkt landwirtschaftlich nutzbar. Zum Beispiel wird in diese Stufe absolutes, extensives Weideland der Gebirgslagen mit Mängeln im Bodengerüst oder in der Wasserführung eingereiht. | |
| (8) <i>sehr gering fruchtbar</i> | 0 – 9 Bodenpunkte |
| In diese Stufe fallen die nur ganz beschränkt oder eventuell nur durch grössere, kaum gerechtfertigte Meliorationsmassnahmen landwirtschaftlich nutzbaren Standorte; Böden in rauen Gebirgslagen mit extremem Steingehalt und ungünstigen Wasserverhältnissen sowie Böden in ausgesprochenen Steillagen werden hier eingestuft. | |

Ausserhalb des landwirtschaftlichen Schätzungsrahmens:

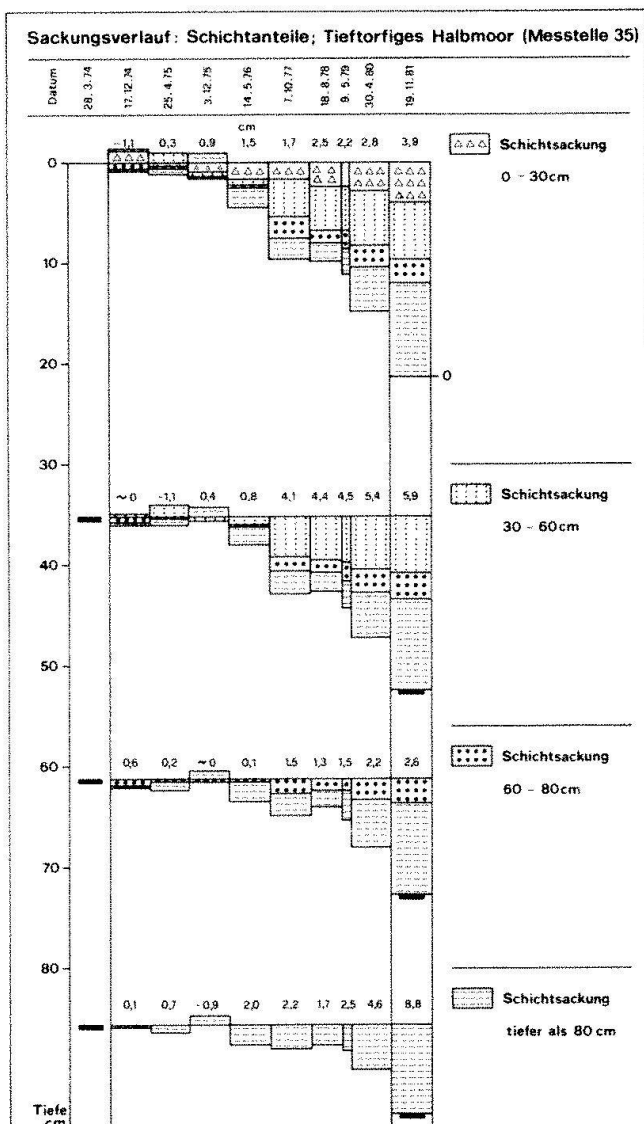
- (9) Für landwirtschaftliche Nutzung ausser Betracht fallende Böden.

8046 Zürich, Mai 1982

Eidg. Forschungsanstalt
für landw. Pflanzenbau
Zürich-Reckenholz

Tabelle 7: Übersandungsversuch Gampelen BE

| | | Erträge in % der landesüblichen Durchschnitt 1971 bis 1974 | | | |
|-----------------|------------------|------------------------------------------------------------|----------------|------------------|------------------------------------|
| | | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 |
| Parz. 70 Nord | Körnermais | | Sommerweizen | Roggen | Speisekartoffeln |
| A. Tschilar | Körner: 64,2% | | Körner: 73,1% | Körner: 112,5% | Knollen: 65,5% |
| | | | Stroh: 106,2% | Stroh: 127,5% | |
| Parz. 70 Mitte | Sommergerste | | Silomais | Winterweizen | Raps |
| R. Käch-Martig | Körner: 92,2% | | Gesamt- 93,2% | Körner: 81,0% | Körner: 106,7% |
| | Stroh: 133,4% | | ertrag: | Stroh: 153,8% | |
| Parz. 70 Süd I | Sommerweizen | | Winterroggen | Speisekartoffeln | Sommerweizen |
| F. Käch-Meyer | Körner: 74,6% | | Körner: 99,1% | Knollen: 152,2% | Körner: 132,0% |
| | Stroh: 94,6% | | Stroh: 117,5% | | Stroh: 161,8% |
| Parz. 70 Süd II | Speisekartoffeln | | Wintergerste | Zuckerrüben | |
| | Knollen: 88,8% | | Körner: 114,5% | Rüben: 87,3% | |
| Parz. 1349 | Speisekartoffeln | | Winterweizen | | |
| F. Wenker | Knollen: 57,3% | | Körner: 69,8% | | |
| | | | Stroh: 123,1% | | |
| Parz. 1408 | Hafer | | | | Kartoffeln für techn. Verarbeitung |
| F. Vogel | Körner: 66,8% | | | | Knollen: 92,9% |
| | Stroh: 60,6% | | | | Stärkeertrag: 95,7% |



Berner Seelandes ergab ein ungefähres Tauschverhältnis von 2 Flächenteilen Moorboden zu 1 Flächenteil Braunerde bei der Neuzuteilung. Bodenmeliorationen konzentrierten sich im Hinblick auf langfristige Erfolgsaussichten auf die Entwässerung anorganischer Nassböden; bei den Mooren stand nicht eine tiefe Grundwasserabsenkung, sondern lediglich eine Grundwasserstabilisierung auf hohem Niveau im Vordergrund.

Übersandung als Meliorationsmassnahme bei Moorböden

Mit der Sandüberdeckung als Meliorationsmassnahme bei tieftorfigen Moorböden sind in Holland und Norddeutschland gute Resultate erzielt worden. Ein Versuch in Witzwil mit unterschiedlicher Mächtigkeit der Sanddeckschicht führte zum Schluss, dass an die Qualität des Sandes und an das Übersandungsverfahren grosse Ansprüche gestellt werden muss. Sand mit vorwiegender Korngrösse von 0,1 bis 0,5 mm Durchmesser und nur geringem Schluffanteil ist zu verwenden, um eine ausreichende Durchlässigkeit zu gewährleisten. 30 cm Deckschicht (vgl. Abb. 5) wird als günstig be-

Abbildung 4: Sackungsverlauf; Tieftorfiges Halbmoor.

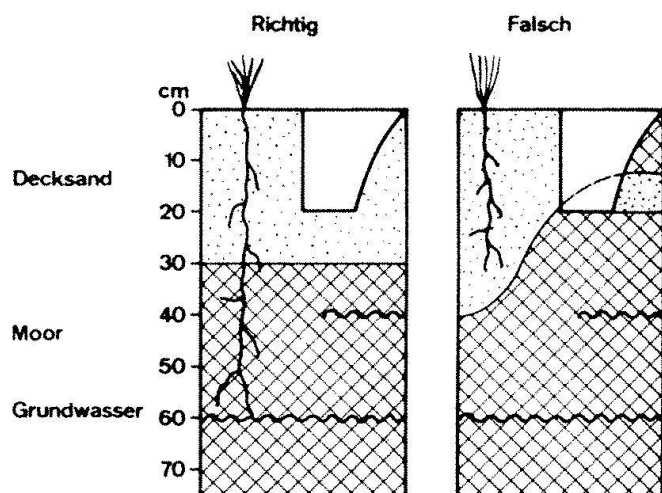


Abbildung 5: Schematischer Profilschnitt: Richtig übersandet und zu schwach übersandet bei unebener Mooroberfläche.

trachtet. Sie erweist sich als mächtig genug, um bei der Bearbeitung keinen unterliegenden Torf einzumischen und als nicht zu mächtig, um der Gefahr der starken Austrocknung mangels kapillarem Grundwasseraufstieg zu begegnen.

Im Rahmen der Gesamtmelioration wurde 1971 in Gampelen als Variante der Moorbodenverbesserung eine 2 ha grosse Fläche übersandet. Resultate von Ertragserhebungen aus vier Jahren sind in Tab. 7 zusammengestellt. Die Erträge von Ackerkulturen in einer Fruchtfolge sind in Prozenten von mittleren Ertragszahlen aufgeführt. Sie erreichen im Durchschnitt bereits in den ersten zwei Jahren zu 90 % schweizerische Ertragsmittel, und übertreffen diese in den folgenden beiden Jahren um 14 %. Nicht berücksichtigt sind in diesen Relationen die Vorteile der erleichterten Bodenbearbeitung in der Sanddeckschicht.

Aufgrund dieser erfolgversprechenden Anfangsergebnisse wurde 1976 in Gampelen ein Areal von mehr als 20 ha tieftorfigem Moor im Ziegelmoos übersandet. Der Decksand entstammte den «Isleren»-Dünenwällen und wurde mit Transportfahrzeugen aufgeführt. Nach ersten Erfahrungen kann dieses Meliorationsverfahren als langfristig günstiger Weg ge-

sehen werden, Moorböden ohne wesentliche Sackung und Zersetzung der Torfs bei minimaler Grundwasserabsenkung ackerbaulich nutzen zu können.

Literatur

- Pflug A.: Die wirtschaftliche Erschliessung der im Deutschen Reiche belegenen Moorflächen. Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft, Heft III, 1891.
- Moor-Kommission der Schweiz. Naturforsch. Gesellschaft., Untersuchung der schweizerischen Moore. Genossenschafts-Buchdruckerei Zürich, 1891.
- Frei E., Peyer K., Jäggli F.: Verbesserungsmöglichkeiten der Moorböden des Berner Seelandes. Mittl. Schweiz. Landw., 20, Nr. 7, 197–210, 1972.
- Jäggli F. und Juhasz P.: Verlauf und Grösse der Moorsackung im Berner Seeland. Schweiz. Landw. Forschung, im Druck, 1982.

Adresse der Autoren:

Dr. Fritz Jäggli
 Dr. Karl Peyer
 Eidg. Forschungsanstalt für landw. Pflanzenbau
 CH-8046 Zürich-Reckenholz

Synthèse

Jean A. Neyroud

Les 10 exposés présentés ont mis en évidence certains aspects particuliers de l'étude et de l'utilisation des sols organiques. Si l'on tente une synthèse des opinions exprimées, on essaiera de répondre aux quatre questions suivantes:

- Reste-t-il suffisamment de biotopes caractéristiques de hauts-marais, de bas-marais et d'autres sols organiques dans notre pays?
- Un diagnostic de la dégradation des sols organiques peut-il être posé?
- Les sols organiques agricoles peuvent-ils continuer à être cultivés en limitant leur dégradation au maximum?
- Quelles options différentes sont-elles possibles?

Inventaire des sols organiques

Un groupe de travail est actuellement occupé à dénombrer les hauts-marais de Suisse. Ces biotopes existent encore, mais ils sont pour la plupart touchés par des activités humaines et sont soumis à de très grands dangers de dégradation par des eaux trop riches en fertilisants: chaque année, plusieurs hauts-marais disparaissent ainsi.

Les bas-marais sont un peu plus nombreux; comme leur stabilité écologique est plus grande, leur situation n'est pas aussi alarmante que celle des hauts-marais. D'une manière générale, il conviendrait d'entreprendre quelques actions de protection des marais, afin de maintenir au moins quelques sites dans leur état naturel; il y va également du maintien de notre patrimoine floristique et faunistique. Une bonne protection exige la suppression de toute activité humaine sur le marais, à l'exception des activités de protection, ainsi que l'élimination systématique des eaux chargées en fertilisants aux alentours du marais. Un équilibre naturel est à recréer dans le marais.

Les autres sols organiques, par exemple ceux utilisés pour la production agricole, sont encore assez nombreux. Cependant la production agri-

cole sur de tels sols deviendra très difficile, à mesure que la couche organique diminue d'épaisseur.

Diagnostic de la dégradation de sols organiques

Tout abaissement du niveau de la nappe phréatique, fertilisation, et pratique d'agriculture intensive aboutit irrémédiablement à la dégradation du sol organique. L'apport d'air et de fertilisants dans la tourbe crée à nouveau des conditions propices à l'activité microbienne, qui va rapidement dégrader les substrats présents. Les sols organiques agricoles les moins touchés par la dégradation sont précisément ceux qui sont recouverts de prairie, et ceux où le niveau de la nappe phréatique ne s'abaisse pas au-dessous de 60 cm de la surface.

La précipitation du fer ferrique dans les orifices des drains est un signe indiquant que l'assainissement du sol est en cours, par évacuation des eaux et abaissement du niveau de la nappe phréatique.

La culture légumière intensive cause la dégradation la plus rapide de la tourbe: la fertilisation est copieuse, les racines de plantes à courte durée de végétation ne parviennent pas à recycler la masse de fertilisants et d'éléments chimiques minéralisés et les sols restent longtemps sans couverture végétale.

On constate que le niveau des sols organiques assainis tend à s'abaisser: L'eau éliminée du sol par drainage a fait place à un volume équivalent d'air plus facilement compressible sous le poids de la matière solide. Le tassement peut atteindre 1-2 cm par année, auquel s'ajoute une perte annuelle de quelques millimètres par minéralisation des substrats.

Maintien des sols organiques agricoles

Le maintien de la production agricole sur les sols organiques est possible. Il convient toute-

fois d'avoir à l'esprit que de tels sols perdent progressivement leur substance. Un premier signal d'alarme survient lorsque l'épaisseur de la couche organique devient inférieure à 100 cm, et ne garantit plus des conditions hydrologiques et agronomiques satisfaisantes. A ce stade, l'observation des sous-sols minéraux est nécessaire:

- En présence d'un horizon de craie lacustre, la destruction de la couche organique doit être arrêtée: la craie est en effet totalement impropre à la culture. Une modification complète des techniques culturales doit être envisagée: prairies, niveaux de nappes élevés,...
- En présence d'un horizon riche en sable, le mélange de cet horizon avec la couche organique est envisageable. Des techniques éprouvées de labour profond sont disponibles.
- En présence d'un horizon riche en silt, un mélange par labour profond créera un milieu défavorable (hétérogénéité du mélange, grosses mottes à terdence hydromorphe,...). Des techniques de recouvrement par une couche de sable sont envisageables, pour autant que le matériau favorable se trouve à proximité.

Dans tout les cas, il convient de savoir que la mise en culture du sol organique aboutit à sa lente dégradation. Il s'agit peut-être ici du seul exemple où l'agriculture contribue à la destruction du sol. Les milieux concernés doivent en être conscients.

Options possibles

Sur le papier, l'option la plus simple paraît être *l'option de protection des sites*. Son intérêt est cependant fortement limité par les impératifs financiers (investissements consentis), économiques (maintien de la production agricole) et sociaux (postes de travail,...) en jeu. Cette option est donc à réserver à un nombre limité de sites présentant également un intérêt historique et géographique: les zones tourbeuses, exploitées jusque dans un passé récent, offrent des paysages particuliers, qui permettent d'imaginer l'activité humaine ancienne, la relation entre l'homme et le climat, l'homme et l'eau, etc...

L'option du laisser-faire est celle qui coûte le moins à court terme. Si elle est adoptée, le risque existe que les générations futures reprochent à la nôtre d'avoir gaspillé le patrimoine. Il a été amplement démontré au cours de ce symposium que les biotopes marécageux sont im-

portants et riches; l'option du laisser-faire n'est pas réaliste.

Entre les extrêmes, un certain nombre de *solutions optimales* pourraient être trouvées de cas en cas. La somme des intérêts contradictoires de l'agriculture, de la protection des sites et de l'aménagement du territoire nous oblige en effet à rechercher des compromis. Ceux-ci seront élaborés en s'inspirant entre autres des quelques lignes d'action suivantes:

- Mise au point de projets de sauvetage de certains hauts-marais et bas-marais incluant tous les types écologiques, avec justification des coûts prévisible et description des résultats attendus.
- Poursuite des études agronomiques sur les moyens de cultiver les sols organiques en limitant au maximum les phénomènes de tassement et de minéralisation.
- Etudes hydrologiques sur les mécanismes possibles de régulation de niveau des nappes phréatiques: cette notion de régulation (niveaux plus élevés en dehors des périodes de culture) paraît offrir une meilleure protection aux sols organiques que la notion de drainage plus ou moins systématique.
- Etude des substrats tourbeux, recherche d'alternative à l'utilisation de la tourbe (résidus, composts, écorces) comme substrat de croissance.
- Prise de conscience du fait que toute modification des systèmes d'exploitation du sol doit être faite à long terme: les conséquences sur l'économie régionale doivent être soigneusement pesées (emplois, investissements, subventions).
- Information complète des milieux politiques preneurs de décisions d'aménagement sur la notion de maintien à long terme du capital-sols organiques.

La présente décennie est caractérisée par le recours fréquent à des concepts généraux: conception globale, interdisciplinarité,... Il est souhaitable que les sols organiques de notre pays puissent bénéficier du fruit des efforts conjugués de toutes les disciplines de la science et de la pratique qui s'intéressent à leur sort.

Adresse de l'auteur:

Dr Jean A. Neyroud
Recherche Agronomique
de Changins
CH-1260 Nyon

Logik zwischen Mathematik und Philosophie

Inhalt

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>G. Kreisel (Department of Philosophy, Stanford University, Stanford, California)</i> Was hat die Wissenschaft von der mathematischen Logik? | 163 |
| <i>H. Lauener (Philosophisches Institut der Universität Bern)</i> Logik als Instrument des Philosophen | 174 |
| <i>H. J. Schneider (Interdisziplinäres Institut der Universität Erlangen-Nürnberg)</i> Wenn/dann-Verbindungen in der Logik und in der natürlichen Sprache | 181 |

Was hat die Wissenschaft von der mathematischen Logik?

Georg Kreisel

Erstens einmal liefert die Logik Gesetze für einige (logische) Begriffe, die beinahe in der gesamten Mathematik und ihren Anwendungen nützlich sind; insbesondere für so vertraute Begriffe wie: Menge (aus dem letzten Jahrhundert), logische Sprache (um die Jahrhundertwende), formale oder mechanische Regel (aus diesem Jahrhundert). Jene Begriffe werden benutzt, um ausgesprochen wesentliche Sachverhalte prägnant zu beschreiben, und sind in dieser Hinsicht dem der natürlichen Zahl durchaus vergleichbar; genauer: man braucht diesen Begriff mitsamt den (elementaren) Gesetzen der Arithmetik, z. B. der Kommutativität der Addition bei der Kontrolle von Rechnungen. Ähnliches gilt für die logischen Gesetze. Der Vergleich geht übrigens noch einen Schritt weiter. Für die breite Wissenschaft haben die elementaren Teile der Logik und Arithmetik einen bedeutend grösseren Grenznutzen als die «höheren», d. h. als jene Eigenschaften von Mengen und Zahlen, auf die sich die heutige höhere Mengenlehre bzw. Zahlentheorie konzentriert. (Oft macht es schon viel mehr aus, dass man nicht vergisst überhaupt zu zählen, und Ähnliches gilt für die Logik im Gegensatz – so scheint es mir – zur höheren Geometrie.) Auf einige Ausnahmen kommen wir später zurück.

Zweitens bietet die – Entwicklung der – Logik krasse Schulbeispiele einer wissenschaftlichen Problematik, die uns aus anderen Teilen der Wissenschaft wenig vertraut ist; ganz besonders wenig aus der Mathematik, die in der Auswahl ihrer Begriffe und Fragestellungen, nicht: der Beweise, sehr konservativ ist. Grob gesagt betrifft jene Problematik die Korrektur von Zielen oder, nuancierter ausgedrückt, die *Abstimmung von Zielen auf vorhandene Methoden*, also: technische Möglichkeiten. Im Falle der Logik handelt es sich um die Korrektur ihrer ursprünglichen, grundagentheoretischen Ziele. Der folgende Vergleich wirkt auf den ersten Blick skurril, stellt sich aber als höchst optimistisch heraus. Ich denke an Astrologie und Al-

chemie, und zwar an ihre grobschlächtigen Ziele, nicht an tiefsinnige oder gar tiefenpsychologische Varianten; also: das Schicksal eines Menschen vorauszusagen, bzw. Formen der Materie in andere oder in Energie umzuwandeln. Diese allgemeinen Ziele sind m. E. durchaus überzeugend. Zweifelhaft sind dagegen die zusätzlichen spezifischen Annahmen, dass ausgerechnet astronomische Kenntnisse, bzw. jene, die sich die Alchemisten mit minimalem Energieaufwand beschaffen konnten, für die erwähnten Ziele geeignet sind. (Auch das spezifische Anliegen der Alchemisten, Blei ausgerechnet in Gold umzuwandeln, übersieht die heute bekannten Schwankungen des Goldpreises und allgemeiner das Gesetz von Angebot und Nachfrage.) Die Korrektur bestand gar nicht so sehr in einer radikalen Änderung des alltäglichen Wissenschaftsbetriebes, sondern in der Entdeckung von fruchtbareren Zielen für die Kenntnisse, die sich die Astrologen und Alchemisten – bei ihren Bemühungen um ihre ursprünglichen Ziele – erworben hatten. Z. B.: nicht das Schicksal der Menschen, sondern die Bahnen von Planeten aus astronomischen Daten zu berechnen; nicht billiges Blei in teures Gold, sondern noch billigere Tonerde in etwas weniger teures Meissner Porzellan durch Erhitzen zu verwandeln. Nebenbei sei bemerkt, dass es in der Astrologie an jener Präzision, die in den logischen Grundlagen als Allerweltsheilmittel angesehen wird, nie mangelt: Es mangelte an vernünftigen Zielen für jene Präzision. Dass der Vergleich der Logik mit Astronomie und Alchemie optimistisch ist, liegt darin, dass bei den beiden letzten Unternehmen die Korrekturen gelungen sind.

Nach dem üblichen Sprachgebrauch gehören solche Korrekturen durch vernünftige Akzentverschiebung zur Philosophie, und zwar zu den philosophischen Fortschritten. In unserem Spezialfall der mathematischen Logik handelt es sich dazu noch um Philosophie im akademischen Sinne, also um jene traditionellen Frage-

stellungen der Schulphilosophie, die die mathematische Logik ursprünglich präzisieren sollte (was ihr übrigens ausgezeichnet gelang). Man denke hier an die Rolle der logischen Sprachen im sogenannten Logizismus und der formalen Regel im Formalismus, um nur die beiden bestbekannten Schulen – besser Zweige – der logischen Grundlagenforschung zu nennen. Den Intuitionismus behandle ich hier deshalb nicht, weil die breite Öffentlichkeit zwar den Namen, aber nicht seine wesentlichen Begriffe kennt. Wieder, d. h. wie bei der Astrologie und Alchemie, stecken hinter jenen Zweigen der logischen Grundlagen m. E. durchaus überzeugende allgemeine Ziele aus der sozusagen heroischen Tradition der Philosophie der Mathematik, mit Fragen folgender Art: Was ist Mathematik? Oder: Was ist Beweis?

Oder im modernen, etwas dezenteren Jargon, betr. l'architecture des mathématiques et nos résonances intuitives. Unüberzeugend ist dagegen der Anspruch, dass dafür ausgerechnet die logischen Aspekte der Mathematik und des mathematischen Wissens ergiebig sind; natürlich, in dem Sinn von «logisch», der in der logischen Grundlagenforschung benützt wird.

Jeder Zweifel an der Relevanz der logischen Aspekte für die heroischen Ziele berührt unvermeidlich die Auswahl der Eigenschaften logischer Begriffe, also, der Fragen betr. logische Begriffe, die eine vernünftige Forschung betont. – Warnung. Die populäre Literatur betont noch immer jene Sätze, die für die ursprünglichen grundlagentheoretischen Ziele (tatsächlich) besonders relevant waren. Bei der Akzentverschiebung auf nüchternere Ziele muss man darauf gefasst sein, dass jene (vertrauten) Sätze zwar nicht widerlegt werden, aber ihre zentrale Stellung verlieren. Manchmal werden sie für die neuen Ziele durch geschickte Umformulierung relevant. Häufiger aber braucht man eine Akzentverschiebung auf Hilfssätze, die beim Beweis jener «Fundamental»sätze benutzt wurden. Dass diese «Konflikte» bei der Logik tatsächlich auftreten, werden Beispiele bald zeigen.

I. Logische Begriffe und ihre Eigenschaften

1. Mengen und die mengentheoretische Sprache, also mit Variablen für Mengen (aus einem geeigneten Mengenvorrat), der \in -Relation und den üblichen logischen Partikeln.

(a) Vor 100 Jahren: von einer Entdeckung zu

einer Doktrin. Überraschenderweise hängen viele mathematische Sätze, z. B. über Funktionen, gar nicht von den für uns eindruckvollsten Merkmalen der einschlägigen Objekte (also von ihren sogenannten intensionalen Eigenschaften), sondern von viel gröberen ab; bei Funktionen: nicht von den Gesetzen, die vom Argument zum Wert führen, sondern nur vom Graphen. Etwas allgemeiner: in die Sätze gehen nur überraschend wenige Aspekte der Objekte ein; z. B. bei den rationalen Zahlen, manchmal nur die Ordnung, oft nur die Körperoperationen, selten die Darstellung als Brüche. Solche Sätze können in der mengentheoretischen Sprache, u. zw. m. B. a. die erwähnten Aspekte (Strukturen) formuliert werden. Auf diese Entdeckung folgte bald eine zweite; in vertrauten Teilen der Mathematik, z. B. in der Arithmetik können die Objekte und ihre Beziehungen auch – wie man sagt: bis auf Isomorphie – mengentheoretisch definiert werden, wobei sich jene Isomorphie auf die relevanten Strukturen bezieht; z. B. ist bei den rationalen Zahlen $(0,1)$ ordnungsisomorph zu jedem Intervall (a, b) : $a < b$, aber nur zu sich selbst, wenn auch die Körperoperationen berücksichtigt werden.

Danach wurde aus diesen Entdeckungen betr. grosse Teile der (damaligen) Mathematik eine Doktrin: alle «streng» mathematischen Sätze müssen in dieser mengentheoretischen Form ausgedrückt werden. Dahinter steckte natürlich das Ziel, die Frage:

Was ist Mathematik? mit: Mengenlehre zu beantworten. Es ist ziemlich klar, welche Eigenschaften von Mengen für dieses Ziel gebraucht werden: brave Lehrbücher gehen auf diese Dinge, meistens in Anhängen, ein.

(b) Heute: Übertragungsprinzipien. Die Erfahrung hat gezeigt, dass, abgesehen von ganz wenigen Ausnahmen, die in (a) betonten mengentheoretischen Definitionen der Strukturen selbst nichts bringen; noch weniger hat man davon, dass man sich über den nötigen Mengenvorrat den Kopf zerbricht. – Für Kenner: die Ausnahmen betreffen z. B. gewisse gruppentheoretische Fragen, etwa ob diese oder jene (überabzählbare) abel'sche Gruppe frei ist. Interessant ist die Tatsache, dass man solchen Fragen i. a. nicht ohne weiteres ansieht, ob sie vom betrachteten Mengenvorrat abhängen. – Im Gegensatz zur sterilen Doktrin (a) ist folgendes ganz wesentlich:

Wenn ein Satz mengentheoretisch formuliert ist – genauer: m. B. a. eine (passende) Strukturie-

rung der darin betrachteten Objekte –, dann gilt er auch für jede isomorphe Struktur.

Damit wird das verpönte Raisonieren mit Analogien angemessen präzisiert und legitimiert. – Warnung. Dagegen liefert die Mengenlehre selbst keine Richtlinien für die Auswahl passender Strukturierungen. Damit befasst sich die übliche axiomatische Mathematik (nicht zu verwechseln mit der axiomatischen Mengenlehre). Ohne zu übertreiben:

nicht: dass, sondern: welche Mengen betrachtet werden, ist für den Erfolg der axiomatischen Mathematik massgebend. – Abschweifung. Will man diese heikle Frage der Auswahl (von Mengen) vermeiden, so kommt man beinahe zwangsläufig zu Cantors Taktik, alle oder zumindest möglichst viele Mengen und gar keine Strukturierung zu betrachten, kurz: Kardinalzahlarithmetik. Und die einfachste Art, hier etwas Neues hineinzubringen ist, wieder, Cantors Hauptanliegen: höhere Unendlichkeiten. Die Öde dieser Fragestellung wird – bewusst oder eher unbewusst – verschleiert durch Dramatisierung von Fragen betr. die Existenz solcher Dinge; vgl. Churchills Meinung, die Wahrheit bräuchte eine Leibwache von Lügen.

Verstärkte Übertragungsprinzipien. Man kann sich gut vorstellen, dass sich Sätze, die in einem Teil der mengentheoretischen Sprache formuliert werden, auf eine grössere Klasse von Strukturen (als nur isomorphe) übertragen lassen. – Besonders bewährt hat sich die Sprache der elementaren Logik, mit Variablen für die Elemente einer festen Menge. (Logisch sensible Mathematiker mögen den Ausdruck «elementare Logik» nicht, weil ja die gesamte Mengenlehre in diesem Formalismus angeschrieben wird). Was Übertragungsmöglichkeiten betrifft, gilt für Kenner das Stichwort: Ultraprodukte.

(c) Konflikte zwischen den alten Zielen in (a) und den neuen in (b) sind schon deshalb unvermeidlich, weil in (a) heroische Fragen der Art: Was ist (das Objekt) X? das Ding X von allen anderen Dingen unterscheiden wollten. Dagegen werden in (b) Kenntnisse von X auf andere Dinge übertragen. Ähnliches gilt für den Anspruch, dass die elementare logische Sprache die Gesamtheit präziser Definitionsmöglichkeiten ausschöpfe. Im Gegenteil: die (verstärkten) Übertragungsprinzipien sind nützlich, weil ganz präzis definierte, aber verschiedene (nicht-isomorphe) Strukturen vorliegen, die sich nicht elementar unterscheiden lassen!

Zusätzliche Bemerkungen (für Kenner). Auch in der «höheren» Logik waren Akzentverschiebungen nötig, die übrigens recht oft hinter einer neuen Terminologie versteckt sind. Z. B. sind die Begriffe der verzweigten und konstruktiblen Hierarchien von Poincaré/Russell bzw. Gödel praktisch identisch (bis auf den Unterschied zwischen den einfachen und kumulativen Typen, die in der Zwischenzeit eingeführt worden waren). Aber die relevanten Fragen sind grundverschieden. Für Poincaré/Russell, mit ihren prädikativistischen Anliegen, war es eine Hauptfrage, wie «kompliziert» jene Verzweigungen sein, also bis zu welcher Ordinalzahl sie wiederholt werden dürfen. Für Gödels Ziel – von relativen WF Beweisen – war das überhaupt kein Problem: so «kompliziert» wie möglich (genauer: im jeweils betrachteten Mengenvorrat möglich). Und seither hat sich der Schwerpunkt weiter verlegt: von seinen relativen WF-Beweisen zu Übertragungsprinzipien der Art:

Welche Sätze über die konstruktiblen Mengen lassen sich auf die volle Hierarchie übertragen? Das ist deshalb nützlich, weil die konstruktiblen Mengen strukturierter sind und z. B. raffinierte induktive Beweise erlauben.

Manche ärgern sich darüber, dass die meisten «Experimente» in der Mengenlehre, z. B. das rein formal inspirierte System NF von Quine, keine vergleichbar vernünftigen Ziele haben. Ich denke dabei an die unvernünftigen Kunststücke, auf die sich die frühe Elektronik eingelassen hat. Die Firmen, die es taten, machten Pleite (nachdem geschickte Spekulanten kurzfristige Gewinne eingesteckt hatten). Aber andere lernten daraus, was man nicht tun sollte, z. B. darin langfristig zu investieren. – Da wir schon von Computern reden, komme ich aufs nächste Thema.

2. Formale Regeln: die nichtnumerische Datenverarbeitung.

a) Wir behalten das Schema von §1 bei.

Wieder fing es mit einer Entdeckung, u. zw. schon im letzten Jahrhundert, an. Boole und Frege haben Kalküle für die Aussagen- bzw. Prädikatenlogik aufgestellt, übrigens unter Titeln, deren Übertreibungen sich z. B. die heutige kommerzielle Werbung kaum leisten könnte: die Denkgesetze (Laws of thought), Grundgesetze (der Arithmetik). Dabei stellen jene Kalküle keineswegs die tatsächlichen Möglichkeiten des Denkens dar, sondern nur folgendes. Zu

jedem gültigen Satz der betrachteten logischen Sprache gibt es auch eine Ableitung im einschlägigen Kalkül. Kurz, das Denken wird als schwarzer Kasten (auf englisch: black box) behandelt. – Beispiel. In der Aussagenlogik gilt $p \leftrightarrow (\neg)^{2n}p$ und wird vernünftigerweise durch Nachzählen der Negationszeichen bewiesen; aber dieses Nachzählen ist kein Beweis im Booleschen Kalkül.

Bald wurde aus den Entdeckungen von Boole und Frege eine Doktrin, die die Frage Was ist (das Wesentliche am) Beweis?

zu erledigen behauptete, insbesondere im Zusammenhang mit einem Hauptanliegen jener Zeit, der Geschichte von der Sicherheit der Mathematik oder der Strenge der Beweise (obwohl, realistisch betrachtet, gerade bei der Mathematik die Sicherheit meistens unsere kleinste Sorge ist). Die Antwort war: Formalisierbarkeit (offenbar, eine Verlegenheitslösung, da damit nur die Möglichkeit einer Formalisierung gemeint ist, obwohl – vorher und nachher – nichtformalisierte Beweise durchaus überzeugend waren und bleiben). Natürlich musste diese Antwort durch spezifische formale Regeln ergänzt werden, etwa jene, die Frege konzipiert hatte und Whitehead/Russell weiterführten. – Abschweifung (für Kenner) betr. eine besonders witzige Wendung, die Hilbert jenem Projekt gegeben hat. Entgegen einer weitverbreiteten Meinung stand Hilberts Formalismus, insbesondere sein Steckenpferd: die Methodenreinheit, keineswegs im Widerspruch zum Logizismus. Hilbert wollte diesen verfeinern! statt sich mit einer brutalen (globalen) Formalisierung in der Mengenlehre zu begnügen, wollte er die einzelnen Zweige der Mathematik (Geometrie, Arithmetik, finite Kombinatorik usw.) sozusagen rassens- (= methoden)rein züchten, z. B. sollten in der Geometrie nur elementargeometrisch definierbare Mengen, insbesondere nur so definierte Dedekind'sche Schnitte benützt werden, u. dgl. Wer, bewusst oder unbewusst, von Hegels Warnung, alles hänge mit allem zusammen, eingeschüchtert war, musste das Hilbert'sche Programm der Methodenreinheit als Erlösung empfunden haben: zumindest in der Mathematik braucht man sich «prinzipiell» überhaupt um nichts ausserhalb des jeweils betrachteten Zweiges zu kümmern.

In diesem Jahrhundert gerieten jene übertriebenen Ansprüche betr. Beweise, übrigens ganz allmählich, in den Hintergrund; besonders nach den Gödel'schen Sätzen. (Wie Gödel selbst be-

tonte, widerlegen seine Unvollständigkeitssätze prinzipiell die Möglichkeit des Hilbert'schen Ideals der Methodenreinheit in der Arithmetik, während ihre Relevanz für das Hilbert'sche WF-Programm beschränkt ist.) Innerhalb der Logik ging man von der spezifischen Anwendung formaler Regeln als Schlussregeln auf das allgemeine Gebiet der mechanischen Verfahren, vor allem der sogenannten Entscheidungsverfahren über. Dementsprechend änderte sich die Terminologie. Man hörte immer weniger von formaler Unvollständigkeit (die Gödel betonte), und immer mehr von rekursiver Unentscheidbarkeit, aus der jene Unvollständigkeit leicht folgt.

Aber diese Akzentverschiebung – von Beweisregeln auf allgemeine mechanische Verfahren – beseitigt noch nicht die philosophischen Zweifel der schweigenden Mehrheit (erfahrener Mathematiker). Zugegeben, der Begriff der rekursiven Funktion trifft ausgezeichnet, was wir naiverweise unter einer prinzipiell mechanisch definierbaren Operation verstehen. Aber ist dieser naive Begriff auch nur eine qualitativ vernünftige Annäherung (auch «Idealisierung» genannt) in den Bereichen, in denen wir ihn naiverweise anwenden wollen? Aus der Informatik ist einerseits bekannt, dass die Wachstumsordnung ganz wesentlich ist, aber auch, dass es – jedenfalls für die heutige Physik – keineswegs selbstverständlich ist, dass jede verlässliche hard ware (Analogcomputer im allgemeinen Sinn) rekursive Gesetze erfüllt. Innerhalb der reinen Mathematik kann man die Zweifel an der Bedeutung des Begriffes eines (mechanischen) Entscheidungsverfahrens sehr deutlich anhand des 10. Hilbert'schen Problems über die Lösbarkeit diophantischer Gleichungen in ganzen Zahlen illustrieren.

Seit etwa 1930, genauer: seit der bekannten Arbeit von C. L. Siegel über binäre diophantische Gleichungen, hat sich die Fragestellung selbst geändert; z. B. nicht: ob es überhaupt eine Lösung gibt, sondern: unendlich viele. Besonders viel Aufmerksamkeit wurde der «Struktur der Lösungsmenge» gewidmet, u. zw. vor allem bei rationalen Lösungen. Nach dem Satz von Mordell/Weil weiss man, dass sich die Menge als eine endlich erzeugte abel'sche Gruppe auffassen lässt, obwohl man i. a. nicht weiss, ob sie leer ist.

So gesehen, war das Hilbert'sche 10. Problem schon lange eskomptiert. Die rekursive Unlösbarkeit, die Matyasevic 1970, also etwa 40

Jahre später, tatsächlich beweisen konnte, ratifiziert die Einstellung der Zahlentheoretiker. Der nächste Abschnitt behandelt den heutigen Stand der Dinge: vor allem die Rolle der formalen Regel für die Informatik, mit einem kurzen Zusatz über ihre Rolle in der reinen Mathematik.

(b) Heute: Einsichten für den Programmierer. Der Begriff der formalen Regel und seine einfachen Eigenschaften liefern Hinweise zur Frage: Was hat man davon, wenn man Rechenregeln kennt und nicht nur die so definierte Funktion? (Die Voraussetzung ist beim Programmieren sowieso erfüllt.) Offenbar ist die Frage besonders dann nötig, wenn man sich vorher in die in (a) beschriebenen Ideale der mengentheoretischen Darstellung von Funktionen durch deren Graphen verhasst hat. – Warnung. Es geht um Einsichten, nicht praktische Rezepte. Für diese wäre der allgemeine Begriff der formalen Regel viel zu grob, und zwar gröber als so manche in der üblichen Mathematik, worauf wir noch zurückkommen. – Statt von «Einsichten» zu reden, könnte man auch sagen: es handelt sich nicht um eine Theorie des Programmierens, sondern um ein paar gesunde (geistige) Reflexe für den Programmierer, die er sich, je nach Erfahrung, anhand von hübschen allgemeinen Sätzen oder einprägsamen Beispielen aneignen kann.

(i) Anwendung formaler Regeln auf formale Regeln, inklusive der – vielleicht aus tiefenpsychologischen Gründen – etwas überbetonten Selbstanwendung oder Selbstbezüglichkeit. Denn offenbar kann eine Regel – genauer: ihre Kodierung – in einem Programm auch als Argument derselben oder einer andern Regel vorkommen.

Sicher gibt es Ähnliches in der üblichen Mathematik; z. B. definiert bei Halbgruppen das Element a auch die Operation: $b \mapsto ab$. Aber, realistisch betrachtet, ist dieses Beispiel einfach bei weitem nicht so eindrucksvoll wie die entsprechenden Sätze der Rekursionstheorie, also, der Theorie der formalen Regeln. Tatsächlich war es ja der logisch versierte Mathematiker von Neumann, der von Gödels Arithmetisierung (die schliesslich zu jenen Sätzen der Rekursionstheorie führte) sehr beeindruckt war und als erster die Anwendung von Regeln auf Regeln in der Programmierung ausnützte; vgl. den sehr gescheiterten Ingenieur Zuse, der (die Prädikatenlogik, aber nicht die Rekursionstheorie kannte und) diese Möglichkeit übersah.

(ii) Das Operieren mit Regeln ohne Sorge um den Definitionsbereich: Einsatz von wesentlich partiellen Funktionen. («Wesentlich» insofern, als ja – vernünftig betrachtet – die meisten üblichen Begriffe und Funktionen, z. B. der kleinste gemeinsame Teiler, nur für bestimmte Bereiche definiert sind. Aber da der Definitionsbereich «gut» bekannt ist, ist der partielle Charakter unwesentlich.) Bei Programmen ist i. a. die Regel «besser» bekannt als ihr Definitionsbereich. Im technischen Jargon: die Klasse der Programme ist (primitiv) rekursiv, die Definitionsbereiche sind i. a. nur rekursiv aufzählbar. (Es versteht sich von selbst, dass es sich lohnen kann, Kenntnisse des Definitionsbereiches auszunützen. Es wäre hirnrissig zu verlangen, dass alle Gleichungen für alle partiell definierten Funktionen gelten müssen! (für Kenner) z. B. müsste man $n \cdot 0 = 0$ durch $0 \cdot 0 = 0$ und $(n+1) \cdot 0 = n \cdot 0$ in der rekursiven Definition der Multiplikation ersetzen.)

Auch hier gibt es Beispiele in der üblichen Mathematik, z. B. bei der analytischen Fortsetzung in der Funktionentheorie, wo die Regel, insbesondere die Potenzreihenentwicklung in der Nähe von $z = 0$, bekannt ist, aber nicht der volle Bereich der Funktion. Aber das ist alles viel zu aufwendig, um die erwünschte Einsicht dem Gros der Programmierer klarzumachen.

(iii) Grenzen der Relevanz der in §1a erwähnten Dirichlet'schen Entdeckung (der Irrelevanz von Regeln, abgesehen vom Graphen, einer Operation). Man kann – mit beschränkten Mitteln, hier: mit Hilfe von formalen, d. h. mechanischen Programmen – mehr Funktionalgleichungen lösen, wenn die Lösung vom Programm und nicht nur vom Graphen der jeweiligen Funktionsvariablen abhängen darf. Folgendes Beispiel setzt nur die elementarsten Kenntnisse der Rekursionstheorie voraus.

X und Y seien r. a. Mengen, bestimmt durch primitiv rekursive Aufzählungen. Gesucht werden r. a. X_1 und Y_1 :

$$X_1 \cap Y_1 = \emptyset \text{ und } X_1 \cup Y_1 = X \cup Y$$

Die Operation $(X, Y) \mapsto (X_1, Y_1)$ lässt sich ohne weiteres mechanisch programmieren (und liefert Aufzählungen von X_1 und Y_1), aber nicht, wenn dazu noch die mengentheoretische Äquivalenz erhalten bleiben soll, also wenn sowohl X und X' , als auch Y und Y' dieselben Elemente haben, dies auch für X_1 und X'_1 , bzw. Y_1 und Y'_1 gilt.

Wieder liefert die übliche Mathematik analoge Beispiele, z. B. wenn – statt der Forderung einer

mechanischen Lösung – Stetigkeit m. B. a. eine passende Topologie verlangt wird. Für Kenner: es handelt sich darum, die Daten anreichern und damit das Problem auch unter zusätzlichen Forderungen an die Lösung erledigen zu können. – Übungsaufgabe. Es gibt keine global stetige Lösung für x als Funktion von (a_1, \dots, a_{n+1}) der Gleichung:

$$x^{2n+1} + a_1 x^{2n} + \dots + a_{2n+1} = 0$$

für die übliche Topologie des Körpers \mathbf{R} ; aber doch, für die Anreicherung der reellen Zahlen durch ihre oszillierenden Dezimalreihen und die dafür angemessene Produkttopologie.

Zusammenfassend: die allgemeinen Einsichten (i) – (iii) werden am besten durch die (elementare) Theorie der formalen Regeln oder durch Beispiele aus diesem Gebiet vermittelt.

Aber, wie z. B. die Aufgabe aus der reellen Algebra in (iii) zeigt, wird man Richtlinien für eine ergiebige Anwendung jener Einsichten – in (iii): der Anreicherung der Mengen X durch eine Aufzählung, bzw. der reellen Zahlen a durch oszillierende Dezimalbrüche – im einschlägigen Zweig der Mathematik suchen.

(b') Abschweifung zur heutigen Rolle des Begriffes der formalen Regel in der reinen Mathematik. Wie schon erwähnt, ist man davon abgekommen, (rekursive) Unentscheidbarkeit zu betonen. Ohne zu übertreiben: diese allgemeine, auch «fundamental» genannte, Eigenschaft einer Klasse von Problemen lenkt von heikleren, aber fruchtbareren Eigenschaften ab, wie z. B. von der Auswahl der betrachteten Objekte und der sie betreffenden Fragen; man denke an das Beispiel von den diophantischen Gleichungen am Ende von 2 (a).

Ganz überzeugend ist dagegen folgende Wendung, die auf Higman zurückgeht, u. zw. in seiner Arbeit 1960 zum Wortproblem für endlich präsentierte Gruppen. Er benutzt die Gedanken, die ein weniger genialer Mathematiker nur zu einem einfacheren Beweis der Unentscheidbarkeit des Wortproblems für solche Gruppen gebraucht hätte, um folgende Frage zu präzisieren und zu beantworten:

Welche endlich erzeugten Gruppen können in einer endlich präsentierten eingebettet werden? Genau jene, bei denen die Menge der Nullwörter rekursiv aufzählbar ist.

Ähnliches gilt für die (negative) Antwort auf das 10. Hilbert'sche Problem:

Welche zahlentheoretischen Prädikate sind diophantisch?

Sobald diophantische Definitionen

$x_1, \dots, x_p [P(x_1, \dots, x_p, n) = 0]$ mit zumindest 9 Variablen ($p \geq 9$) in Frage kommen, so sind alle r. a. Prädikate diophantisch definierbar. – Dies ist wohl die interessanteste bekannte Eigenschaft der Klasse aller diophantischen Definitionen. Letzten Endes ist dies wohl auch das Beste, was man heute zu einer weiteren natürlichen Frage sagen kann.

Wodurch sind die Addition und Multiplikation der natürlichen Zahlen ausgezeichnet?

Offenbar beruht die Nützlichkeit der Antworten (und damit der Fragen) darauf, dass wir uns leicht mit dem Begriff der rekursiv aufzählbaren Mengen, insbesondere mit ihren Abgeschlossenheitseigenschaften vertraut machen. Und dies hängt wieder damit zusammen, dass uns unser naiver Begriff des mechanischen Verfahrens vertraut ist, selbst wenn er – wie in (a) betont wurde – für die geplanten wissenschaftlichen Anwendungen nicht besonders geeignet ist.

Bemerkung. Es ist beinahe peinlich, sozusagen im selben Atemzug von Nützlichkeit in der reinen Mathematik, wie im letzten Absatz, und in der Informatik, wie in (b), zu sprechen. Denn mehr oder weniger vernünftige Menschen geben im Jahr über 250 Milliarden Schweizer Franken aus, um ihre Bedürfnisse mit Hilfe der numerischen und nichtnumerischen Datenverarbeitung zu decken. Aber als «chemisch reines» Paradigma verschiedener Probleme, die in der alltäglichen Programmierung auftreten, ist die reine Mathematik oft recht leistungsfähig.

(c) Was nun Konflikte betrifft, so besteht überhaupt keiner zwischen den «Einsichten» in §2(b) und den Übertragungsprinzipien in §1(b); und kein formaler Konflikt mit den mengentheoretischen Grundlagen. Denn z. B. oszillierende Dezimalbrüche können ohne weiteres als Mengen und partielle Funktionen als Paare von Mengen aufgefasst werden (wobei das erste Glied des Paares der Graph der Funktion und das zweite der intendierte Definitionsbereich ist). Aber man hat hier nichts von der mengentheoretischen Sprache: sie liefert hier genauso wenig Richtlinien für die richtige Auswahl wie – nach §1a – für die axiomatische Mathematik. Da leistet sogar die elementare Theorie formaler Regeln, d. h. der rekursiven Funktionen, bedeutend mehr.

Dagegen besteht ein markanter Konflikt zwischen den Eigenschaften von formalen Regeln, die für eine vernünftige Informatik, und jenen, die für die ursprünglichen grundlagentheoreti-

schen Ziele in §2a – also betr. (Beweise und präzise Verfahren – relevant sind. Vor allem beschäftigt sich die grundlagentheoretische Literatur mit jener Stabilität, die zeigen soll, dass wir überhaupt einen deutlichen Begriff der formalen Regel haben; genauer: dass die uns als definierende Eigenschaften einleuchtenden «Definitionen» tatsächlich äquivalent sind. (Kenner werden hier unterscheiden zwischen der groben Äquivalenz für die Klasse der formal definierten Operationen und der feineren Äquivalenz zwischen den Regeln selbst.) Danach kommt die Kernfrage, ob dieser (deutliche) Begriff tatsächlich auf die geistigen Fähigkeiten des sogenannten idealisierten Mathematikers passt. Am bekanntesten sind da die Überlegungen Turings und die Einwände Gödels, nämlich, dass Turing die Wachstumsmöglichkeiten des Intellekts oder Gehirns – auf den Unterschied kommt es hier nicht an – übersehen hätte (ohne dass Gödel je spezifische Wachstumsgesetze vorschlug).

Eine vernünftige Informatik schert sich i. a. überhaupt nicht darum, ob Computer – etwa in der Mathematik – prinzipiell alles machen können, was der Mensch kann. Im Gegenteil: Computer sollen gut und billig leisten, was die Menschen nur schlecht oder teuer machen. Und da ist es ganz am Platz, nur das Ergebnis, nicht den (Denk-) Prozess zu berücksichtigen, also diesen als schwarzen Kasten zu betrachten. Die oben erwähnte Stabilität spielt in der Informatik eine recht bescheidene Rolle. Denn, wenn wir mit verschiedenen «Begriffen», also zwei Programmiersprachen verschiedener Ausdrucksfähigkeit, zu tun haben und eine Operation in beiden definierbar ist, so fragt man, welche besser funktioniert. Jene Stabilität bedeutet nur, dass wir diese Frage prinzipiell für alle – stillschweigend: rekursiven – Funktionen stellen können. Wie schon in §2 (a) angedeutet wurde, hat die heroische Frage nach den – vom idealisierten Mathematiker – verlässlich ausführbaren Regeln ein Analogon in der Informatik, u. zw. für «Analog»rechner, also idealisierte physikalische Systeme, die den bekannten Gesetzen der heutigen theoretischen Physik, etwa der Mechanik gehorchen. Es ist gar nicht selbstverständlich, dass das Verhalten solcher Systeme (kurz: hard ware) immer rekursiv ist, d. h. von einem Digitalrechner simuliert werden kann. Noch skeptischer wird man – gegenüber der heroischen Frage – wenn man bedenkt, dass selbst in den Fällen eines rekursiven Verhaltens oft ganz

spezifische Eigenschaften der physikalischen Gesetze in den Beweis eingehen. Bei dem heutigen Stand unserer Kenntnisse der geistigen Fähigkeiten des Menschen kann man bestenfalls hoffen zu zeigen, dass so plumpe «Idealisierungen» wie die der formalen Regel *nicht* stimmen. Es wird dem Leser nicht entgangen sein, dass die eben erwähnte Problematik die in §2(b') beschriebenen Anwendungen des Begriffs der formalen Regel in der reinen Mathematik überhaupt nicht berührt.

Soziologische Vermutungen. Ich habe schon lange den Eindruck, dass die Entdeckung der logischen Kalküle für die Entwicklung der mechanischen, nicht-numerischen Datenverarbeitung ganz wesentlich war; vor allem dadurch, dass sie das Vertrauen zur Möglichkeit einer solchen Mechanisierung ungeheuer bestärkte; u. zw. bedeutend mehr als etwa die algebraischen, also auch nichtnumerischen Kalküle. Aber ich wüsste nicht, wie dieser Eindruck dokumentiert werden könnte. Wenn er aber stimmt, so dürfte jenes Vertrauen mit einem Wortspiel zusammenhängen!

Denn schon die Aussagenlogik kann imponieren, wenn man sie als Lehre oder «Theorie» beliebiger Aussagen betrachtet. Man vergisst eben, wie wenig diese Theorie über Aussagen aussagt. Wenn nun – so ginge das Wortspiel – diese allgemeine Theorie mechanisiert werden kann, dann doch sicher jede Theorie von spezifischen Aussagen, z. B. die Arithmetik.

So – und vielleicht nur so – wird die lustige historische Tatsache verständlich, dass (vor 100 Jahren) Freges Formalisierung der elementaren Logik einerseits und (vor 50 Jahren) Gödels Entdeckung der Nichtformalisierbarkeit der Arithmetik andererseits beide als eine Art Wunder angesehen wurden. – Es ist also kein Wunder, dass Mathematiker, die sich mit endlichen Gruppen oder Körpern abplagen, – bewusst oder unbewusst – die Logik um ihre populären Erfolge beneiden.

II. Zum Prozess der Korrektur von Zielen

Bis jetzt ging es nur um das Ergebnis einiger solcher Korrekturen. Aus meiner eigenen Erfahrung kann ich aber auch über die Etappen zumindest einer Korrektur berichten, die mich vor genau 40 Jahren zu beschäftigen anging: sie führte von einer Kritik des (Hilbert'schen) WF-Programms schliesslich zu einer erfolgreichen Programmiertechnik.

1. Vorgeschichte

Bekanntlich haben sich schon Russell und Brouwer über den Anspruch lustig gemacht, die WF wäre eine hinreichende Bedingung für die Brauchbarkeit von (formalen) Regeln. Diese Kritik war unbefriedigend, weil sie überhaupt nichts Positives betr. die WF aussagte. Viel weniger bekannt ist die nuanciertere Kritik von Gödel und Gentzen: die WF garantiert zwar – stillschweigend: für die üblichen Systeme – die Gültigkeit von bewiesenen Allsätzen, aber nicht einmal von reinen Existenzsätzen. Dabei bezog sich die sogenannte konstruktivistische Problematik, die durch WF-Beweise erledigt werden sollte, vor allem auf brenzlige Existenzsätze und andere logisch komplizierte Aussagen. Aber auch diese Kritik führte nicht weiter. Einerseits ist die erwähnte «Rechtfertigung» der WF – als Brauchbarkeitskriterium – im Fall von Allsätzen sowieso der Gnadenschuss aufs Hilbert'sche Programm, das ja den Begriff der Gültigkeit überhaupt vermeiden und durch die WF ersetzen wollte. Andererseits hatte weder Gödel noch Gentzen einen konkreten Vorschlag für eine Bedingung, die der WF vorzuziehen wäre. Herr Bernays hat im Grundlagenbuch ein Korollar zu einem gewissen WF-Beweis, u. zw. für die elementare Logik, in den sogenannten ε -Theoremen formuliert und ihre Bedeutung für Beweise von reinen Existenzsätzen betont. Aber er hat es unterlassen, die Schwächen des WF-Programmes zu unterstreichen. Es lag also (noch) kein klarer Grund vor, den Schwerpunkt von der WF weg auf jene Korollare – genauer: passende Varianten davon – zu verschieben. Im Gegenteil: naiverweise sah man weiterhin das Hauptproblem (der Beweistheorie) darin, die WF auch für die Zahlentheorie und andere «stärkere» Systeme (als die elementare Logik) mit beschränkten metamathematischen Mitteln zu zeigen, und nicht in einem besseren Verständnis der Bedeutung des WF-Beweises für die elementare Logik und in (jener Bedeutung) angemessenen Verschärfungen.

2. Mathematische Anwendungen

Schon in den 40er Jahren stellte es sich – entgegen einer weitverbreiteten Meinung – heraus, dass grosse Teile der Mathematik, u. zw. solche, in denen brenzlige Existenzbeweise vorkommen, recht elementar formalisiert werden konn-

ten. Genauer: in der elementaren Logik, vorausgesetzt, dass gewisse gültige Allsätze als zusätzliche Prämissen benutzt werden. Dies war deshalb wichtig, weil dabei – wie schon damals betont wurde – derselbe Algorithmus für Existenzsätze herauskam; im Jargon jener Zeit: die Klasse der beweisbar rekursiven Funktionen blieb gleich.

Kurz, Beweise von Allsätzen, die fürs WF-Programm die zentrale Rolle spielen, werden hier einfach total ignoriert.

Diese neuen Einsichten führten bald zu praktischen Anwendungen der in §1 erwähnten ε -Theoreme, z. B. zu Schranken für Artins Lösung des 17. Hilbert'schen Problems (betr. Quadratsummen) und zu einer (negativen) Antwort auf Littlewoods heiklere Frage, ob die von Skewes benützte Modifikation des ursprünglichen Beweises betr. Vorzeichenwechsel von $\pi(x) - \text{li}(x)$ wirklich nötig war.

Die erwähnten Einsichten haben auch noch in jüngster Zeit neue Anwendungen gefunden, z. B. um dem einschlägigen Beweis von Jacquet und Shalika aus den 70er Jahren Schranken für $|L_\pi(1)|$ abzulesen; übrigens nachdem Landaus Beweis von $L(1, \chi)$, der eine ähnliche logische Struktur besitzt (und schon über 70 Jahre alt ist), präpariert und «ausgefaltet» worden war. Dabei wurde klar, dass mathematisch triviale Änderungen in den ursprünglichen nicht-konstruktiven Beweisen sowohl den Prozess als auch das Endergebnis jenes Ausfaltens beträchtlich beeinflussen können; im Einklang mit der Erfahrung in diesen Dingen in der üblichen mathematischen Praxis.

So gesehen, liefert hier die Logik auch Begriffe, insbesondere (logische) Komplexitäts«masse», die es gestatten, manches aus der Trickkiste der Praxis zu interpretieren und damit ihre Erfolge zu erklären – abgesehen von Lösungen alter Fragen über effektive Schranken.

Warnung. Die Nützlichkeit des ganzen Projekts (des Ausfaltens) ist in der Mathematik durch zwei Umstände eingeschränkt. Erstens einmal ist der ausgefaltete Beweis oft unergiebig, z. B. wenn die Schranken zu gross oder sonstwie unhandlich sind: in solchen Fällen ist dann eben das Ziel – oder: konstruktivistische Ideal – des Ausfaltens widerlegt. Für einen weiteren Fortschritt braucht man neue Fragen wie, z. B. am Ende von I §2a über die «Struktur» der Lösungsmenge diophantischer Gleichungen. Bei der Auswahl solcher neuer Fragen hat die Logik jedenfalls bis jetzt nicht wesentlich geholfen.

Der zweite Umstand, der den Wert einer logischen Theorie beeinträchtigt, ist ganz trivial, aber praktisch doch wichtig: begabte Mathematiker brauchen hier, ebensowenig wie in anderen Gebieten, die Krücken einer Theorie des Ausfaltens, meistens genügen ein paar gesunde geistige Reflexe. Aber gerade deshalb ist es bemerkenswert, dass jetzt schon über 30 Jahre lang immer wieder Ausnahmen vorkommen, bei denen erst versierte Logiker die «blinden Punkte» der Experten wegräumen konnten.

3. Informatik

Hier wird das Ausfalten relevant, wenn der unausgefaltete Beweis als Programm in einer höheren Programmiersprache und der ausgefaltete als computerfreundliches Programm aufgefasst werden, d. h., das Ausfalten wird für ein in der Informatik vertrautes und bewährtes Ziel verwendet: das Neue liegt darin, dass Erfahrungen aus der «höheren» Beweistheorie benützt werden. Hier fallen die beiden Einschränkungen, in der Warnung im letzten Absatz, weg. Die erste sowieso, da es auf den ausgefalteten Beweis ankommt; die zweite, wenn immer hinreichend viele Einzelfälle in der Praxis vorkommen: denn dann ist es eine Leistung, das Ausfalten mechanisiert zu haben, selbst wenn jeder Einzelfall für einen Mathematiker trivial ist.

Schon bei oberflächlicher Betrachtung dieses neuen Projekts (Mitte der 70er Jahre) ergaben sich Konflikte zwischen den Eigenschaften von Beweisumformungen, die für das Ausfalten einerseits und seinem Analogen in den Grundlagen, dem sogenannten Normalisieren (das zu kanonischen Beweisen führen soll), andererseits wichtig sind. Z. B. wird man beim Ausfalten geschickte von ungeschickten Umformungen trennen, wobei die «Geschicklichkeit» vor allem zu einem besseren, d. h. leistungsfähigeren Endergebnis führen soll. Dies steht im Gegensatz zum Ideal eines kanonischen Beweises, das bei allen Umformungsprozessen dasselbe Endergebnis fordert. Dieses Ideal legt Wert darauf, dass jeder gültige Beweis eine kanonische Form besitzt, während man in der Informatik von einem geschickten Programmierer erwartet, dass er – sei es nach formalen Kriterien, sei es mit Fingerspitzengefühl – solche Beweise auswählt, bei denen sich das Ausfalten überhaupt und dann eine passende Methode lohnt.

Zum Erfolg dieser allgemeinen Betrachtung braucht man aber vor allem praktisch wichtige

Probleme, deren Entdeckung eine noch viel heiklere Aufgabe stellt. C. A. Goad hat sie gelöst. – Für Kenner: das Programm in der höheren Programmiersprache bleibt gleich, während die ausgefalteten Programme Eigentümlichkeiten der eingegebenen Daten, z. B. Redundanzen, ausnützen.

Zusätzliche Bemerkungen. (a) Die Unterdrückung aller (Teil-)Beweise von reinen Allsätzen – und anderen Sätzen ohne algorithmischen «Gehalt» –, die schon in §2 betont wurde, hat auch hier eine Schlüsselstellung. Sonst wären nämlich formalisierte (unausgefaltete) Beweise in der «höheren» Programmiersprache zu aufwendig, um überhaupt verlässlich zu sein, und das Ausfalten selbst viel zu lang. (b) Ein gesunder Skeptizismus gegenüber der sogenannten Komplexitätstheorie war Voraussetzung für den Erfolg des Projektes. Denn bekanntlich sind – nach den in dieser Theorie üblichen Massen – alle in der Beweistheorie üblichen Umformungen praktisch unerschwinglich. Stillschweigend wird aber bei jeder dieser Methoden angenommen, dass man sich für alle Beweise in einer aus der Logik vertrauten Klasse interessiert. Eine vernünftige Informatik hat diese Fragestellung schon lange eskomptiert; vgl. hier die Einstellung der Zahlentheoretiker zu diophantischen Gleichungen (obwohl, bis jetzt, die Auswahl von Problemen in der Informatik wohl nicht so geistreich ist wie Siegels in der Zahlentheorie). Übrigens gibt es meines Wissens kein Beispiel, wo besonders gründliche Untersuchungen jener vertrauten, beweisbarerweise nutzlosen Klassen bei der Auswahl von vernünftigen Problemklassen geholfen hätten. Kurz, die Komplexitätstheorie dient – wie es in Österreich heisst – der Arbeitsplatzbeschaffung in der theoretischen Informatik; sonst wäre sie ein gutes Beispiel für Wittgensteins Warnung vor dem unheilvollen Einbruch der Logik in die Mathematik; genauer, ihr Teilgebiet: die theoretische Informatik. – Die folgenden Bemerkungen sind Warnungen vor Missverständnissen. (c) Die hier betrachtete Umformung oder Manipulation von Beweisen, d. h. Programmen, ist grundverschieden von den viel bekannteren Projekten des automatischen Beweisens oder der mechanischen Synthese von Programmen. Bei diesen sensationslüsternen Unternehmen ist der Ausgangspunkt eine Formel, z. B. eine Vermutung, die automatisch bewiesen oder widerlegt, oder ein Problem, für welches eine Lösung automatisch programmiert werden soll.

In beiden Fällen handelt es sich um typisch «schöpferische» Leistungen, die die Menschen verhältnismässig billig und gern liefern (inklusive «schöpferischen» Zielen, die sich nicht bewähren). Das Ausfallen von Beweisen und die – hier gemeinte – Umformung von Programmen sind langweilige Prozeduren, die die (meisten) Menschen nur ungern und (daher) unverlässlich ausführen. NB. Übrigens hängen jene Projekte, die traditionelle Beweistheorie fürs automatische Beweisen zu verwenden, mit dem Aberglauben zusammen, dass uns diese Theorie helfe, Beweise zu finden oder zu kontrollieren. Tatsächlich aber ist ihr Hauptziel, sogenannte abstrakte in elementare Beweise umzuformen, um jene zu rechtfertigen. In der Informatik werden die dafür entwickelten Methoden – modifiziert und – verwendet, um Programme in höheren Programmiersprachen zu «straight code» umzuformen und damit dem Computer vorzukaufen. (d) Schliesslich sei daran erinnert, dass die in I §1 (b) erwähnte axiomatische Methode der Zergliederung von Beweisen mit Hilfe von Grundstrukturen in ganz offenkundiger Weise als Modell für eine Programmiersprache mit entsprechenden Grundzeichen angesehen werden kann; nur braucht die alltägliche Informatik eher Bäume, Listen und dgl. als die spezifischen Grundstrukturen im engeren Sinne von Bourbaki, wie Gruppen, Körper usw. Dabei ist die Möglichkeit, Bäume usw. mengentheoretisch zu definieren, für die Informatik *le côté le moins intéressant*, genauso wie im Fall der axiomatischen Mathematik. – Aber auch jener, in der heutigen axiomatischen Mathematik verpönte Stil, möglichst viel in Beweisen physikalisch zu interpretieren (z. B. Definitionen als Energieintegrale, Hilfsätze als Erhaltungssätze), kann für die Informatik nützlich sein; u. zw. wenn Analogrechner eingesetzt werden sollen. Hier sind «Analogrechner» im allgemeinen Sinn gemeint: komplizierte Teilrechnungen werden mit Hilfe eines geeignet präparierten, sozusagen programmierten physikalischen Systems erledigt, dessen Verhalten – gemäss einer verlässlichen Theorie – eben jenen Rechnungen entspricht. (Wie schon in I §2 (c) erwähnt wurde, braucht das System kein Digitalrechner zu sein und kann vielleicht gar nicht von einem solchen simuliert werden.) – Kurz, es wird nicht behauptet, dass die höhere Beweistheorie, wie sie hier verwendet wird, der einzige Teil der höheren Mathematik sei, der für die Informatik nützlich ist!

III Von den Grundlagen zur Technologie

Gemeint sind in diesem Titel die traditionellen logischen Grundlagen, den die eben beschriebene Entwicklung einer Programmieretechnik nahelegt. Aber auch unabhängig von diesem spezifischen Erfolg scheint er mir aus folgendem Grund plausibel: wie sich auch die Auffassungen von den Grundlagen unterscheiden mögen, stammen die traditionellen Grundlagenfragen, etwa der alten Griechen, aus einer Zeit sehr beschränkter wissenschaftlicher Erfahrung. Sicher sind sie nicht leer. Also ist anzunehmen, dass sie für jene beschränkte Erfahrung mehr oder weniger angemessen sind; aber auch, dass das Grübeln über eine so beschränkte Erfahrung sehr bald den Punkt vom abnehmenden Ertrag erreicht. Dagegen können jene Fragen – oder genauer: die Vorstellungen hinter ihnen – wieder aktuell werden, wenn uns die Technik neue Erfahrungen, insbesondere neue Dinge verschafft, auf die die alten Vorstellungen qualitativ passen. Im Falle der elektronischen Grossrechner handelt es sich um die alte Vorstellung eines mechanischen Verfahrens. Hier sei nochmals betont, dass dies zwar auf die elektronischen Rechner zutrifft, aber es offenbleibt, ob die Mechanik der heutigen theoretischen Physik in diesem (alten) Sinn mechanisch ist! vgl. die Bemerkung in II zu Analogrechnern.

Es mag unhöflich klingen, wenn wir den traditionellen Grundlagen nachsagen, sie kümmern sich nur darum, wie sich der kleine Moritz die Dinge und das Denken vorstellt.

Mancher Philosoph – zumindest einer, der den Vorstellungen des kleinen Moritz entspricht – wird sich beleidigt fühlen. Aber gewiss nicht jene, wie Aristoteles, Leibniz, Hume usw., die sich in die Politik einmischen oder Geschäfte machen (wollen). Denn sie wissen sehr gut, dass es viel mehr kleine Moritzchen gibt als reife, also, dass ihnen eine breite Popularität bzw. ein grosser Markt sicher ist.

Andererseits wäre es m. E. verfehlt, in staunender Ehrfurcht vor den Erfolgen der primitiven Vorstellungen (des kleinen Moritz) aufzugehen, wie überhaupt vor den erfolgreichen Anwendungen der Mathematik. Denn dabei übersieht man nicht nur die vielen vergessenen Misserfolge, sondern vor allem die Phantasie und andere geistige Leistungen, die nötig sind, um fruchtbare Anwendungsgebiete auszuschöpfeln; Leistungen, die zumindest im Fall der Lo-

gik anspruchsvoller sind als die ursprünglichen mathematischen Entdeckungen. Dieser Aspekt der Forschung und, allgemeiner, des wissenschaftlichen Fortschritts scheint mir in den bekannten Schlagworten vernachlässigt zu sein, wie z. B. in den Geschichten von These – Antithese – Synthese, Verifizieren, Falsifizieren, Paradigmenwechsel (besser: Abwechslung bei Langeweile).

Die Korrektur von Zielen und, insbesondere, der Schritt von den Grundlagen zur Technologie sind manchmal entscheidender.

IV Abschliessende Bemerkungen

Für manche Leser dürfte es eine dankbare Aufgabe sein, zwei Fragen, die hier nur kurz berührt wurden, näher zu betrachten.

1. Heroische Fragen aus der Philosophie der Mathematik. Die logischen Grundlagen bieten hier nicht nur wenig, sondern bedeutend weniger als die Entwicklung innerhalb der Mathematik. Z. B. liefert m. E. die axiomatische Mathematik, mit ihrer Zergliederung von Beweisen in ein überschaubares Gefüge einprägsamer Hilfssätze über einige wenige Grundstrukturen, einfach Wesentlicheres über die tatsächlichen Beweismöglichkeiten als die logischen Sätzchen über Gültigkeit, Vollständigkeit, Unvollständigkeit u. dgl. (obwohl natürlich niemand bezweifelt, dass überzeugende Beweise u. a. auch gültig sein sollen!). Diese Situation ist – für die Mathematiker, bewusst oder unbewusst – ausgesprochen peinlich. Denn die logischen Begriffe und Sätzchen sind durchaus mathematisch sauber und unmittelbar verständlich, während die mathematische Axiomatik ihre Auswahl der Grundstrukturen (und dann die für die Zergliederung eines Beweises angemessene Auswahl spezifischer Grundstrukturen) nur durch den «Erfolg» oder bestenfalls durch ein paar, meist grunzende Hinweise auf die mathematische «Erfahrung» vermitteln kann. Es scheint mir ganz natürlich, dass diese Sprachlosigkeit der Mathematiker, was ihre eigenen (wesentlichen) Beiträge betrifft, zu einer völlig verkehrten Kritik der mathematischen Logik geführt hat. Ein Beispiel: Bekanntlich kümmert sich die Logik wenig um die Begriffe, die wir der geometrischen Anschauung, etwa des Kontinuums verdanken. Daraus wird dann – ganz gedankenlos – geschlossen, dass das Übel in

der diskret-kombinatorischen Natur der Logik liege. Aber die Logik kümmert sich auch nicht um die Auswahl angemessener diskret-kombinatorischer Grundstrukturen!

Zu beachten: auch für die heroischen Fragen in der Naturphilosophie wie etwa: Was ist (der Aufbau der) Materie? haben die Entwicklungen innerhalb der Naturwissenschaft viel mehr geleistet als logische Untersuchungen, d. h. als die Vorstellungen des kleinen Moritz. Hier wäre das Analogon zum logischen Ideal, mit der Gültigkeit etwa von Beweisen, anzufangen und dann, schrittweise, auf tatsächlich überzeugende einzuschränken, dies: die Gesamtheit aller möglichen Welten zu analysieren und dann, schrittweise, zur tatsächlichen Welt und ihren Gesetzen zu kommen. So ging es nicht... Es ist geradezu grotesk, wie selbstgefällig die Logiker über alle möglichen Welten reden, wo doch die Haupterfolge der Physik darin bestehen, unsere Welt und ihre Besonderheiten zu verstehen.

2. Zum Prozess der Korrektur von Zielen wurde in Teil II nur ein einziges Beispiel, sozusagen eine Anekdote, angeführt. Aber es scheint mir der Mühe wert, auch ein paar anderen Beispielen nachzugehen. Denn einerseits ist zumindest die logische Forschung in den letzten 50 Jahren noch durchaus überschaubar; z. B. sind Misserfolge noch nicht vergessen. Andererseits drängen sich, schon in diesem Gebiet, Fragen von allgemeinem Interesse auf: Welche Rolle spielt die Planung, sozusagen die künstliche Züchtung, die durch Schlagworte andere zur Mitarbeit anzog? Welche Rolle spielte die sogenannte wissenschaftliche Freiheit, sozusagen verschwenderisch eine Fülle von Varianten zu produzieren und für sie zu werben, bei welchen dann durch natürliche Auslese die angemessenen von den Fehlentwicklungen unterschieden wurden. Gerade deshalb, weil diese (soziologischen) Fragen die Weltgeschichte kaum berühren, also weil nicht gar zu viele Querverbindungen bestehen, könnte man hoffen, hier eine vielleicht bescheidene, aber zumindest verlässliche Einsicht in den Wissenschaftsbetrieb zu gewinnen.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. Georg Kreisel, F.R.S.
Dept. of Philosophy, Stanford University
Stanford, California/USA

Logik als Instrument des Philosophen

Henri Lauener

What meets the eye or ear in language has the charm, complexity, convenience, and deceit of other conventions of the market place, but underlying it is the solid currency of a plainer, duller structure, without wit but also without pretence. This true coin, the deep structure, need never feature directly in the transactions of real life. As long as we know how to redeem our paper we can enjoy the benefits of credit.

Donald Davidson (*Actions and Events*, S. 137)

Über die Nützlichkeit der Logik für die Philosophie gehen die Ansichten auseinander. Man findet am einen Extrem Philosophen, die sie gering einschätzen – häufig allerdings, ohne eine klare Vorstellung oder auch nur eine Ahnung davon zu haben, wie man Logik betreibt. Ignoranz erzeugt ein schiefes Verständnis, das zur Verurteilung der Sache selbst verführt. Andererseits wird mit der Logik auch Unfug getrieben. Gewisse Autoren tragen bloss Trivialitäten oder Spitzfindigkeiten in formaler Aufmachung vor, um der Sache dadurch den Anschein von Tiefgründigkeit oder Wissenschaftlichkeit zu geben. Diese Art von steriler Neoscholastik verspottet Hao Wang, wenn er den trefflichen Rat erteilt: «If you think that your paper is vacuous use the first-order functional calculus. It then becomes logic, and, as if by magic, the obvious is hailed as miraculous» (*From Mathematics to Philosophy*. London 1974, S. 368.) Meines Erachtens stellt Logik weder eine isolierte Insel dar, auf welcher man sich leeren Spekulationen hingibt, noch bietet sie sich als Wundermittel an, das ohne weiteres alle philosophischen Probleme löst. Sie ist vielmehr als ein Instrument zu betrachten, das sich je nach Einsatz als wirksam oder als unbrauchbar erweisen kann.

Wieviel Logik braucht der Philosoph? Quine glaubt, dass die Quantifikationstheorie, d. h. der Prädikatenkalkül erster Stufe mit Identität, genügt, da sich – wie er annimmt – in einer auf diesem aufgebauten Sprache alle für die Naturwissenschaft relevanten Sätze ausdrücken lassen. Als Vertreter einer Philosophie, die ich offenen Transzendentalismus nenne, stelle ich die Opportunität seiner einseitig naturalistischen Orientierung in Frage. Abgesehen von Zweifeln an der effektiven Ausdrückbarkeit der gesamten Wissenschaft in seiner kanonischen Notation, glaube ich nicht, dass es Quine gelingt,

dem naturalistischen Programm gemäss die klassische Logik objektiv auszuzeichnen. Seiner Konzeption der Logik und der Mathematik als integrierender Bestandteil der Totalität der Wissenschaft halte ich eine pluralistische Auffassung entgegen, nach welcher es uns je nach Bedarf frei steht, verschiedene logische Systeme zu verwenden. Mit Rücksicht auf die Situation müssen wir jeweils diejenige Wahl treffen, die prima facie am meisten Erfolg verspricht, und die Praxis wird zeigen, wie weit sich unsere Erwartungen erfüllen. Entsprechend fasse ich die Logik als ein Instrument auf, das dazu dient, die Sprachen, in denen wir unsere Theorien darstellen, zu reglementieren.

Genauigkeit, Kalkülisierung und strenge Beweisverfahren gelten allgemein als vorzügliche Tugenden der Logik. Um all die Konsequenzen, die unsere Theorieformulierungen nach sich ziehen, möglichst vollständig und präzise zu erfassen, sind wir auf die schärferen Ausdrucksmittel angewiesen, die sie uns liefert. In der Alltagssprache können wir zum Beispiel über Mengen oder Eigenschaften nur in sehr unvollkommener Weise sprechen. Unklarheiten und drohende Widersprüche, wie etwa derjenige, der durch die Bildung der Menge aller Mengen, die sich nicht selbst enthalten, entsteht, lassen sich nur dadurch vermeiden, dass wir auf die Gesetze einer axiomatisierten Mengenlehre greifen, die uns erlauben, derartige Objekte genau zu definieren. Während des Präzisionsprozesses müssen wir allerdings darauf achten, dass die gewöhnliche Kernbedeutung der Terme erhalten bleibt, da sonst die intuitive Einsichtigkeit unseres Tuns, ohne die wir letztlich nicht auskommen, verloren ginge. Wie wichtig solche Sprachreglementierungen auch für die Philosophie sein können, habe ich in früheren Arbeiten zu zeigen versucht. (Cf. «Probleme der Ontologie», *Zeitschrift für allge-*

meine Wissenschaftstheorie, IX, 1, 1978; und «Ontologie im Lichte einer zeitgenössischen Analyse», *Conceptus*, XIV, 33, 1980.) So lässt sich zum Beispiel mit Hilfe einer objektiv interpretierten Quantifikationstheorie als eines idealen Instrumentes, um die referentiellen Funktionen der Sprache festzulegen, die Verwendung des Wortes, «existieren» in klarer und eindeutiger Weise reglementieren. Das Vorgehen hat den Vorteil, dass es erlaubt, ein Kriterium für ontische Annahmen – «ontic commitment» wie Quine es nennt – zu formulieren: «In general, entities of a given sort are assumed by a theory if and only if some of them must be counted among the values of the variables in order that the theory be true». («Logic and the Reification of Universals», in *From a Logical Point of View*, New York 1961², S. 103.) Die Anwendung einer technischen Sprache führt zu einer Klärung der in der traditionellen Ontologie diskutierten Positionen des platonischen Realismus (der Ideen) und des Nominalismus. Es stellt sich dabei unter anderem heraus, dass die Verwerfung von abstrakten Entitäten insofern mit der Konstruktion der Mathematik unverträglich ist, als wir, um diese vollständig zu erhalten, nicht darum herum kommen, über Mengen zu quantifizieren. Diese Anspielung mag vorläufig zur Illustration der Nützlichkeit der Logik für die Philosophie genügen. Zugleich möchte ich aber vor der irrigen Auffassung warnen, dass mit der Sprachreglementierung auch die philosophischen Probleme gelöst werden oder dass die Sprachanalyse sie zum Verschwinden bringt, wie das gelegentlich der frühe Carnap und vor allem Wittgenstein mit seinen therapeutischen Neigungen nahegelegt haben. Jedenfalls dürfen wir unsere Sprachsysteme nicht so wählen, dass dadurch selbst Sachfragen schon entschieden oder sogar unausdrückbar gemacht werden.

Die Vielfalt der seit einiger Zeit entwickelten Systeme legt ferner die Vermutung nahe, dass es so etwas wie *die* Logik nicht gibt. Aus instrumentalistischer Sicht muss grundsätzlich jeder Versuch, ein bestimmtes System anderen gegenüber auszuzeichnen, scheitern. Wie Quine halte ich die Logik für prinzipiell revidierbar. Was die methodischen Gründe für eine tatsächliche Aufrechterhaltung betrifft, schlage ich jedoch eine weniger konservative Strategie vor als er. Von meinem Standpunkt aus bestehen keine zwingenden Gründe für eine Auszeichnung der klassischen Logik. Da ich im Gegensatz zu ihm

logische Systeme nicht als wissenschaftliche Theorien allgemeinsten Form betrachte, stellt sich für mich auch nicht die Frage nach ihrer eventuellen Wahrheit. Mangels eines objektiven Kriteriums, das einen Entscheid herbeiführen könnte, scheint mir deshalb der Streit zwischen Intuitionisten und Klassikern müßig zu sein. Abgesehen von der Schwierigkeit, den Begriff der Konstruierbarkeit genau zu definieren, spricht die grössere Vorsicht hinsichtlich der Existenzbehauptung von mathematischen Objekten zugunsten der ersteren. Die Tatsache dagegen, dass durch die strengen Anforderungen der Intuitionisten die Mathematik um wesentliche ihrer Teile amputiert wird, plädiert eher für die letzteren. Wenn man im Gegensatz zu Brouwer und Heyting die Logik für fundamentaler als die Mathematik hält, könnte man im übrigen wie Quine der Ansicht sein, dass eine konstruktivistische Haltung durchaus mit der Aufrechterhaltung der klassischen Logik verträglich sei: «Constructivist scruples can be reconciled with the convenience and beauty of classical logic» (*Philosophy of Logic*, Englewood Cliffs, 1970, S. 88). Angesichts des konditionalen Charakters logischer Systeme – die Theoreme sind nur dann wahr, wenn die Axiome es sind – glaube ich jedoch nicht, dass ihre Gültigkeit ohne willkürliche Berufung auf irgendeine Form von Evidenz zu erbringen ist. Mit Ausnahme von metalogischen Minimalforderungen wie Widerspruchsfreiheit oder schwache Vollständigkeit lässt sich die Tauglichkeit eines formalen Systems nicht empirisch belegen, sondern höchstens pragmatisch rechtfertigen. Im Zusammenhang mit der klassischen Mathematik bietet Quines Version der Prädikatenlogik durchaus ein adäquates Werkzeug von hinreichender Ausdruckstärke, das die Korrektheit genau der zulässigen Schlussweisen garantiert. Wenn abweichende Formen der Logik erforderlich werden, so liegt das nicht an irgendeiner objektiv nachweisbaren Falschheit, sondern an der Tatsache, dass sie bei ihrer Anwendung auf andere Gebiete versagt. In solchen Fällen muss sie entweder durch ein adäquateres System ersetzt oder durch Hinzufügung von zusätzlichem Vokabular erweitert werden. Veränderungen der einen oder der anderen Art nehmen wir allgemein dann vor, wenn ein bisher verwendetes System zu intuitiv unannehmbaren Konsequenzen führt. Historisch liesse sich das etwa an den Revisionen veranschaulichen, die durch Zulassung von singulären Termen ohne Refe-

renz oder durch gewisse in der Quantenmechanik auftauchende Unstimmigkeiten erforderlich schienen. Das letztere Beispiel scheint insofern besonders illustrativ, als Reichenbachs Einsicht, dass man durch vermittelst der klassischen Logik aus der Quantentheorie gezogene Folgerungen zu mit der übrigen Physik unverträglichen Ergebnissen gelangt, verschiedenartige Reaktionen ausgelöst hat. Seinem eigenen Vorschlag, den Missstand durch Einführung einer dreiwertigen Logik zu beheben, wurde entgegengehalten, einerseits, dass die Anomalien gar nicht folgen, andererseits, dass sie nicht wirklich unannehmbar seien, ferner – die missliche Lage zugestanden –, dass die Lösung nicht in einer Veränderung der Logik zu suchen sei und endlich, dass die von Reichenbach vorgeschlagene Korrektur nicht die richtige, d. h. seine dreiwertige Logik nicht die adäquate sei. Es liegt nicht an mir als einem Laien zu entscheiden; die Tatsache aber, dass solche Meinungsverschiedenheiten ernsthaft aufkommen konnten, berechtigt meine Zweifel an der empirischen Entscheidbarkeit der Streitfrage.

Umstände wie die, die ich hier kurz berührt habe, sprechen für eine pluralistische Konzeption der Logik. Vor allem möchte ich auf ihren normativen Charakter als eines Mittels hervorheben, das uns erlaubt, die Ausdrucksformen von Theorien so zu strukturieren, dass sie einer geregelten Argumentation zugänglich werden. Logische Techniken dienen in erster Linie der Herstellung von linguistischen Darstellungssystemen, in welche sie integriert werden, um die Gültigkeit der zulässigen Schlussweisen zu sichern. Formalisierungen haben also meiner methodischen Auffassung gemäss nur relativ zu einem Hintergrund systematischer Absichten einen Sinn, und, sofern sie nicht den Zweck verfolgen, relevante logische Strukturen aufzudecken und fruchtbar zu machen, bleiben sie ein leeres Spiel, das nichts zur Klärung philosophischer Fragen beiträgt. Als die Verkörperung von Regelsystemen schafft Logik in dieser Weise die einzige Form von Notwendigkeit, die wir wirklich verstehen. Ich bin überzeugt (Cf. «Method in Philosophy and Logic», *Dialectica*, 36, 4, 1982), dass jegliche Art von Zwang letztlich davon herrührt, dass wir die Vorschriften befolgen, die uns die ausdrückliche oder stillschweigende Anerkennung eines Normensystems auferlegt. Ich habe deshalb – trotz der formalen Eleganz der Möglichenweltensemantik – Vorbehalte hinsichtlich der in letzter Zeit

entwickelten Systeme der Modallogik. Meine Bedenken beziehen sich im wesentlichen darauf, dass bei allem Aufwand an Subtilität letzten Endes doch nicht einsichtig gemacht wird, was genau wir tun, wenn wir in modale Kontexte hineinquantifizieren. Das liegt, wie ich glaube, daran, dass die von Kripke, Barcan Marcus und anderen vorgelegten Erklärungen nur unter Voraussetzungen einer fragwürdigen essentialistischen Metaphysik überhaupt einen Sinn ergeben, was mich letztlich in der Überzeugung bestärkt, dass de re Modalitäten in einer empiristisch orientierten Philosophie keinen Platz haben.

Im Gegensatz zu Quine, dessen mit einem etwas einseitigen Behaviorismus gepaarter Holismus eine verkürzte Sicht der Aufgaben der Philosophie zur Folge hat, lege ich besonderes Gewicht auf die Frage nach dem Kontext. Es mag sein, dass seine kanonische Notation für die meisten Belange rein naturwissenschaftlicher Art genügt. Ich glaube jedoch nicht, dass wir unsere Ontologie auf physikalische Objekte und Mengen reduzieren sollten, indem wir nominalistische Skrupel bezüglich der letzteren mit Rücksicht auf die Unverzichtbarkeit der Mathematik überwinden. Wenn wir alle menschlichen Tätigkeiten in Betracht ziehen, so scheint es unumgänglich, auch weitere Bereiche wie etwa diejenigen der Mythologie und der Fiktion im allgemeinen zu beachten. Sofern man etwa im Unterschied zu «Pegasus gehört zum Rennstall des amerikanischen Präsidenten» die Wahrheit von «Pegasus ist ein geflügeltes Pferd» aufrechterhalten möchte, empfiehlt es sich nicht, eine logische Technik zu verwenden, die in Anlehnung an die Russellsche Analyse beide Sätze zu falschen macht. Obwohl Pegasus nicht in der empirischen Wirklichkeit existiert, ist er nichtsdestoweniger in der griechischen Mythologie ein geflügeltes Pferd, so dass der letztere Satz in diesem Rahmen als wahr gelten muss. (Es sind im übrigen Kontexte denkbar, in welchen auch der erste Satz wahr wäre.) Wenn sich die klassische Logik für bestimmte Zwecke bisher als das wirksamste und einfachste Instrument erwiesen hat, so müssen wir doch für die Erfassung weiterer Gebiete extensivere Systeme in Betracht ziehen, die unsere intuitiven Erwartungen in diesen Bereichen besser erfüllen. Für die Sprachphilosophie im besonderen scheinen andersartige Formalisierungsversuche zweckmässig zu sein, nämlich solche, wie sie etwa L. Goddard und R. Routley in Form einer Kontext-

logik vorgelegt haben. Bevor ich mich der Erörterung einiger Fragen zuwende, die sich vor der eigentlichen Ausarbeitung eines solchen Systems stellen, möchte ich trotz der eingestandenen Gefahr, dass übertriebene, tyrannische Exaktheitsansprüche bloss zu sterilen Übungen in geistiger Akrobatik verleiten, meine positive Einstellung zu einer massvollen Verwendung von logischen Techniken in der Philosophie hervorheben. Ich stimme H. Tennessen vorbehaltlos zu, wenn er sagt: «The empirically oriented language philosopher has no quarrel with the *«calculus constructors»*. On the contrary: the more empirical investigations reveal the *«untidiness»* of natural languages, the more apparent becomes the need for more precise and consistent formal systems, which permit one to cope with philosophically relevant problems, undisturbed by deceptive ambiguities and other potential bewilderments and perplexities enshrined in the natural languages, particularly in their ordinary employment». (In: *Logic and Language, Studies dedicated to Professor Rudolf Carnap on the occasion of his seventieth birthday*, Dordrecht, 1962, S. 230.)

Die Logiker folgen einer weit verbreiteten Praxis, wenn sie den Gebrauch im Kontext vernachlässigend die Wahrheit von Sätzen als permanente (syntaktische oder semantische) Eigenschaft ausgeben. Gegen dieses Vorgehen sprechen jedoch Tatsachen wie diejenige, dass etwa der Satz «Der Teil ist kleiner als das Ganze» im gewöhnlichen Alltag als analytisch durchgeht, während er in der Mengenlehre für unendliche Bereiche nicht gilt, da zum Beispiel die Menge der geraden Zahlen mit der Menge der natürlichen Zahlen äquivalent ist, obgleich die erstere eine echte Teilmenge der letzteren bildet. Das sollte uns eigentlich anregen, das Prädikat «wahr» auf die jeweils verwendete Sprache zu relativieren. Wie wichtig die pragmatischen Umstände der Äusserung sein können, geht schon daraus hervor, dass wir in der Regel unfähig sind, den Wahrheitswert eines Satzes zu bestimmen, wenn wir ihn völlig isoliert vorgelegt bekommen. «Homo homini lupus», wörtlich ein falscher Satz, könnte sich metaphorisch verstanden – im Zusammenhang etwa mit Hobbes Sozialphilosophie – als wahr erweisen. Da die klassische Logik solchen Tatsachen nicht gerecht wird, müssen wir auf Systeme sinnen, die neben der syntaktischen auch noch die semantische und pragmatische Adäquatheit der Formalisierung gewährleisten.

Allgemein betrachtet verwenden wir Sätze zum Zwecke der Kommunikation, d. h. um Informationen zu vermitteln, Fragen zu stellen, Befehle zu erteilen, Wünsche auszudrücken, Versprechen zu machen, etc. Wenn es sich im besonderen darum handelt, über wirkliche Sachverhalte zu berichten, d. h. ein empirisches Ding zu beschreiben oder zu identifizieren, müssen wir uns eines speziell dafür geeigneten Sprachsystems bedienen, das ich in einem engen Sinn ein deskriptives nenne und das dadurch charakterisiert ist, dass die Werte der Variablen, über die wir quantifizieren, physikalische Objekte sind. Wenn wir hingegen bloss erzählen, etwa einen Roman schreiben oder lesen, so machen wir trotz der Verwendung von indikativischen Sätzen keine eigentlich deskriptiven Aussagen, weil in diesem Falle die Quantoren über fiktive Entitäten laufen. Da ich intuitiv dazu neige, allen sogenannten deklarativen Sätzen Wahrheit zuzugestehen, sofern bestimmte Objekte des postulierten Universums Tarkis Erfüllungsbedingung befriedigen, weigere ich mich im Gegensatz zu Quine, Sätze, die Existenzbehauptungen bezüglich nicht in der Wirklichkeit vorkommender Dinge involvieren, einfach für falsch zu erklären. Denn falsch sind sie offensichtlich nur im Zusammenhang mit der Absicht, die Natur zu beschreiben, nicht aber zwangsläufig in jedem Kontext. Wenn wir annehmen, dass ein und derselbe Satz bei verschiedenen Gelegenheiten geäussert und auch verschieden verwendet werden kann, so beziehen wir uns dabei nicht auf die sichtbaren Zeichen oder hörbaren Laute, sondern auf den abstrakten Satztyp. Behaupten wir des weiteren von einem bestimmten Satztyp, er sei wahr, so kann das nur zutreffen, wenn alle konkreten Zeichen, die den betreffenden Typ exemplifizieren, dazu verwendet werden, dieselbe wahre Aussage zu machen. Dies wiederum kann nur der Fall sein, wenn wir den Gebrauch der Zeichen auf einen bestimmten Kontext festlegen und die Zeichenreihen, die in diesem zur Äusserung von Aussagen verwendet werden, als Wahrheitsträger betrachten.

Quine grenzt, wie das in der philosophischen Literatur üblich ist, den Gebrauch des Wortes «Referenz» auf Objekte der wirklichen Welt ein; «Pegasus ist ein geflügeltes Pferd» ist für ihn ein falscher Satz, weil der Name kein in der Natur existierendes Ding bezeichnet. Um einer derart extremen Konsequenz auszuweichen, schlage ich also vor, den Gebrauch auch auf

abstrakte und fiktive Entitäten zu erweitern und zugleich die Frage nach der Referenz vom Kontext abhängig zu machen. Damit komme ich der gewöhnlichen Intuition entgegen, dass die Frage, worüber jeweils gesprochen wird, vom Gesprächsthema sowie vom gewählten Sprachsystem abhängt. Wenn ich während einer Bahnfahrt auf der Titelseite des Buches meines Gegenübers die Schriftzeichen «Harmonie des Seins» sehe, ist es mir mangels weiterer Information nicht möglich zu entscheiden, ob er ein deutsches Werk metaphysischen Inhalts oder eine französische Abhandlung über weibliche Schönheit liest. Es scheint deshalb vernünftig, konkreten, in einem gegebenen Kontext geäußerten Sätzen einen Wahrheitswert zuzuordnen, denn solche sind es, die wir verwenden, um bei bestimmten Gelegenheiten wahre oder falsche Aussagen zu machen.

Im Hinblick auf eine für die Sprachphilosophie adäquate Logik legen nun die soweit angestellten Überlegungen einen allgemeinen Plan folgender Art nahe: Wir führen zwei Kategorien von Variablen ein, denen konkrete Zeichen in Form von resp. Wörtern und Sätzen der Hintergrundsprache als Werte zugeordnet werden. Da aber auch die Umstände, unter welchen diese Zeichen verwendet werden, eine Rolle spielen, müssen wir zusätzlich Kontextvariablen vorsehen, die die ursprünglichen Variablen qualifizieren. Entsprechend stehen dann die zusammengesetzten Formeln, die wir mit deren Hilfe bilden, für faktische Äusserungen in einem Kontext. Es ist im übrigen zu beachten, dass jede einzelne der in der Liste von Buchstabenzeichen: $p, q, p', p'', q'',$ etc. angeführten Satzvariablen einen Typ exemplifiziert, sodass in einer Formel jeder konkrete Buchstabe desselben Typs eine Leerstelle für eine Konstante des gleichen Typs markiert. Dem Gesetz der uniformen Substitution gemäss müssen wir deshalb, falls wir Konstanten für Variablen einsetzen, bei jedem Vorkommen eines Variablenzeichens des betreffenden Typs dieses durch eine Konstante des entsprechenden Typs ersetzen.

Man könnte nun befürchten, dass die effektive Formalisierung zu einem unüberblickbar komplizierten System führt. Goddard und Routley haben jedoch in *The Logic of Significance and Context* (Scottish Academic Press, Edinburgh and London, 1973) auf dieser Basis eine relativ handliche Logik entwickelt, deren formaler Apparat ausreicht, um all die erwähnten Sachverhalte auszudrücken – im besonderen die Tatsa-

che, dass Sätze desselben Typs dazu dienen können, verschiedene Aussagen zu machen, und dass Sätze verschiedenen Typs verwendet werden können, um die gleiche Aussage zu machen etc. Die Theoreme, von denen Goddard und Routley die wichtigsten auflisten, handeln von Sätzen, die einem Anführungsoperator unterstehen, d. h. von Sätzen, die bloss erwähnt («mentioned») und nicht verwendet («used») werden. Sie drücken also nicht Relationen unter den Sätzen selbst, sondern Beziehungen zwischen Eigenschaften von Sätzen aus. Das Verfahren erlaubt es, die Kontextlogik als einen Anwendungsfall der klassischen zweiwertigen Logik mit zusätzlichen Postulaten aufzuziehen: «In fact, [...] formal logic has never really required for its application absolutely contextless sentences. Rather, at the beginning of an application [...] the context is fixed; the domain of discourse (or of individuals in the model) is specified, the (reference) values of individual constants are laid down and so on. Often this is done informally, but there is provision in the standard quantificational semantics for much of it to be done in a more formal way, and this formalisation can be increased» (a. a. O., S. 221.)

Wenn ich auf dem Interesse beharre, das die Philosophie an der Entfaltung derartiger Systeme hat, so will ich damit nicht behaupten, dass sie die Systeme der sog. idealen Sprache ersetzen sollten. Die klassische Logik bewahrt für gewisse – auch philosophische – Zwecke ihre Fruchtbarkeit. Nur können ihre Vorzüge nicht unabhängig von einer vorgängigen weniger exakt reglementierten Sprache beurteilt werden. Den Streit zwischen den Anhängern der natürlichen und der idealen Sprache halte ich insofern für unfruchtbar, als wir weder die erstere als schlechthin defekt noch die letztere als hoffnungslos inadäquat abweisen können. Sowohl die Betrachtung von Sätzen als rein linguistischen Gebilden wie auch die Untersuchung ihres tatsächlichen Gebrauchs stellen einen nicht zu vernachlässigenden Aspekt der Forschung dar, und ein allzu enger Begriff von Logik würde uns daran hindern, dieser methodisch gebotenen Komplementarität gebührend Rechnung zu tragen. Eine Reduzierung der formalen Logik auf die klassische Quantifikationstheorie scheint daher keineswegs empfehlenswert – und zwar deshalb nicht, weil die Frage nach der Signifikanz von Sätzen nicht allein aufgrund von syntaktischen oder semantischen Regeln

auszumachen ist. Die Bedeutung eines Satzes stellt keine permanente Eigenschaft an diesem selbst dar, sondern betrifft seine Verwendung, die kontextabhängig ist. Wenn wir nämlich versuchen, sinnlose Sätze bloss mit Hilfe von grammatikalischen Regeln zu eliminieren, so scheitern wir unweigerlich daran, dass wir entweder zu viel oder zu wenig ausschliessen. Wenn dagegen die Vertreter der idealen Sprache von der Annahme ausgehen, dass ihre Systeme Sätze enthalten, deren Bedeutung nicht vom Gebrauch abhängt und deren Referenzfragen ohne Rücksicht auf den Kontext fixiert werden, so schieben sie einfach das Geschäft als ein in ihrem eigenen Sinne nicht-logisches auf die Metastufe ab, wo sie es einer intuitiven Erledigung überlassen. Es könnte jedoch durchaus eine Situation eintreffen, wo Formalisierungen auch auf der Metaebene erforderlich werden und sich als nützlich erweisen.

In seiner Antwort auf einige Einwände, die Cargile im Zusammenhang mit dem Aufsatz «The Logical Form of Action Sentences» (In: *Essays on Action and Events*, Oxford, 1980, S. 137–146) formuliert, legt Donald Davidson eine subtile und brillante Verteidigung der klassischen Quantifikationstheorie vor. Obschon seine Auffassung auf den ersten Blick hin als der meinen entgegengesetzt erscheinen mag, glaube ich, dass, was seine Erläuterung des Begriffs der logischen Form betrifft, weitgehende Übereinstimmung besteht. Davidson argumentiert, dass die Schlussfolgerungen vereinfacht und mechanisch vollziehbar gemacht werden, wenn wir die Sätze in einer kanonischen Notation ausdrücken, deren Syntax wesentlich von der sog. Oberflächengrammatik abweicht: «The entailments we preanalytically recognize to hold between the original sentences become matters of quantificational logic applied to their rephrasals» (a. a. O., S. 139). Wie aber lässt sich die Behauptung rechtfertigen, dass die in der kanonischen Sprache paraphrasierten Sätze die Struktur ihrer Vorlagen widerspiegeln? Wie können wir wissen, dass wir es nicht mit verschiedenen Formen zu tun haben? Ganz in meinem Sinne antwortet Davidson, dass das, was er die «logische Geographie» eines Satzes nennt, nur relativ zu einem gegebenen Deduktionssystem bestimmt werden kann: «The logical form of a particular sentence is [...] relative both to a theory of deduction and to some prior determinations as to how to render sentences in the language of the theory» (a. a. O., S. 140). Ich

stimme ihm durchaus zu, wenn er trotzdem die Wahl der Quantifikationssprache nicht für willkürlich hält. Denn im Kontext, von dem in seinem Artikel die Rede ist, lassen sich charakteristische Züge wie Einfachheit, Ausdruckskraft, Widerspruchsfreiheit, Vollständigkeit, etc. anführen, die ihre Verwendung pragmatisch rechtfertigen. Ich wäre sogar bereit, ihm einzuräumen, dass die Quantifikationstheorie im Zusammenhang mit den von ihm erörterten Fragen die bestmögliche Theorie darstellt, über die wir zur Zeit verfügen. Er weist in überzeugender Weise nach, dass sie, was Handlungs- und Ereignissätze betrifft, mehr Daten mit einem geringeren Aufwand an Regeln erklärt als die von ihm kritisierten rivalisierenden Theorien und dass sie, anders als diese, keine unannehmbaren Konsequenzen nach sich zieht. Die Regeln der Quantifikationslogik erlauben es unter anderem, systematisch zu erfassen, wie die Bedeutung eines Satzes funktional mit seiner Struktur zusammenhängt, und sie lassen sich dadurch rechtfertigen, dass sie nachweisbar wahrheitserhaltend, d. h. gültig in dem Sinne sind, dass sie von Wahrheiten immer nur zu Wahrheiten führen. Die Sprachen des Prädikatenkalküls erster Stufe haben vor allem auch den Vorteil, dass wir in ihrem Falle über eine klare Semantik verfügen, die im Rahmen der für Davidson zentralen Theorie Tarskis die Wahrheitsbedingungen eindeutig festlegt. Schlussregeln dagegen, die nicht durch eine semantische Theorie gestützt werden, weist er mit Recht als für die logische Form irrelevant ab. Die Aufzählung all der unbestrittenen Tugenden kommt jedoch keineswegs einer objektiven Auszeichnung der Quantifikation als *der* (wahren) logischen Theorie gleich, wie er selbst letzten Endes eingestehen muss: «But when other problems are also emphasized, it may well be that [...] the theory must be augmented, and perhaps it will have to be abandoned» (a. a. O., S. 145). Es scheint mir bezeichnend, dass ein Autor, der in mancher Hinsicht Quine nahesteht, sich letztlich gezwungen sieht, Konzessionen zu machen, die ihn in gefährliche Nähe einer instrumentalistischen Konzeption rücken.

In gewissen Kreisen der europäischen Philosophie herrscht immer noch das Vorurteil, Logik sei ein *asylum ignorantiae* oder ein Tummelfeld für Barbaren und Mathematiker. Ich hoffe, dass meine Hinweise zu einer richtigen Beurteilung der Lage beitragen werden. Andererseits halte ich gegen eine ebenfalls noch stark ver-

breitete Haltung daran fest, dass es nichts derartiges wie *die* Logik als ein endgültig kristallisiertes System geben kann. Als ständig verbesserungsfähiges Instrument stellt Logik die Summe von sich wandelnden Regeln oder formalen Techniken dar, die wir je nach Bedarf und Eignung einsetzen, um unsere wissenschaftlichen Erkenntnisse einer exakten Darstellung sowie einer disziplinierten Kontrolle zu unterziehen. Den Wert dieser normativen Be-

mühungen dürfen wir allerdings nicht unterschätzen, denn ohne sie wäre eine kritische Bewertung unserer Theorien nicht möglich.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. Henri Lauener
Philosophisches Institut der
Universität Bern
Falkenplatz 16
CH-3012 Bern

Wenn/dann-Verbindungen in der Logik und in der natürlichen Sprache

Hans J. Schneider

1.

Die Formulierung unseres Rahmenthemas, «Logik zwischen Mathematik und Philosophie», legt verschiedene Anschlussfragen nahe: Einmal die Frage, wem die Logik *nutzt*, der Mathematik (– gar den Wissenschaften überhaupt –) oder der Philosophie; genauer: Auf welche Weise nutzt sie den Wissenschaften einerseits, der Philosophie andererseits? Die Themenstellung legt aber auch die Frage nahe: Wohin *gehört* die Logik *selbst*, zur Mathematik oder zur Philosophie? Sie zielt darauf ab, den Charakter der Tätigkeit des Logikers aufzuklären; ist sie eine eher mathematische Tätigkeit (etwa: die Untersuchung gewisser «logisch» genannter Kalküle) oder eine eher philosophische Tätigkeit (etwa: die Untersuchung der Bedeutungsseite gewisser Bereiche unserer natürlichen Sprache)?

Dass wir heute Logik und Mathematik als eng benachbarte Disziplinen betrachten, geht wesentlich auf die Arbeiten Gottlob Freges zurück. Zwar wollte er nicht die Logik als Spezialgebiet der Mathematik erweisen, sondern die Mathematik auf die Logik gründen, aber auch diese Zielsetzung führte ihn zu einer starken Betonung der Gemeinsamkeiten beider Bereiche, vor allem zu einer umfassenden Anwendung des aus der Mathematik stammenden Begriffs der Funktion auf logische Fragestellungen: Begriffe deutete er als Funktionen, deren Werte stets Wahrheitswerte sind, und auch die Satzverbindungswörter fasste er als Ausdrücke für Funktionen auf, nämlich für solche, deren Werte *und* Argumente Wahrheitswerte sind.

Frege war sich im klaren darüber, hier eine Abstraktion vorzunehmen, die natürliche Sprache, aus deren Vorrat an Ausdrucksmitteln die Satzverbindungswörter ja stammen, unter einem speziellen, eingeschränkten Gesichtspunkt zu betrachten. Wie er diese Abstraktion deutete, zeigt sich in seiner Aussage, ihm gehe es darum, den Gedanken rein wiederzugeben¹, ihn von

demjenigen zu befreien, «womit ihn allein die Beschaffenheit des sprachlichen Ausdrucksmittels behaftet»². Mit Bezug auf seine Einführung der so genannten «materialen Implikation» (auch «klassische Subjunktion» genannt), d. h. einer der Wenn/dann-Verbindungen, die mich im folgenden beschäftigen werden, schreibt Frege:

«Freilich wird diese Auffassung eines hypothetischen Satzgefüges zunächst befremden. Es kommt bei meiner Erklärung nicht darauf an, den Sprachgebrauch des Lebens zu treffen, der für die Zwecke der Logik meist zu verschwommen und schwankend ist. Da drängt sich allerlei heran, z. B. das Verhältnis von Ursache und Wirkung, die Absicht, mit der ein Redender einen Satz von der Form «Wenn B, so A» ausspricht, der Grund, aus dem er seinen Inhalt für wahr hält. Der Redende gibt vielleicht Winke hinsichtlich solcher beim Hörenden etwa auftauchenden Fragen. Solche Winke gehören zum Beiwerke, das in der Sprache des Lebens den Gedanken oft umrankt. Meine Aufgabe ist es hier, durch Abscheidung des Beiwerks als logischen Kern ein Gefüge von zwei Gedanken herauszuschälen, ein Gefüge, welches ich hypothetisches Gedankengefüge genannt habe.»³

Ein faszinierendes Bild: Die Logik als die Lehre von den reinen Gedanken und ihren Verbindungen, unverfälscht ausgedrückt durch eine an mathematischer Klarheit orientierte «Formelsprache des reinen Denkens»⁴, die von allen Täuschungen und nicht zur Sache gehörenden Beimischungen der Grammatiken der natürlichen Sprachen befreit ist. Entsprechend erscheint die materiale Implikation, d. h. die wahrheitsfunktionale Auffassung des Wenn/dann, nach der ein Satz der Form «wenn A, dann B» nur dann falsch ist, wenn «A» wahr, «B» aber falsch ist, als logischer Kern, als von allen irreführenden Assoziationen gereinigter Ausdruck eines Verhältnisses zwischen zwei

Gedanken, das wir im Deutschen unvollkommen und auf mehrdeutige Weise mit den Wörtern «wenn...dann» zum Ausdruck bringen. Die Untersuchung von Freges Logikkalkül wäre zugleich eine Untersuchung des reinen Denkens.

Nun scheint es mir weitgehend unstrittig, dass Freges Voraussetzung, es existiere eine Sphäre eines von Ausdrucksmitteln unabhängigen reinen Denkens, nicht haltbar ist. Dies hat zur Folge, dass seine wahrheitsfunktionale Deutung der Satzverbindungswörter nicht mehr durch die These begründet werden kann, sie spiegle die Fügungsmöglichkeiten in diesem reinen Gedankenreich wider. Wollte man diese Deutung also weiterhin als für die Logik konstitutiv betrachten, so bedürfte dies einer neuen, von derjenigen Freges verschiedenen Begründung, denn niemand wird allein aus dem historischen Faktum, dass Frege von dem Gedanken fasziniert war, den Begriff der Funktion auf traditionelle logische Fragen anzuwenden, schon folgern wollen, dadurch sei verbindlich definiert, was unter Logik zu verstehen sei.

Wenn wir die damit angesprochenen Fragen klären wollen, bietet es sich als Vorgehen an, als erstes Freges unzureichend begründete Abstraktion wieder rückgängig zu machen und Wenn/dann-Verbindungen in der natürlichen Sprache zu studieren. Wenn es uns gelingt, uns im Verlauf einer sprachphilosophischen Klärung eine (mit dem späten Wittgenstein gesprochen:) «Übersicht»⁵ über diesen Sektor der Sprache zu schaffen, gegebenenfalls ein Netz von Arten von Wenn/dann-Verbindungen aufzuspüren, die zueinander im Verhältnis der «Familienähnlichkeit»⁶ stehen, dann werden wir möglicherweise beurteilen können, wohin in diesem Netz die wahrheitsfunktionale Deutung des Wenn/dann gehört, und ob sie vielleicht zu Recht, wenn auch aus anderen als den von Frege herangezogenen Gründen, beanspruchen kann, den «logischen Kern», das Zentrum dieses Netzes zu bilden.

Im folgenden werde ich nicht ganz so weit kommen, aber einen Schritt in diese Richtung tun. Allerdings will ich nicht versuchen, in linguistischer Manier eine möglichst vollständige Liste von Gebrauchsweisen der Wenn/dann-Verbindung zu erarbeiten, sondern ich werde mich eng an Untersuchungen orientieren, die zwar die Grenzen des Gebiets der assertorischen Logik überschreiten, die aber aus der in der Nachfolge Freges entstandenen Logik hervorgegangen

sind. Und im Gegensatz zu manchen Vertretern der «Ordinary-Language-Philosophie» verbinde ich damit kein bloss archivierendes Interesse, es kommt mir vielmehr auf die Aufdeckung systematischer Zusammenhänge zwischen Sprechhandlungen an.

2.

Ich betrachte zunächst einige Überlegungen, die in der deontischen Logik über die Eignung der materialen Implikation zum Ausdruck bedingter Obligationen angestellt wurden. In seinem Aufsatz «Deontic Logic»⁷ aus dem Jahre 1951 hatte G. H. von Wright die Formulierung (1) $O(A \rightarrow B)$

benutzt, worin «A» und «B» für Ausdrücke stehen, die Handlungen beschreiben (z. B. «Moped fahren» und «einen Sturzhelm tragen»), und der Pfeil für die materiale Implikation. Der Ausdruck (1) drückt dann (mit «O» für «es ist obligatorisch») die Gebotenheit einer sogenannten «Implikationshandlung»⁸ aus, wobei eine Implikationshandlung « $A \rightarrow B$ » darin bestehen soll, entweder A zu tun und zusätzlich B zu tun, oder A zu unterlassen und B entweder zu tun oder zu unterlassen. Das in (1) ausgedrückte Gebot ist also äquivalent zum Verbot («V» steht für «es ist verboten»)

(2) $V(A \wedge \neg B)$,

auf das genannte Beispiel bezogen also zu: «Es ist verboten, Moped zu fahren, und dabei das Tragen eines Sturzhelms zu unterlassen».

Interessant für das hier behandelte Thema ist nun die Tatsache, dass Wright sich genötigt sieht, ausser dem Begriff der Implikationshandlung einen weiteren Begriff einzuführen, den der «bedingten Handlung», und dass er für dessen Bestimmung ein Zeichen einführt, dessen Sinnfestlegung nicht wahrheitsfunktional, nicht einmal aussagenlogisch, erfolgt. Der Anlass dazu war der Hinweis von A. N. Prior⁹, dass in von Wrights System logisch gilt (mit «P» für «es ist erlaubt»):

(3) $\neg P(A) \rightarrow O(A \rightarrow B)$,

was zunächst keineswegs überraschend ist. Wenn man aber, wie es von Wright getan hatte, « $O(A \rightarrow B)$ » liest als «es ist geboten, wenn man A tut, auch B zu tun», dann muss man (3) lesen als Ausdruck dafür, dass, wenn A nicht erlaubt ist, es geboten ist, dass, wenn jemand (trotzdem) A tut, er dann auch jede beliebige andere Handlung tut (ein beliebiges B).

Aus Priors Hinweis zieht von Wright den Schluss, dass die Formulierung « $O(A \rightarrow B)$ », ob-

wohl für manche Obligationen sinnvoll, als Darstellung bedingter Verpflichtungen nicht in Frage kommt; um diesen wichtigen Typus von Obligation, der für alle Normensysteme von zentraler Bedeutung ist, gleichwohl ausdrücken zu können, führt er den Begriff der bedingten Handlung ein. Zur Darstellung solcher Handlungen benutzt er das Zeichen «/» (ich nenne es «Bedingungszeichen») und liest den Ausdruck (4) $P(p/c)$

als «p ist erlaubt unter den Bedingungen c» (entsprechend « $\neg P(p/c)$ »: «p ist verboten unter Bedingungen c»; « $\neg P(\neg p/c)$ »: «es ist verboten, p unter Bedingungen c zu unterlassen» oder «p ist unter c obligatorisch»).

In seinem späteren Buch «Norm and Action» gibt von Wright eine handlungstheoretische Untermauerung für das neue Zeichen¹⁰. Er führt dort zunächst einen nicht-deontischen, rein deskriptiven Ausdruck der Form

(5) $d(-T-)/-T-$

ein, der, ergänzt man ihn z. B. zu

(6) $d(\neg pTp)/qT\neg q$,

die Handlung beschreibt, die darin besteht, anlässlich des Wechsels («T» für «transition») von q zu $\neg q$ (z. B. von «das elektrische Licht brennt» zu «es brennt nicht») die Handlung auszuführen, die in einer Veränderung der Welt von $\neg p$ zu p (z. B. von «die Petroleumlampe brennt nicht» zu «sie brennt») besteht. In einem zweiten Schritt können jetzt die deontischen Operatoren auf solche Handlungsausdrücke angewendet werden, z. B. kann man die Obligation, bei Verlöschen des elektrischen Lichtes die Petroleumlampe anzuzünden, notieren als

(7) $O(d(\neg pTp)/qT\neg q)$.

Bei diesem Aufbau erscheint die Bedingtheit als Eigenschaft einer Handlung; die in (7) ausgedrückte Obligation ist selbst unbedingt. Wir haben hier also nicht eine bedingte Obligation zu einer «einfachen» Handlung vor uns, sondern eine unbedingte Obligation zu einer Bedingthandlung. Damit ist zwar ein nicht wahrheitsfunktionales Zeichen eingeführt, das mit Bedingungsverhältnissen, die wir in der natürlichen Sprache mit den Wörtern «wenn...dann» zum Ausdruck bringen, offenbar etwas zu tun hat, die ursprüngliche Frage aber, ob die materiale Implikation zum Ausdruck bedingter Obligationen geeignet ist, ist dadurch in den Hintergrund getreten. Was zunächst als junktorenlogische Komplexität des Ausdrucks für eine Obligation erschien, ist durch diesen Schritt zu

einer Komplexität neuen Typs eines Handlungsausdrucks geworden.

Dieses Verfahren stösst an Grenzen, die es rat-sam erscheinen lassen, einen anderen, wenn auch damit verwandten Weg einzuschlagen. Es stellt sich nämlich heraus, dass sich bedingte Aufforderungen zwar manchmal, aber durchaus nicht immer als Aufforderungen zu Bedingthandlungen lesen lassen. Für Bedingthandlungen ist es charakteristisch, dass das Auftreten der Bedingung und der Vollzug der Handlung gleichzeitig stattfinden. Nur dann lässt sich auch sagen, dass bei einer Obligation zu einer Bedingthandlung ein besonderer Typus von Handlung *unbedingt* obligatorisch ist. Es gibt aber andere Fälle von bedingten Geboten, die sich nicht so interpretieren lassen, sondern in denen die Bedingtheit eine Eigenschaft des Gebots ist. Von Wright erläutert dies am Fall des Versprechens¹¹: Die Obligation, wenn man jemandem versprochen hat, H_1 zu tun, H_1 auch tatsächlich zu tun, lässt sich nicht ausdrücken als die Verpflichtung zur komplexen Handlung, *beim* Abgeben des Versprechens H_1 zu tun. In diesem Fall lässt sich die Tatsache nicht umgehen, dass *zwei* Handlungen zu unterscheiden sind, die zu zwei verschiedenen Gelegenheiten ausgeführt werden: das Versprechen, H_1 zu tun, und die Ausführung von H_1 . Die Obligation zur zweiten Handlung, die durch die erste Handlung entsteht, ist nicht die Obligation zu einer einzigen komplexen Handlung. Von Wright sieht hier die Grenze seiner Methode, bedingte Verpflichtungen darzustellen: Bedingte Aufforderungen oder Gebote lassen sich nicht in allen Fällen durch unbedingte Gebote zu speziellen «Bedingthandlungen» ersetzen.

3.

Ich verlasse hier die Überlegungen von Wrights und komme auf die Behandlung bedingter Aufforderungen und Selbstverpflichtungen in der Darstellung von Lorenzen aus dem Jahre 1973 zu sprechen¹². Es geht mir dabei um die Aufdeckung eines stark an den späten Wittgenstein erinnernden Vorgehens, dessen Eigenart im Text selbst in keiner Weise hervorgehoben wird und deshalb sehr unauffällig bleibt. Es ist gewiss kein Zufall, dass Lorenzen bei dieser Gelegenheit sowohl auf von Wrights Bedingungszeichen verweist als auch seinen eigenen Vorschlag in engstem Zusammenhang mit der Sprechhandlung des Versprechens sieht, an dem von

Wright die Grenzen seiner Darstellungsweise erläutert hatte. Aus dem Hinweis auf das Versprechen gewinnt Lorenzen übrigens das ausserhalb mathematischer Überlegungen stärkste Motiv für die Einführung der konstruktiven Variante des Subjunktors.

Lorenzens Grundgedanke lässt sich, mit einer leichten Modifikation, die ich unten begründen werden, wie folgt darstellen: Bereits eingeführt seien Aufforderungen und unbedingte Selbstverpflichtungen (bei Lorenzen «Versprechen»), darstellbar (mit «N» für einen Nominator, d. h. einen logischen Eigennamen, « π » für die Kopula «tut» und «P», «Q» etc. für geeignete Handlungsprädikatore) als

(8) ! (N π P) (Aufforderung) und

(9) ; (N π P) (Selbstverpflichtung bzw. Versprechen).

Lorenzen schlägt vor¹³, vom Ausdruck (9) unmittelbar überzugehen zum *bedingten* Versprechen; er betrachtet es offenbar als eine naheliegende und unproblematische Möglichkeit, die Selbstverpflichtung zu einer eigenen Handlung davon abhängig zu machen, dass derjenige, demgegenüber man sich verpflichtet, vorher selbst eine andere Handlung getan hat. Man denke an alltagssprachliche Sätze wie «streichst du mir den Zaun, repariere ich dir das Fahrrad». Will man diese mit Hilfe der bisher verfügbaren Darstellungsmittel notieren, zugleich aber Suggestionen und Vorgriffe bezüglich der Art des hier benutzbaren Wenn/dann vermeiden, so liesse sich eine Form wählen wie die folgende (mit «N₁» für den Sprecher und «N₂» für die angesprochene Person):

(10) ; ([N₂ π Q] N₁ π P).

Man beachte, dass der Ausdruck, der in (10) hinter dem Selbstverpflichtungszeichen (d. h. dem umgekehrten Ausrufezeichen) steht, nicht eine Darstellung einer komplexen Handlung ist (darin unterscheidet sich (10) von einer Formulierung mit von Wright Bedingungszeichen), sondern eine Aneinanderfügung zweier Handlungsbeschreibungen des Typus «du tust Q, ich tue P». Da der Gesamtausdruck, wie das umgekehrte Ausrufezeichen anzeigt, eine Selbstverpflichtung ist, da man sich zu Handlungen anderer Personen aber nicht ohne weiteres verpflichtet kann, und da darüberhinaus sehr leicht Handlungskontexte denkbar sind, in denen der Sinn des im Schritt von (9) auf (10) hinzugefügten Ausdrucks «[N₂ π Q]» ohne Schwierigkeiten deutlich zu machen ist, darf dieser Schritt wohl als unproblematisch mögli-

che Erweiterung eines «Sprachspiels» gelten, ähnlich wie bei Wittgenstein der Schritt von Sprechhandlungen des Typs «Platte» zu solchen des Typs «fünf Platten».

Wir nehmen also an, die Ausdrucksform (10) sei zu einem festen Bestandteil des erweiterten Sprachspiels geworden, was auch bedeutet, dass die dabei benutzten eckigen Klammern immer in dem Sinn verstanden werden, dass der Ausdruck zwischen ihnen eine Bedingung nennt, die mit der Selbstverpflichtung verbunden ist. Eine erste Modifikation von (10) besteht dann darin, dass innerhalb der eckigen Klammern ein nicht auf eine Handlung des Adressaten bezogener Satz der Form « $x\epsilon S$ » (mit « ϵ » für die Kopula «ist» und «S» für einen geeigneten, nicht eine Handlung bezeichnenden Prädikator) oder «N₃ π R» (mit «N₃» für eine dritte Person) steht; wir erhalten also:

(11) ; ([$x\epsilon S$] N₁ π P), bzw.

(12) ; ([N₃ π R] N₁ π P).

Dieser Schritt macht abermals keine Probleme; ist die Sprechhandlung des bedingten Versprechens erst bekannt, so ist es eine ohne weiteres sinnvolle Möglichkeit, die im Versprechen zugesagte Handlung nicht von einer Handlung des Adressaten, sondern vom Vorliegen eines Sachverhalts oder der Handlung einer dritten Person abhängig zu machen. Das dem Adressaten mögliche «Einklagen», das für das Versprechen konstitutiv ist, besteht in diesem Fall nicht darin, auf den Vollzug seiner eigenen Handlung zu verweisen, sondern auf die Handlung jener dritten Person N₃ oder auf das Vorliegen des mit « $x\epsilon S$ » ausgedrückten Sachverhalts. Es ist hier also gegebenenfalls ein Satz der Form « $x\epsilon S$ » oder «N₃ π R» zu begründen. Ist dies der Fall, so ersetzt die Begründungshandlung die in der ursprünglichen Form (10) als Bedingung genannte nichtsprachliche Handlung des Adressaten.

Zur Subjunktion gelangt Lorenzen in einem dritten Schritt, der darin besteht, den Ausdruck nach der eckigen Klammer, der vom ursprünglichen Sinn des Versprechens her die Form «ich tue P» (bzw. «ich werde P tun») haben müsste, durch einen Ausdruck der Form « $x\epsilon T$ » («T» steht für einen Prädikator, der kein Handlungsprädikator ist) zu ersetzen, so dass wir erhalten:

(13) ; ([$x_1\epsilon S$] $x_2\epsilon T$),

z. B. «Hiermit verspreche ich dir, wenn Onkel N. nicht im Haus ist, ist er gewiss im Garten». Mit diesem Schritt ist auch die in Aussicht gestellte Handlung des Versprechenden durch

eine Begründungshandlung ersetzt; hier wird nicht mehr unmittelbar eine Handlung genannt, deren Ausführung versprochen wird, sondern ein Sachverhalt, für dessen Vorliegen der Versprechende so «einstehen» will wie für den Vollzug einer eigenen Handlung. Und wenn das Versprechen «eingeklagt» wird, wenn der Adressat also « $x_1 \varepsilon S$ » begründet, dann entsteht dem Versprechenden die Verpflichtung, nun seinerseits für « $x_2 \varepsilon T$ » einzustehen, und das bedeutet im Zweifelsfall, diesen Satz zu begründen.

Es ist klar, dass von einem *Versprechen* nur im übertragenen Sinn gesprochen werden kann, wenn das, was versprochen wird, das Bestehen eines Sachverhalts ist. Es wäre sprachlich angemessener, statt des oben als Beispiel genannten Satzes zu formulieren «hiermit *versichere* ich dir, wenn Onkel N. nicht im Haus ist, ist er gewiss im Garten». Zugleich dürfte aber deutlich sein, dass durch diese leicht nachvollziehbare Modifikation der ursprünglichen Versprechenshandlung eine weitere sinnvolle Sprechhandlung konstituiert wird. Da durch den Schritt von (11) und (12) nach (13) der Charakter der Sprechhandlung insofern stark verändert wird, als es sich tatsächlich nur noch im übertragenen Sinne um ein Versprechen handelt, kann man sich entschliessen zu fordern, dass die Form (13), bei der im Ausdruck nach der eckigen Klammer keine Handlungsbeschreibung steht, stets zu ersetzen ist durch einen Ausdruck mit Subjunktionspfeil, und man kann definieren:

(Def.) $a \rightarrow b \Leftrightarrow_i ([a] b)$; (mit «a» und «b» für nicht handlungsbezogene deskriptive Aussagen).

4.

Die hier gewählte Vorgehensweise, erst mit dieser Definition das aussagenlogische Subjunktionszeichen einzuführen, stimmt mit dem Aufbau bei Lorenzen nicht völlig überein, und zwar nicht nur in der Notationsweise, sondern auch im sachlichen Gehalt. Dies wirkt sich dort aus, wo Lorenzen bedingte Aufforderungen unter Benutzung des Subjunktionszeichens einführt¹⁴; es ergeben sich dabei, nimmt man die Sache genau, gewisse Inkonsistenzen, und diese Tatsache spricht dafür, den im letzten Abschnitt vorgetragenen leicht modifizierten Weg einzuschlagen. Lorenzen schreibt nämlich statt der oben benutzten Formulierung (9) (d. h. statt

« $j(N\pi P)$ » für unbedingte Versprechen den Ausdruck

(14) $\rightarrow N\pi P$.

Damit wird der an dieser Stelle erstmalig mit einem Sinn versehene Pfeil zu einem performativen Zeichen im Sinne eines «illocutionary force indicator», zu lesen als «hiermit verspreche ich...». Der Pfeil gehört damit zur selben Zeichenkategorie wie das bereits vorher von Lorenzen zur Darstellung von Imperativen benutzte Ausrufezeichen. Statt meiner Formulierung (10) ($j([N_2\pi Q]N_1\pi P)$) setzt Lorenzen die Bedingung bei bedingten Versprechen einfach vor den Ausdruck (14) und erhält

(15) $N_2\pi Q \rightarrow N_1\pi P$,

zu lesen als «hiermit verspreche ich, N_1 , P zu tun, unter der Bedingung, dass du, N_2 , Q tust». Der Schritt zur aussagenlogischen Subjunktion besteht dann nur doch darin, im Sukzeden (und im Antezeden ohnehin) nicht-handlungsbezogene Ausdrücke der Form « $x \varepsilon S$ » zuzulassen. Der Subjunktionspfeil ist also weiterhin zu lesen als «hiermit verspreche ich...».

Problematisch, nämlich damit nicht vereinbar, scheint mir nun der Vorschlag Lorenzens zur Darstellung bedingter Aufforderungen. Legt man fest, dass «!A» zu lesen ist als Aufforderung «an alle», Handlungen zu ergreifen, die einen Zustand herstellen, auf den die Beschreibung «A» zutrifft (d. h. «sich A als Zweck zu setzen»¹⁵), so soll man nach Lorenzens Vorschlag bedingte Aufforderungen, in denen «an jeden, unter der Bedingung, dass er sich in einer durch C darstellbaren Situation befindet, die Aufforderung gerichtet (wird), sich A als Zweck zu setzen»¹⁶, darstellen durch

(16) $C \rightarrow !A$.

Wenden wir hierauf aber die referierte Sinnbestimmung des Pfeils an, so drückt (16) ein bedingtes Versprechen aus, zu lesen als «hiermit verspreche ich, für «!A» einzustehen, unter der Bedingung, dass C vorliegt». Nun ist aber nicht festgelegt, was es heissen soll, für eine Aufforderung einzustehen. Am naheliegendsten wäre es noch, für «!A» eine deskriptive Lesart zu wählen, vom Typus «sich A als Zweck zu setzen ist aufgrund gewisser geltender Normen oder autorisierter Imperative geboten». Dann wäre (16) aber nicht der Ausdruck einer bedingten Aufforderung, sondern eine Behauptung über die Gebotenheit einer Handlung; eine solche Behauptung kann dann deshalb wahr sein, weil eine entsprechende bedingte Aufforderung tatsächlich und autorisiert ergangen ist. Wenn wir

so vorgehen, bliebe aber ein Problem ungelöst, das der deontischen Logik im engeren Sinne vorausgeht, die Frage nämlich, wie *präskriptiv* zu lesende hypothetische Normen zu formulieren sind, die einen Behauptungssatz wie den so interpretierten Satz (16) erst ermöglichen.¹⁷

Mir scheint also, dass das, was zur Sinnbestimmung sowohl des Pfeils als auch des Ausrufezeichens gesagt wurde, es nicht zulässt, in (16) eine angemessene logische Ausdrucksform für bedingte Aufforderungen zu sehen, sondern allenfalls eine Behauptung über das Bestehen einer Obligation. Nun kommentiert Lorenzen seinen Vorschlag aber auf eine Weise, die nahelegt, er habe mit (16) nicht eine solche Behauptung (und also kein Versprechen, für sie gegebenenfalls einzustehen) ausdrücken wollen, sondern durchaus eine Sprechhandlung, die selbst als Aufforderung gemeint ist. Es wäre dann also nicht der als Versprechenszeichen eingeführte Pfeil, sondern das Ausrufezeichen als «illocutionary force indicator» für den Gesamtsatz zu lesen. Lorenzen schreibt: «Wer einen solchen Imperativ anerkennt, verspricht damit, sich A als Zweck zu setzen, wenn C.»¹⁸ Wir können also sagen, der Imperativ (16) ($C \rightarrow !A$) ist intendiert als Ausdruck der Aufforderung zur Übernahme derjenigen Verpflichtung, die durch das Versprechen

(17) $C \rightarrow N_1 \pi A$

ausgedrückt wird. Das der Pfeil in (17) nach Lorenzen das Zeichen ist, das das Versprechen anzeigt, schiene es mir innerhalb der von ihm gewählten Darstellungsform konsequent, dieses Zeichen zum Ausdruck einer Aufforderung gar nicht zu verwenden, sondern parallel zur Schreibweise für die unbedingten Formen, nämlich zu

(18) $!N_1 \pi P$ für: «der Adressat N_1 soll P tun!» und

(19) $\rightarrow N_1 \pi P$ für: « N_1 verspricht, P zu tun»

die bedingten Formen zu schreiben als

(20) $C!N_1 \pi P$ für: «der Adressat N_1 soll, wenn C eintritt, die Handlung P tun» und

(21) $C \rightarrow N_1 \pi P$ für: « N_1 verspricht, wenn C eintritt, die Handlung P zu tun».

Damit wäre aber der Pfeil aus der Formulierung bedingter Aufforderungen herausgefallen, und wir könnten (20) interpretieren als liberalisierte Form des von Wrightschen Ausdrucks (7), der, übernimmt man Lorenzens Form der Handlungsdarstellung, erscheint als

(22) $O(N_1 \pi P/C)$.

«Liberalisiert» wäre diese Fassung bei der hier

gegebenen Interpretation insofern, als die hinter dem Obligationszeichen in (22) stehende Zeichenkombination nicht als Ausdruck einer spezialisierten Handlung gelesen wird, für die es konstitutiv ist, gleichzeitig mit C zu sein, und zu der in (22) unbedingt aufgefördert wird, sondern als der Ausdruck (22) als ganzer als *bedingte* Aufforderung gelesen wird, d. h. als eine Aufforderung, bei der die Handlung, zu der aufgefördert wird, nur dann «einklagbar» wird, wenn eine Bedingung C (gleichzeitig oder ungleichzeitig) eingetreten ist.

Wählt man dieses Vorgehen, d. h. interpretiert man die bedingte Aufforderung (16) durch ihre Zuordnung zum bedingen Versprechen (17), so empfiehlt sich, wenn man, um die oben angesprochene «Familienähnlichkeit» sichtbar zu machen, jetzt den üblichen Pfeil statt der oben benutzten eckigen Klammern oder des Bedingungszeichens verwenden will, notationstechnisch der folgende Weg: Man beginnt die Konstruktion mit unbedingten Aufforderungen « $!(N_1 \pi P)$ » und als Antwort darauf (und später selbständig verwendet) mit unbedingten Selbstverpflichtungen « $!(N_1 \pi P)$ ». Man führt dann die bedingte Aufforderung als eigenständigen Sprechakt ein, der durch Erweiterung des unbedingten Falles entsteht, und notiert dafür « $!(N_1 \pi P \xrightarrow{p} N_2 \pi Q)$ ». Der Pfeil steht hier für die sprachliche Wendung «wenn...dann», und der darüber notierte Buchstabe «p» (für «pragmatisch») erinnert an seine besondere, nicht-wahrheitsfunktionale Bedeutung. Dieser Schritt zur bedingten Aufforderung scheint mir ebenso unproblematisch, d. h. pragmatisch einlösbar wie Lorenzens Einführung des bedingten Versprechens. Schon in Wittgensteins Hausbau-Situation lässt sich vermitteln, was es heisst, zu einer Handlung aufzufordern, deren Sinn nur erreicht wird, wenn vorher eine andere Handlung ausgeführt wurde bzw. ein Ereignis eingetreten ist. Zu bedingten Aufforderungen sind, parallel zum unbedingten Fall, auch bedingte Selbstverpflichtungen («Versprechen») einzuführen, notiert als « $!(N_1 \pi P \xrightarrow{p} N_2 \pi Q)$ ». Die aussagenlogische Subjunktion lässt sich dann auf die oben beschriebene Weise einführen, als konventionelle Schreibweise für solche bedingten Selbstverpflichtungen, mit denen sich derjenige, der sie äussert, bedingt zur Wahrheit einer Behauptung «verpflichtet».

Wir hätten dann als Zeichen, die Typen von Sprechhandlungen anzeigen (als «illocutionary force indicators») das Zeichen «!» für Auffor-

derungen und das Zeichen «j» für Selbstverpflichtungen bzw. Versprechen. Davon getrennt hätten wir das dem von Wrightschen Bedingungszeichen «/» verwandte, aber hier nicht zum Zweck der Bildung eines komplexen Handlungsterms¹⁹ eingeführte Zeichen « \rightarrow » für ein «pragmatisches», und das Zeichen « \rightarrow » für das aussagenlogische, jetzt allerdings konstruktiv verstandene Wenn/dann. Bedingte Aufforderungen und bedingte Selbstverpflichtungen würden mit Hilfe des pragmatischen Wenn/dann zu formulieren sein; die Probleme, die mit der Interpretation von (16) (« $C \rightarrow !A$ ») verbunden waren, treten folglich nicht mehr auf, denn statt (16) würde man jetzt schreiben: (23) $!(C \rightarrow A)$.

Hier wird der Sprechakt der Aufforderung durch das vorangestellte Ausrufezeichen angezeigt, und es tritt bei der vorgeschlagenen Leseart für « \rightarrow » kein damit konkurrierendes Zeichen auf, das einen anderen Sprechakt anzeigt, wie der als Versprechenszeichen interpretierte Pfeil in (16). Das aussagenlogische Wenn/dann ist hier als Spezialisierung von « $(N_1 \pi P \rightarrow N_2 \pi Q)$ » eingeführt.

5.

Auf die sich ergebenden Anschlussprobleme, wie der Sinn des konstruktiv verstandenen Wenn/dann genauer, insbesondere für mehrfach verschachtelte Aussagen, festzulegen ist, und wie er sich zur materialen Implikation verhält, kann ich hier nicht mehr eingehen; sie erfordern weitläufige Erörterungen und sind im Moment auch wieder kontrovers²⁰. Die oben aufgeworfene Frage, ob sich die Wahrheitsfunktionalität auf eine andere als die zitierte Fregesche Weise auszeichnen lässt, etwa durch eine Beschränkung auf wahrheitsdefinite Aussagen, muss deshalb hier offen bleiben.

Ich wollte hier vor Augen führen, dass zum Geschäft des Logikers ausser der Behandlung der interessanten Fragen, die sich im Zusammenhang mit Kalkülen stellen, auch eine sprachphilosophische Reflexion der Art gehört, wie sie uns Wittgenstein in seinem Spätwerk vorführt. In den «Philosophischen Untersuchungen» erörterte er die Möglichkeit, eine primitive, eng in einen Handlungskontext eingebundene Sprache durch schrittweises Hinzufügen neuer Typen sprachlicher Ausdrücke sinnvoll zu erweitern. Und wenn es dort heisst «Es ist interessant, die Mannigfaltigkeit der Werkzeuge der Sprache und ihrer Verwen-

dungsweisen, die Mannigfaltigkeit der Wort- und Satzarten, mit dem zu vergleichen, was Logiker über den Bau der Sprache gesagt haben.»²¹,

so gilt dies auch für die Wann/dann-Verbindungen. Allerdings meine ich nicht, dass es, wie Wittgenstein sagt, «unzählige» Arten von Wörtern gibt; vielmehr kommt es mir darauf an, den systematischen Zusammenhang aufzuklären, der zwischen der Verwendung des Wenn/dann zum Ausdruck bedingter Obligationen, bedingter Selbstverpflichtungen und bedingter Behauptungen besteht.

Anmerkungen

- 1) Gottlob Frege, Begriffsschrift. Halle a. S. 1879, S. VII.
- 2) A. a. O., VI f.
- 3) G. Frege, Logische Untersuchungen, dritter Teil: Gedankengefüge; in: Beitr. zur Philos. des deutschen Idealismus 3, 1923–1926, S. 36–51 (hier: S. 46).
- 4) Der vollständige Titel von Freges erstem Buch lautet: «Begriffsschrift. Eine der arithmetischen nachgebildete Formelsprache des reinen Denkens.»
- 5) «Der Begriff der übersichtlichen Darstellung ist für uns von grundlegender Bedeutung. Er bezeichnet unsere Darstellungsform, die Art, wie wir die Dinge sehen.» – «Die übersichtliche Darstellung vermittelt das Verständnis, welches eben darin besteht, dass wir die Zusammenhänge sehen». Daher die Wichtigkeit des Findens und des Erfindens von *Zwischengliedern*.» L. Wittgenstein, Philosophische Untersuchungen, hsg. von G. Anscombe und R. Rhees, Oxford 1953, § 122.
- 6) «Statt etwas anzugeben, was allem, was wir Sprache nennen, gemeinsam ist, sage ich, es ist diesen Erscheinungen gar nicht Eines gemeinsam, weswegen wir für alle das gleiche Wort verwenden, – sondern sie sind miteinander in vielen verschiedenen Weisen *verwandt*. Und dieser Verwandtschaft, oder dieser Verwandtschaften wegen nennen wir sie alle «Sprachen».» A. a. O. § 65; vgl. §§ 66 ff.
- 7) G. H. von Wright, Deontic Logic, Mind 60 (1951), 1–15.
- 8) G. H. von Wright, Norm and Action. London 1963, S. 185 f.
- 9) A. N. Prior, The Paradoxes of Derived Obligation. Mind 63 (1954) 64–65; G. H. von Wright, A Note on Deontic Logic and Derived Obligation, Mind 65 (1956) 507–509.
- 10) von Wright 1963, S. 171.
- 11) A. a. O., S. 184 f.
- 12) P. Lorenzen/O. Schwemmer, Konstruktive Logik, Ethik und Wissenschaftstheorie. Mannheim 1973.
- 13) A. a. O., S. 53 f.
- 14) A. a. O., S. 89.
- 15) Ebd.
- 16) Ebd.

- 17) Üblicherweise werden in der deontischen Logik, wenn sie eng im Sinne einer formalen Sprache aufgefasst wird, nicht Aufforderungen oder präskriptiv verstandene Normen, sondern deskriptive Sätze über das Gelten solcher Normen untersucht. Diesen müssen aber präskriptive Aufforderungen oder Normformulierungen zugrundeliegen, so dass von Wright (1963, S. 134) sagen kann: «Thus, in a sense, the (basis) of Deontic Logic is a logical theory of prescriptively interpreted O- and P-expressions.» Vgl. auch ebd. S. 168 f. zum Problem bedingter Normen und ihrer präskriptiven vs. deskriptiven Lesart.
- 18) Lorenzen/Schwemmer, S. 89.
- 19) Im Unterschied zu F. Kambartel, von dem ich den Ausdruck «pragmatischer Junktor» übernehme, glaube ich nicht, man könne am Zweck der Logikbegründung von «komplexen Handlungen» sprechen. Vgl. F. Kambartel, Überlegungen zum pragmatischen und argumentativen Fundament der Logik; in: K. Lorenz (Hsg.), Konstruktionen versus Positionen. Beiträge zur Diskussion um die Konstruktive Wissenschaftstheorie, Bd. 1, 1979, S. 216–228, und kritisch dazu: H. J. Schnei-

der, Komplexität als Eigenschaft von Handlungen und sprachlichen Ausdrücken (erscheint in den Kongressakten des XII. Deutschen Kongresses für Philosophie, Innsbruck 1981).

- 20) Vgl. die Beiträge in C. F. Gethmann (Hsg.), Theorie des wissenschaftlichen Argumentierens. Frankfurt 1980, und in: derselbe (Hsg.), Logik und Pragmatik (im Druck).
- 21) Wittgenstein, Philosophische Untersuchungen, §23.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. Hans J. Schneider
Interdisziplinäres Institut
für Wissenschaftstheorie und
Wissenschaftsgeschichte
der Universität Erlangen-Nürnberg
Bismarckstrasse 12
D-8520 Erlangen