

AVRIL/APRIL 1992, EAWAG, 8600 DÜBENDORF, SCHWEIZ/ SUISSE

NATUR-/INGENIEURWISSENSCHAFTEN UND SOZIAL-/GEISTESWISSENSCHAFTEN - WIE FEUER UND WASSER?

EVA BUFF KELLER

Wie könnte die EAWAG eine Brücke zu den Sozial- und Geisteswissenschaften schlagen, ohne dass diese Disziplinen zu einem eigenen Bereich an der EAWAG werden? Um diese Frage diskutieren zu können, regte Professor Stumm an, einige grundsätzliche Überlegungen anzustellen.

Die folgenden Überlegungen verstehen sich als Beitrag dazu und möchten die bereits laufende Diskussion unter einzelnen ForscherInnen der EAWAG weiterführen. Selbstverständlich kann es sich hier nicht um eine umfassende Darstellung handeln. Ich bin mir auch bewusst, dass man sich dieser Fragestellung auf verschiedene Weise nähern kann.

Im folgenden möchte ich dieses Thema aus zwei unterschiedlichen Blickwinkeln diskutieren, die teilweise unabhängig voneinander weiter verfolgt werden können, die sich zum Teil aber auch gegenseitig befruchten und ergänzen können.

1. Welchen Nutzen, Sinn und welche Anregungen könnte der Gebrauch verschiedener Methoden, Anwendungen und Theorieansätze der Sozial- und Geisteswissenschaften (im folgenden = SW/GW) für die EAWAG als Institution und Forschungsanstalt bringen?

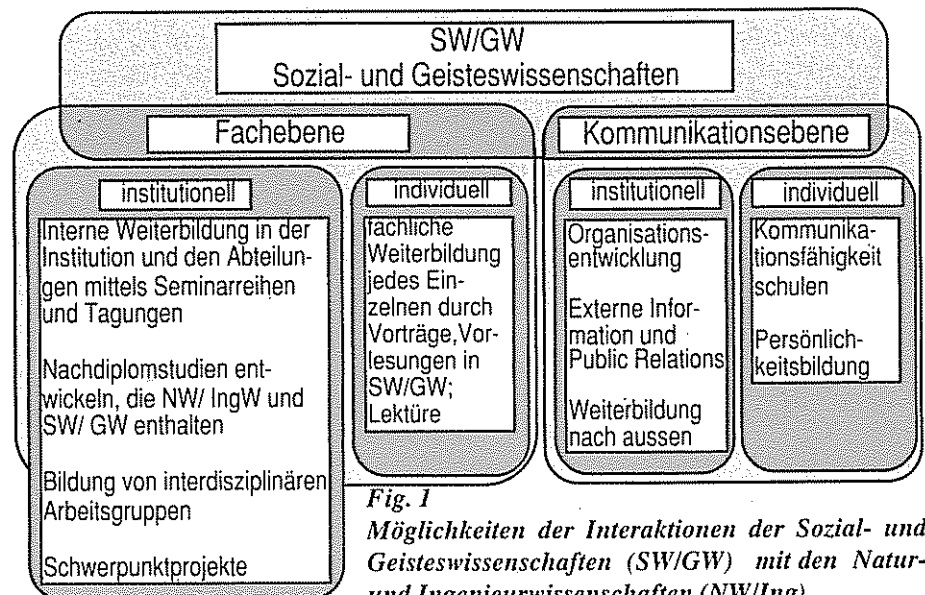


Fig. 1

Möglichkeiten der Interaktionen der Sozial- und Geisteswissenschaften (SW/GW) mit den Natur- und Ingenieurwissenschaften (NW/Ing)

2. Können oder sollten die SW/GW einen Beitrag zur Persönlichkeitsbildung und/oder fachlichen Qualifikation der WissenschaftlerInnen beitragen? Welche Fähigkeiten sind daher für NaturwissenschaftlerInnen und IngenieurInnen in der heutigen Zeit wichtig? Diese Fragestellung möchte ich 1. am Beispiel risikoreicher Technologien und 2. unter dem Aspekt der Aus- und Weiterbildung kurz erläutern.

1. DIE SOZIAL- UND GEISTESWISSENSCHAFTEN (SW/GW) ALS "DIENSTLEISTUNG"

Den Einbezug der SW/GW sehe ich auf zwei verschiedenen Ebenen (siehe Fig. 1). Auf der **Fachebene** sollen für komplexe Fragestellungen neben den naturwissenschaftlichen Aspekten auch nicht-naturwissenschaftliche Disziplinen wie Ökonomie, Soziologie, Psychologie, Erwachsenenbildung, Jurisprudenz etc. beigezogen werden. Auf der fachlichen Ebene ist interdisziplinäre Zusammenarbeit daher unerlässlich. Fragen zur interdisziplinären Zusammenarbeit und zur Interdisziplinarität bei Lehr- und Lernprozessen sind gerade im Zusammenhang mit ökologischen Problemen zur Zeit hochaktuell, und verschiedene ForscherInnen setzen sich mit dieser Frage auseinander.

SCIENCES NATURELLES ET GÉNIE CIVIL VERSUS SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES: VRAIMENT AUX ANTIPODES?

EVA BUFF KELLER

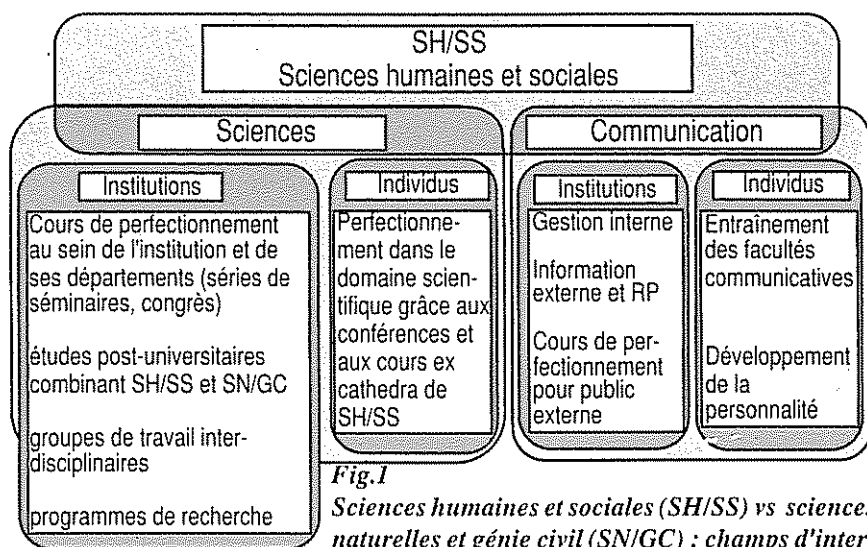


Fig.1

Sciences humaines et sociales (SH/SS) vs sciences naturelles et génie civil (SN/GC) : champs d'interaction potentiels.

Comment l'EAWAG pourrait-elle établir une tête de pont du côté des sciences humaines et sociales sans que ces disciplines constituent un domaine en soi au sein de cet institut? A l'instigation du professeur Stumm, une réflexion de fond a été engagée pour permettre le débat.

C'est dans ce contexte que s'inscrivent les considérations suivantes; de plus, elles ont pour but de faire progresser la discussion entre les spécialistes concernés de l'EAWAG. Bien sûr, il ne peut s'agir ici d'une présentation exhaustive, et je suis également consciente du fait que le problème est envisageable de plusieurs façons.

Mon exposé présentera le sujet sous deux angles différents; susceptibles d'être en partie traités indépendamment l'un de l'autre, ces deux points de vue peuvent aussi s'enrichir et se compléter mutuellement.

1. Dans quelle mesure les méthodes, applications et principes théoriques des sciences humaines et sociales (ci-après: SH/SS) sont-elles utiles, significatives et motivantes pour l'EAWAG, à la fois institution et centre de recherche?
2. Les SH/SS peuvent-elles, ou devraient-elles contribuer au développement de la personnalité de tout scientifique, voire même figurer parmi ses qualifications? De quelles compétences les spécialistes en sciences naturelles et en génie civil (ci-après: SN/GC) doivent-ils faire preuve

aujourd'hui? Je répondrai à ces questions d'une part en prenant l'exemple des technologies à haut risque et, d'autre part, en considérant le problème du point de vue de la formation professionnelle et du perfectionnement.

I. LES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES (SH/SS): DES PRESTATIONS DE SERVICE

L'intégration des SH/SS s'effectue à deux niveaux différents (fig. 1). Au niveau scientifique, les problèmes complexes doivent être envisagés du point de vue des sciences naturelles, soit, mais aussi d'autres disciplines telles qu'économie, sociologie, psychologie, perfectionnement, jurisprudence, etc. En effet, la collaboration interdisciplinaire est de mise à ce niveau-là. Précisément dans le domaine de l'écologie, les questions concernant l'interdisciplinarité dans les processus d'enseignement et de formation sont d'une actualité brûlante. Voilà pourquoi divers spécialistes s'en préoccupent aujourd'hui.

Le problème de l'interdisciplinarité entendu dans ce sens débouche sur une seconde problématique importante, celle de la communication. Grâce à leurs méthodes particulièrement appropriées, les sciences sociales permettent à chacun d'apprendre à communiquer et d'exercer entre autres ses compétences rhétoriques et argumentatives, didacti-

ques et informatives. Dans la problématique "sciences et technique / société / environnement", aussi bien communication que transmission et représentation de tout objet de recherche revêtent une importance toujours plus grande. L'intégration des apports concrets que livrent les SH/SS ainsi que l'amélioration de la communication peuvent intervenir à la fois sur le plan individuel et au niveau institutionnel (à l'EAWAG par exemple).

1.1 Formation pour adultes, didactique, communication et journalisme: que peut en tirer l'EAWAG?

1.1.1 Cours de perfectionnement (= CP)

a) CP internes

En règle générale, les CP internes sont organisés par les collaboratrices et collaborateurs eux-mêmes, et se déroulent à l'extérieur de l'EAWAG. Le plus souvent, il s'agit de cours ayant trait aux domaines spécialisés des participants.

De plus en plus, il faudrait fréquenter ou organiser de manière interne des cours dans des domaines tels que techniques de présentation (entraînement oral, utilisation des supports de présentation), pratique de la discussion, conduite du débat, faculté de conciliation, développement de la personnalité, etc.; il en va de même pour les cours de familiarisation avec les médias. Tous ces cours internes offrent plusieurs avantages: premièrement, ils permettent d'améliorer la collaboration et l'ambiance au sein de l'institution; deuxièmement, les spécialistes sont en mesure de mieux "vendre" leurs résultats; troisièmement, il s'agit d'une des conditions préalables pour que ces spécialistes puissent eux-mêmes offrir des CP à un public externe ciblé.

Aujourd'hui, tout le monde reconnaît que les CP, menés d'après les principes régissant la formation pour adultes, améliorent les compétences des participants dans le domaine non seulement scientifique, mais aussi social, ce qui se répercute positivement sur leurs rapports de travail aussi bien à l'intérieur

Die Frage der Interdisziplinarität bei Lehr- und Lernprozessen im Zusammenhang mit ökologischen Problemen leitet zur zweiten wichtigen Ebene über, derjenigen der **Kommunikation**. Die Methoden der Sozialwissenschaften sind besonders geeignet, um Kommunikationsfähigkeit, die v.a. Diskurs-, Argumentations- und Vermittlungsfähigkeit sowie didaktische Kompetenz u.a. beinhaltet, zu erlernen und zu üben. Kommunikation, Vermittlung und Darstellung des Untersuchungsgegenstandes werden im Problemfeld "Wissenschaft-Technik / Gesellschaft (Mensch) / Umwelt" immer wichtiger. Sowohl der Einbezug materieller Beiträge aus SW/GW als auch das Verbessern der Kommunikationsfähigkeit kann einerseits auf der individuellen Ebene und andererseits auf der institutionellen Ebene (z. B. an der EAWAG) erfolgen.

1.1 Mögliche Anwendungsfelder aus den Disziplinen Erwachsenenbildung, Didaktik, Kommunikation, Publizistik für die EAWAG

1.1.1 Weiterbildung (=WB)

a) Interne Weiterbildung

Diese wird in der Regel von den MitarbeiterInnen selbst organisiert und ausserhalb der EAWAG wahrgenommen. Meistens handelt es sich um Weiterbildungskurse auf dem Fachgebiet der einzelnen MitarbeiterInnen.

Vermehrt sollten auch Kurse besucht oder intern angeboten werden, die Präsentationstechniken (ReferentInnenschulung, Hilfsmittelgebrauch), Diskusstaining, Gesprächsführung, Konfliktlösungskompetenz, Persönlichkeitsbildung usw. umfassen sowie Kurse, die auf den Umgang mit den Medien vorbereiten. Solche intern durchgeführten Weiterbildungskurse aus dem Bereich Kommunikation haben erstens positive Auswirkungen auf die Zusammenarbeit und auf das Klima im Hause, zweitens

"... dass nach den Prinzipien der Erwachsenenbildung durchgeführte Weiterbildung nicht nur die fachliche, sondern die ebenso wichtige soziale Kompetenz der TeilnehmerInnen fördert."

ermöglichen sie es den ForscherInnen, ihre Resultate besser "verkaufen" zu können, und drittens sind sie eine der Voraussetzungen, damit die Fachleute selber Weiterbildungskurse für externe Zielgruppen anbieten können.

Es ist heute bekannt, dass nach den Prinzipien der Erwachsenenbildung durchgeführte Weiterbildung nicht nur die fachliche, sondern die ebenso wichtige soziale Kompetenz der TeilnehmerInnen fördert. Diese ist einmal für das Arbeitsklima einer Institution wichtig, aber auch für die Arbeit der ForscherInnen ausserhalb ihrer Institution.

b) Weiterbildungsangebote nach aussen

In der Regel werden externe Weiterbildungskurse von einzelnen Abteilungen der EAWAG oder in Zusammenarbeit mit anderen Institutionen angeboten. Aufgrund der grossen Bedeutung der WB für die Zukunft wird ein Weiterbildungskonzept entwickelt. Dabei geht es um eine professionelle Planung, Durchführung und Evaluation von Weiterbildungsveranstaltungen unter Einbezug der bisherigen WB-Veranstaltungen der einzelnen Abteilungen sowie neu zu schaffenden WB-Veranstaltungen innerhalb eines Gesamtkonzeptes gemäss der Weiterbildungsbotschaft¹.

Der Auf- und Ausbau der universitären Weiterbildung ist laut Schweizerischer Hochschulkonferenz die wichtigste neue Aufgabe der Hochschulen in den Neunzigerjahren. Für die EAWAG als Forschungsanstalt, die sehr stark in der Ausbildung und Forschung engagiert ist, eröffnet sich hier auch ein wichtiges Tätigkeitsfeld und eine interessante Herausforderung für die nahe Zukunft. Bei neu zu planenden WB-Veranstaltungen sollte für das Konzept und den methodisch/didaktischen Aufbau je nach Bedarf auch eine externe, in Erwachsenenbildung und Didaktik ausgebildete Person beigezogen werden. Warum? Bisherige Erfahrungen in der Weiterbildung zeigen, dass die didaktische

Qualität einer Aussage um so wichtiger ist, je fundierter der Inhalt dieser Aussage ist. Zudem fehlt vielen fachlich hochqualifizierten ReferentInnen das didaktische "Know how". Dieses kann z. B. via Coaching oder durch didaktische Beratung/Begleitung vermittelt oder via Referenten- und Didaktikkurse erlernt werden. Coaching/didaktische Begleitung beinhaltet z.B. eine Vorbesprechung über die WB-Veranstaltung des Kursleiters mit einer didaktischen Fachperson, deren Anwesenheit am 1. Kurs und eine Nachbesprechung im Sinne einer ausführlichen Evaluation mit Feedback. Je nach Thema und ReferentInnen-Team kann die Begleitung bezüglich Intensität und Form variiert werden. Die Erfahrungen zeigen ([1], Impulsprogramme), dass die Effektivität der Veranstaltung für TeilnehmerInnen und ReferentInnen stark gesteigert werden kann.

"...dass die didaktische Qualität einer Aussage um so wichtiger ist, je fundierter der Inhalt dieser Aussage ist."

1.1.2 Information

a) Externe Information:

Publizistik, Kommunikationswissenschaften und PR liefern Methoden und Erkenntnisse für die Gebiete der Informationsvermittlung und der Kommunikation. Wissenschaftliche Erkenntnisse können mit der Wahl der geeigneten Zielpublika und der Wahl der richtigen Methoden und Strategien wirksamer nach aussen vermittelt werden. Die Auswahl der Zielgruppen und Methoden wiederum hängt von den Hauptzielen einer Institution im Bereich des externen Informationswesens ab. Für die EAWAG werden folgende Hauptziele diskutiert:

1. Beitrag zur Bewusstseinsbildung im Bereich Umweltschutz
2. Direkter Beitrag zum Umweltschutz
3. Imagepflege der EAWAG nach aussen

Viele Institutionen beschäftigen für diese Aufgaben Personen mit entsprechender Ausbildung oder Zusatzausbildung.

b) Interne Information/Kommunikation:

Wichtig im Zusammenhang mit der

¹ Weiterbildungsbotschaft des Bundes: "Botschaft über Sondermassnahmen zugunsten der beruflichen und universitären Weiterbildung". Zwischen 1990 und 1997 stellt der Bund für die ETHZ und die EPFL 45 Mio. Sfr. für die Weiterbildung zur Verfügung. Auch die EAWAG kann sich über das Zentrum für Weiterbildung der ETHZ mit eigenen Weiterbildungsveranstaltungen beteiligen.

"Aujourd'hui, tout le monde reconnaît que les CP, menés d'après les principes régissant la formation pour adultes, améliorent les compétences des participants dans le domaine non seulement scientifique, mais aussi social, ce qui se répercute positivement sur leurs rapports de travail aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'institution."

qu'à l'extérieur de l'institution.

b) CP externes

De manière générale, les CP externes sont organisés soit par les diverses départements de l'EAWAG, soit en collaboration avec d'autres institutions. Vu l'importance des CP pour l'avenir, il faut établir un concept global à la faveur duquel les CP sont préparés, menés et évalués par des professionnels tenant compte à la fois des CP déjà organisés par les départements et des cours prévus dans ce cadre global, comme le recommande le message fédéral pour le perfectionnement¹.

Selon la Conférence universitaire suisse, le développement des CP au niveau supérieur sera la nouvelle tâche la plus importante des hautes écoles pour les années nonante. Centre de recherche avant tout, l'EAWAG est très engagée dans la formation et la recherche, et le large champ d'activité qui s'ouvre maintenant à elle constitue un défi à relever dans un proche avenir. Pour les nouveaux CP, aussi bien le programme que la méthode didactique devraient être soumis à l'avis d'une personne, au besoin externe, qualifiée dans le domaine de la didactique et de l'enseignement pour adultes. Pourquoi? Parce que les expériences faites jusqu'ici montrent que, plus la pertinence d'une explication

1 "Message concernant les mesures spéciales en faveur de la formation continue au niveau professionnel et universitaire ainsi que de la promotion des nouvelles techniques de fabrication intégrée par ordinateur (CIM)".

Entre 1990 et 1997, la Confédération met 45 millions de Frs à la disposition de l'EPFZ et de l'EPFL pour la formation continue. L'EAWAG peut également participer à cet effort en organisant des CP dans le cadre du centre de perfectionnement de l'ETHZ.

est grande, plus la qualité didactique de cette explication devient capitale. Et, de plus, beaucoup de spécialistes hautement qualifiés ne disposent pas du savoir-faire didactique requis. Coaching, accompagnement par un conseiller didactique, cours didactiques et rhétoriques, etc., permettront d'y remédier. Le premier cas suppose par exemple une entrevue entre le conférencier et son conseiller didactique avant le cours, la présence du conseiller à la première leçon et une évaluation donnant lieu à un feedback. La forme et l'intensité du soutien didactique variera selon le sujet et l'équipe de conférenciers. L'expérience a d'ores et déjà montré ([1] programmes d'impulsions) que l'efficacité des cours peut être largement renforcée.

"...plus la pertinence d'une explication est grande, plus la qualité didactique de cette explication devient capitale"

1.1.2 Information

a) Information externe:

Les méthodes et les principes d'information sont donnés par le journalisme, les sciences de la communication et le domaine RP. Les découvertes scientifiques ont un impact bien meilleur si le public d'une part, les méthodes et stratégies d'autre part, sont sélectionnés de manière adéquate. Quant au choix des destinataires et des méthodes, il dépend des buts principaux que se donne une institution en matière d'information externe. Dans le cas de l'EAWAG, le débat roule sur les buts principaux suivants:

1. renforcer la prise de conscience en matière de protection de l'environnement
2. contribuer directement à la protection de l'environnement
3. soigner l'image de marque de l'EAWAG.

Nombreuses sont les institutions qui occupent à cet effet des personnes disposant d'une formation sur mesure ou d'une formation complémentaire.

b) Information interne:

Dans l'information et la communication à usage interne prévalent à la fois transparence, philosophie de l'organisme en question, ambiance de travail, etc. A ce niveau, les connaissances théoriques et les méthodes pratiques applicables relèvent de la psychologie et de la

gestion. Que ce soit dans les milieux économiques, administratifs, scolaires ou autres, nombreuses sont les institutions à tirer avantage de ces disciplines; elles confieront le domaine de l'information interne par exemple à un conseiller en gestion ou à toute autre personne disposant d'une formation équivalente; ces spécialistes s'occuperont de ce qui concerne analyses, séances à huis clos, réorientation ou gestion globale. Une gestion ou une politique d'information menées par des professionnels présentent un atout majeur pour toute institution, car cela lui permet d'éviter les pertes dues aux frictions et d'utiliser de manière optimale les ressources disponibles.

Le recours aux spécialistes des disciplines susmentionnées est une option que chaque institution prend en fonction de sa taille, de ses valeurs, de ses convictions et de sa volonté d'optimiser à la fois climat de travail, structure de conduite et qualité des prestations. A l'EAWAG, les CP et l'information aussi bien interne qu'externe sont en cours d'élaboration au niveau conceptuel, et devraient bientôt entrer dans la pratique. L'intégration des autres possibilités d'application, auxquelles il a déjà été fait allusion, dépend avant tout des responsables et, enfin, de la motivation des collaboratrices et des collaborateurs.

1.2 Interdisciplinarité dans la recherche

Au niveau purement scientifique, les SH/SS me paraissent d'un accès facile, et elles ont déjà été intégrées à maintes occasions. Par exemple, les conférenciers représentant des branches telles que sciences sociales, économie, etc., sont invités en nombre croissant à participer à des séminaires. Les échanges de vues réciproques et le fait d'élever la discussion au-dessus des disciplines revêtent une importance capitale; il s'agit de renforcer l'interdisciplinarité dont la nécessité n'est plus à démontrer en matière de problèmes écologiques; d'ailleurs, l'avenir la rendra toujours plus impérative. La collaboration de groupes de travail venus de disciplines différentes est à la fois but et condition à toute participation, par exemple au projet clé "environnement".

Pourquoi est-il souvent bénéfique de former des groupes interdisciplinaires?
- Quand il s'agit de prendre des mesures pratiques pour protéger l'environ-

"Oftmals werden die NW und die SW/GW gegeneinander ausgespielt. In Zukunft müsste es mehr darum gehen, die verschiedenen Vorgehensweisen kennenzulernen, um im Sinne einer gegenseitigen Ergänzung abzuschätzen, wo die eine und wo die andere Vorgehensweise am Platz ist und wo eben beide zum Zuge kommen sollten."

internen Information/Kommunikation einer Institution ist nicht nur die Transparenz, sondern auch die Kultur einer Organisation, die corporate identity, das Klima unter den MitarbeiterInnen usw. In diesem Bereich kommen theoretische Erkenntnisse sowie praxisorientierte Methoden aus der Psychologie und der Organisationsentwicklung zur Anwendung. Viele Organisationen der Wirtschaft, aber auch Verwaltungen, Schulen u.a. machen sich diese Disziplinen zunutze, indem sie z.B. Organisationsberater oder entsprechend ausgebildete Personen mit diesem Aufgabenbereich betrauen, sei es für Retraits, Analysen, eine Neuorientierung oder für eine umfassende Organisationsentwicklung. Ein wichtiger Nutzen einer Organisationsberatung oder einer professionell durchgeführten internen Informationspolitik liegt darin, dass Reibungsverluste in der Institution abgebaut werden und die vorhandenen Ressourcen optimaler eingesetzt werden können.

Ob sich eine Institution für den Einbezug von Fachleuten aus diesen Disziplinen entscheidet, hängt ab von der Grösse einer Institution, ihren Werten und ihren Ueberzeugungen sowie ihrem Wunsch, diese Bereiche im Hinblick auf ein optimales Arbeitsklima, eine gute Führungsstruktur und qualitativ hochstehende Leistungen abzudecken. An der EAWAG werden konzeptionelle Arbeiten in den Bereichen externe/interne Information sowie für den Bereich Weiterbildung geleistet, die mit der Zeit auch umgesetzt werden sollen. Wieweit auch andere hier angetönte Anwendungsfelder integriert werden sollen, hängt in erster Linie von den Entscheidungsträgern ab und in zweiter Linie von den Angestellten, wieweit sie sich dafür einsetzen.

1.2 Interdisziplinarität in der Forschung

Auf der rein fachlichen Ebene scheint mir ein Zugang zu den SW/GW einfacher zu sein und auch vielerorts schon stattzufinden: Beispielsweise werden in Seminarreihen vermehrt auch ReferentInnen, die sozialwissenschaftliche, ökonomische und andere Disziplinen vertreten, eingeladen. Die Möglichkeit, einander zuzuhören und der Versuch, sich im Gespräch über die Disziplinen hinweg verstehen zu wollen, sind sehr wertvoll und eine grosse Hilfe für die Interdisziplinarität bei ökologischen Problemen, deren Notwendigkeit schon heute anerkannt ist, und die in Zukunft sicher noch vermehrt gefordert wird. Beispielsweise im Schwerpunktprojekt-Umwelt ist ein Ziel und eine Bedingung für eine mögliche Beteiligung die Zusammenarbeit von Arbeitsgruppen verschiedener Disziplinen.

Weshalb ist es oft sinnvoll, Forscherringengruppen interdisziplinär zusammenzusetzen?

- Projekte, die Umsetzungsfragen im Umweltschutz behandeln oder eine Verhaltensänderung von Individuen oder gesellschaftlichen Gruppen zum Ziel haben, können diese Ziele mit Hilfe von Oekonomen, Soziologen, Psychologen u.U. besser erreichen. Diese Art von Zusammenarbeit wird bereits von einzelnen Abteilungen an der EAWAG gepflegt.
- Bei grösseren Projekten, die nicht reine naturwissenschaftliche Grundlagenforschung beinhalten, wäre es bereits in der Anfangsphase, wenn die Fragestellungen formuliert werden, wichtig und interessant, die SW/GW beizuziehen. In dieser Phase soll ja entschieden werden, welche Zielgruppen für die Untersuchung der Problemstellung ausgewählt werden sollen und mit welchen Methoden die Fragestellung untersucht werden soll. Für die SW sind u.U. andere Fragen, Methoden und Untersuchungsgegenstände wichtig, um ein Problem zu verstehen und zu lösen, als für die NW. Als Beispiele seien hier etwa Projekte der Risikoforschung genannt, die unter anderem nur schon wegen der Akzeptanzproblematik nicht mehr ohne die Sozialwissenschaften werden auskommen können.

1.3 Wie kann eine Verständigung unter den Bedingungen von Ungewissheit möglich werden?

Bei all den angeführten Umsetzungsaspekten sehe ich die Frage: Wie kann eine Akzeptanz für diese Disziplinen erreicht werden?

Wie gross ist

- a) die Offenheit, sich auf das Feld der Sozial- und Geisteswissenschaften einzulassen,
- b) der Mut, eine gewisse Unsicherheit, die z.B. mit den in den SW/GW oftmals angewandten qualitativen Methoden einhergeht, ertragen zu können?

In diesem Zusammenhang wäre es sinnvoll, sich die Hauptunterschiede zwischen naturwissenschaftlichen und sozialwissenschaftlichen Forschungsmethoden zu vergegenwärtigen. Dieses Thema allein könnte Gegenstand eines eigenen Artikels sein. Ich möchte nur einige Gedanken dazu anfügen. Während die NW mehr quantitative Methoden anwenden, kommen in den SW/GW mehr qualitative Methoden zum Zuge. Zu den Hauptkriterien der NW gehören die Falsifizierbarkeit und die Reproduzierbarkeit, während Inhalte der SW/GW nicht immer empirisch oder experimentell angreifbar sind und einen weiten Interpretationsspielraum beinhalten. Gerade wenn der Mensch mit seinem Verhalten und Handeln selber Teil des Untersuchungsgegenstandes wird, sind oft je nach Gesichtspunkt ganz verschiedene Schlussfolgerungen möglich. Oftmals werden die NW und die SW/GW gegeneinander ausgespielt. In Zukunft müsste es mehr darum gehen, die verschiedenen Vorgehensweisen kennenzulernen, um im Sinne einer gegenseitigen Ergänzung abzuschätzen, wo die eine und wo die andere Vorgehensweise am Platz ist und wo eben beide zum Zuge kommen sollten.

Eine andere Frage lautet: Wie weit ertrage ich es zuzulassen, dass es viele Bereiche gibt, in denen wir noch nicht genug wissen? Was ist machbar unter den gegebenen Rahmenbedingungen einer Institution, wieweit lassen sie Änderungen zu? Wieweit wollen ihre Entscheidungsträger Änderungen in Bereichen zulassen, die auch für sie selber neu sind, die anderes Wissen als das der NW/IngW-Fachleute verlangen?

Es bleibt die Frage: Genügt es, zu den

"Les critères principaux des SN sont vérifiabilité et expérimentabilité, alors que les SH/SS traitent souvent de sujets pour lesquels empirisme et laboratoires ne servent à rien, et pour lesquels il faut disposer d'une plus grande marge d'interprétation"

nement ou de modifier le comportement de certains individus ou de certains groupes sociaux, on atteindra mieux ses buts avec l'aide de spécialistes tels qu'économistes, sociologues, psychologues, etc.. Ce genre de pratique est déjà courant dans certains départements de l'EAWAG.

Quand il s'agit d'effectuer une recherche de fond dépassant le cadre des sciences naturelles, on aura avantage à intégrer les SH/SS dès la phase initiale du projet, c'est-à-dire au moment de la formulation du problème. Au cours de cette phase sont définis les méthodes d'observation et les groupes auxquels elles s'appliquent. Il se peut en effet que les SN et les SS proposent des questions, des méthodes et des objets de recherche différents pour résoudre les mêmes problèmes. Je citerai à titre d'exemple la recherche sur les risques: dans ce domaine, les projets ne peuvent d'ores et déjà plus se passer des SS, ne serait-ce qu'à cause des problèmes d'acceptance.

1.3 Comment peut-on se comprendre dans un climat d'incertitude?

Dès qu'il s'agit de mettre en pratique les réflexions exposées ci-dessus, surgit la question de savoir comment ménager un accueil favorable à ces disciplines.

- a) A quel point est-on prêt à s'ouvrir au domaine des SH/SS?
- b) A quel point avons-nous le courage d'admettre une certaine incertitude, qu'impliquent par exemple les méthodes qualitatives couramment utilisées par les SH/SS?

A ce propos, il serait utile de se représenter les principales différences entre les méthodes de recherches qu'utilisent les SN et les SS. Ce sujet pourrait à lui seul faire l'objet d'un article, de sorte que je m'en tiendrai ici à l'essentiel.

Alors que les SN recourent avant tout à des méthodes de type quantitatif, les SH/SS préfèrent les méthodes qualitatives. Les critères principaux des SN sont vérifiabilité et expérimentabilité, alors que les SH/SS traitent souvent de sujets pour lesquels empirisme et laboratoires servent pas toujours à grande-chose, et pour lesquels il faut disposer d'une plus grande marge d'interprétation. Surtout quand le comportement humain fait partie de l'objet de recherche, la variété des points de vue peut conduire à des conclusions tout à fait différentes. Entre les SN et les SH/SS règne souvent un climat de confrontation sans merci. A l'avenir, il faudra davantage apprendre à connaître les méthodes respectives: pour chaque problème, on fera ainsi la part des méthodes adéquates et, cas échéant, complémentaires.

"... pour chaque problème, on fera ainsi la part des méthodes adéquates et, cas échéant, complémentaires."

Par ailleurs, il faut se demander à quel point on est prêt à tolérer les nombreux domaines encore peu explorés. Quelle est la marge de manoeuvre, étant donné les conditions de nature institutionnelle? Dans quelle mesure peut-on introduire des modifications? Dans quelle mesure les responsables voudront-ils admettre des innovations ayant trait à des sciences qu'ils ne connaissent pas eux-mêmes, et qui requièrent d'autres connaissances que les SN/GC?

Et enfin, suffit-il d'établir une tête de pont du côté des SH/SS, ou bien faut-il s'ouvrir encore plus? Groupes de travail communs, partage réciproque des méthodes de travail, recherche conjuguée des solutions? Une telle évolution pourrait mettre en péril l'image que d'aucuns se font du monde, avec toutes les conséquences que cela comporte. Peut-être que les SN/GC verront leurs problèmes de manière fondamentalement différente dès le moment où seront pris en compte les "aspects sociaux" déterminants pour la concrétisation des projets au niveau politique, comme c'est le cas par exemple pour la recherche sur les risques, l'expérimentation animale, etc.. Qui dit péril, dit chance aussi, voire même nécessité de mieux saisir les problèmes socio-environnementaux dans toute leur complexité. Seule cette prise

de conscience conduira à des solutions praticables, c'est-à-dire compatibles à la fois avec la société, l'environnement et l'économie.

Soulignons ici que l'inverse est également vrai: les spécialistes en économie, en droit et en sciences sociales, doivent acquérir des connaissances de base en écologie, afin de pouvoir mieux comprendre leurs interlocuteurs. Ils doivent donc se familiariser avec la langue et la manière de réfléchir des environnementalistes. Les CP externes deviennent ainsi utiles à tous, parce que conçus pour tous.

2. IMPORTANCE DES SH/SS POUR LA FORMATION ET LA PROFESSION DES SPÉCIALISTES EN SN/GC

Développement de la personnalité ou qualification?

2.1 Développement de la personnalité

Nous avons tous notre idée quant au concept de développement de la personnalité, un aspect négligé dans le cadre des formations scientifiques. Et si le scientifique veut se développer, il doit le faire en autodidacte. Or aujourd'hui, l'écologie ou plus particulièrement les domaines tels que recherche sur les risques, énergie atomique, biotechnologie, production d'électricité (construction d'hydrocentrales), mobilité (trafic), expérimentation animale ou tout autre sujet posant des problèmes d'acceptance, exigent du chercheur qu'il soit toujours plus capable de communiquer. La question de l'acceptance se pose d'ailleurs à double titre: au niveau de la société et de l'opinion publique d'une part, et au ni-

"Peut-être que les SN/GC verront leurs problèmes de manière fondamentalement différente dès le moment où seront pris en compte les "aspects sociaux" déterminants pour la concrétisation des projets au niveau politique..."

"Qui dit péril, dit chance aussi, voire même nécessité de mieux saisir les problèmes socio-environnementaux dans toute leur complexité."

SW/GW nur eine Informations-Brücke zu schlagen, oder braucht es nicht eine grössere Oeffnung, indem man gemeinsame Arbeitsgruppen bildet, gegenseitig die Arbeitsweisen kennenlernt und gemeinsam nach neuen Lösungsansätzen sucht? Dies beinhaltet dann allerdings die Gefahr, dass das eigene Weltbild ins Wanken geraten kann und dass Konsequenzen daraus folgen werden. Es kann sein, dass sich die Problemsicht des NW/Ing. einschneidend ändert, wenn die "gesellschaftlichen Aspekte" des Problems einbezogen werden, die für die politische Realisierung von Vorhaben entscheidend sind, z.B. bei der Risikoforschung, bei Tierversuchen etc. Diese Gefahr kann jedoch auch als Chance, ja vielleicht Notwendigkeit gesehen werden im Prozess, die komplexen Probleme in Umwelt und Gesellschaft besser zu verstehen und zu realisierbaren Lösungsvorschlägen zu gelangen, die sozial-, umwelt- und wirtschaftsverträglich sind.

An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, dass es für die Problemlösung ökologischer Probleme umgekehrt ebenso wichtig ist, dass OekonomInnen, JuristInnen und SozialwissenschaftlerInnen sich ein ökologisches Grundwissen- und verständnis aneignen und auch lernen, sich mit den NW/Ing zu verständigen. Dies beinhaltet, dass sie deren Sprache und Denkweise kennenlernen. In diesem Sinne könnten externe Weiterbildungsangebote gegenseitig genutzt und teilweise füreinander konzipiert werden.

2. DIE BEDEUTUNG DER SW/ GW FÜR DIE AUSBILDUNG UND DIE BERUFSPRAXIS DER NATURWISSENSCHAFTLERIN NEN UND INGENIEURINNEN

Persönlichkeitsbildung und/oder Qualifikation?

2.1 Zur Bedeutung der Persönlichkeitsbildung für ForscherInnen

Wir alle haben unsere Vorstellungen darüber, was unter Persönlichkeitsbildung zu verstehen ist. In unserer Ausbildung sind wir diesbezüglich kaum gefördert worden. Allenfalls treibt der einzelne individuell seine Persönlichkeitsbildung voran. Eine immer wichtigere Fähigkeit eines Forschers, der heute in

der Umwelt- oder Risikoforschung tätig ist, ist seine Kommunikationsfähigkeit. Dies insbesondere bei Fragen der Risikoforschung, Atomenergie, Biotechnologie, Energienutzung (z.B. Wasserkraftwerkbau), Mobilität (Verkehr), Tierversuche und anderen, die besonders mit der Akzeptanz konfrontiert sind. Die Frage der Akzeptanz stellt sich in doppelter Hinsicht: innerhalb der Gesellschaft und Oeffentlichkeit ganz allgemein und bei der Verteilung von Forschungsgeldern.

Als Beispiele für den ersten Bereich können etwa das Biotechnologiezentrum in Basel, die Diskussionen um die Atomenergie in den letzten 15 Jahren, die Diskussionen um die NEAT und den Schwerverkehr genannt werden. Für ForscherInnen in Bereichen, die Widerstand hervorrufen, stellen sich zwei Probleme:

1. Sie müssen u.U. für eine Sache argumentieren, die sehr umstritten ist: Wieweit gelingt es ihnen, für diese adäquat zu argumentieren, den Widerstand gegen ihre Argumente aber nicht persönlich zu nehmen (und dann inadäquat zu reagieren!)? Umgekehrt kann es auch sein, dass sie inadäquat reagieren, wenn sie feststellen, dass klare Argumente von der Gegenseite nicht verstanden oder nicht wahrgenommen werden wollen.
2. Auf einer anderen Ebene stellt sich die Frage, ob sie willens und fähig sind, sich in die Äengste und die Unsicherheiten der Oeffentlichkeit hineinzudenken, hineinzufühlen und dann adäquat zu informieren, zu argumentieren und zu diskutieren. Als Beispiel für Forschungsergebnisse aus diesem Bereich seien die Untersuchungen über die Akzeptanz der Kernforschung am Beispiel von Jülich oder die Untersuchungen über die Psychologie des Risikobewusstseins genannt [2]. Legewie untersuchte am Beispiel von Tschernobyl die psychische Verarbeitung und den Umgang mit Umweltkrisen und zeigte auf, dass eine solche psychologische Analyse grosse Bedeutung für die Wahrnehmung von psychischen und sozialen Risiken der Technik und für den Umgang damit hat und somit Chancen eines grundlegenden Wandels im Umgang der Menschen mit Technik, Natur und sich selbst hervorbringt.

Auf einer dritten Ebene stellt sich die

Frage, inwieweit ForscherInnen solcher Gebiete bei sich selber Angst zulassen können. Wer Angst bei sich selbst stark verdrängt, ist in der Regel auch von anderen Gefühlen abgeschnitten und läuft Gefahr, z.B. der Illusion anheimzufallen, dass alles machbar ist, oder aber passiv zu werden. Beides kann gefährlich werden. Es ist daher wichtig, ein gesundes Mass an Angst zulassen zu können [3].

Diese Fähigkeiten können ForscherInnen mittels psychologischer, persönlichkeitsbildender Methoden, Techniken und Uebungen in Kommunikation lernen und trainieren.

2.2 Qualifikation

Es darf jedoch nicht ausser acht gelassen werden, dass in einer hochdifferenzierten Gesellschaft eine Verständigung über die effektiven und potentiellen lokalen und globalen Gefahren für die Umwelt, genannt Risikopotentiale, sehr schwierig ist. Wie kann etwa Verständigung unter den Bedingungen von Ungewissheit und der Unmöglichkeit restloser Sicherheit möglich werden?

In den Fragen der Oekologie und angesichts der Umweltkrise mit ihren zum Teil globalen Folgen sowie im Bereich der Risikoforschung müssen ForscherInnen zunehmend Risiken einschätzen, diese bewerten und deren Ursachen ermitteln. Dabei sollen die Folgen von Risiken nicht nur hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit geprüft, sondern auch bezüglich ihrer Sozial- und Humanverträglichkeit untersucht werden. Letztlich müssen Risiken von der Gesellschaft akzeptiert werden, damit sie mitge- und ertragen werden können.

Von philosophischer Seite wird daher eine Ethik der Folgenbewertung gefordert. Diese enthält [4] zwei Grundsätze: 1. praktische Vernünftigkeit und 2. muss die Menschen- und Personenwürde als Voraussetzung der Freiheit respektiert werden. Bei Folgenbewertungen von sogenannten Risiken sind drei Arten von Entscheidungen zu unterscheiden:

1. Entscheidung unter Sicherheit (→ Optimierung der Handlungsfolgen)
2. Entscheidung unter Risiko (→ wahrscheinlich optimale Variante wählen)
3. Entscheidung unter Unsicherheit (→ potentielles Schadenausmass möglichst gering halten).

Nach Irrgang [4] müssen für eine Ethik der Folgenbewertung in der Gen-

"En effet, quiconque refoule ses craintes, ignore en général toute manifestation émotionnelle et risque de perdre le sens commun; soit il croira que tout est possible, soit il restera absolument passif."

veau de la répartition des fonds pour la recherche d'autre part.

Dans le premier cas, on citera par exemple le centre biotechnologique bâlois, la discussion sur l'énergie atomique des quinze dernières années, le débat concernant la NLFA et le trafic des poids lourds. Les spécialistes qui travaillent dans ces domaines litigieux se trouvent confrontés à deux problèmes:

1. Ils doivent défendre une cause très contestée: dans quelle mesure arrivent-ils à présenter les arguments adéquats sans se sentir personnellement atteints par les critiques, et surtout sans réagir de manière déplacée? L'inverse est vrai aussi: ils peuvent mal réagir quand ils constatent que l'autre partie ne comprend pas, ou ne veut pas comprendre une argumentation claire.
2. Ils doivent se préparer à vouloir prendre conscience des craintes et des incertitudes de l'opinion publique, afin de mieux pouvoir informer, argumenter et discuter. Comme exemple, on citera les recherches sur l'acceptance de la recherche nucléaire à Jülich (Allemagne), ou bien les recherches sur la psychologie de la conscience des risques [2]. Legewie a examiné l'assimilation psychique de l'accident de Tschernobyl ainsi que l'attitude face aux catastrophes écologiques; il a démontré qu'une analyse de ce type revêt une importance capitale: en effet, elle permet de prendre conscience des risques psychiques et sociaux que comporte la technique, et d'y faire face, ce qui multiplie les chances de voir un changement fondamental dans l'attitude des êtres humains à l'égard de la technique, de la nature et de la société.

A cela s'ajoute une troisième inconnue: dans quelle mesure les spécialistes concernés peuvent-ils conceptualiser leurs craintes? En effet, quiconque refoule ses craintes, ignore en général toute manifestation émotionnelle et risque

de perdre le sens commun; soit il croira que tout est possible, soit il restera absolument passif. Ces deux attitudes peuvent être dangereuses. Voilà pourquoi il est important d'admettre le doute à dose raisonnable [3].

En apprenant et en appliquant les méthodes de la psychologie, du développement de la personnalité et des techniques de communication, les chercheurs augmenteront leurs capacités.

2.2 Qualification

Il ne faut toutefois pas oublier que, dans une société hautement différenciée, il est difficile de s'entendre sur les dangers effectifs et possibles, locaux et globaux, couramment appelés risques potentiels. Mais comment s'entendre quand toute certitude absolue est exclue d'avance?

Ecologie, crise environnementale, conséquences globales, recherche sur les risques: voilà de quoi obliger les spécialistes à conceptualiser les risques et à en déterminer les causes. Ils devront tenir compte de leur compatibilité à la fois avec l'environnement et avec la société et les individus. Car en dernier ressort, la société doit elle-même accepter les risques pour que ceux-ci soient bien qu'au niveau de la responsabilité commune.

Les scientifiques doivent donc se munir d'un appareil philosophique pour pouvoir estimer tout impact. Deux principes fondamentaux les guideront [4]: 1° le bon sens pratique et 2° le respect de la dignité humaine et individuelle, condition préalable à toute liberté. Quand il s'agit d'estimer les risques d'impact, 3 types de philosophies décisionnelles s'affrontent:

1. soit on croit être en sécurité (→choix des risques moindres)
2. soit on considère les risques (→choix de la variante apparemment optimale)
3. soit on thématise l'incertitude (→l'ampleur de l'impact est limitée au maximum)

Dans le domaine des manipulations génétiques par exemple, Irrgang [4] a montré à ce propos la nécessité d'affiner les méthodes pour mesurer l'impact sur l'environnement ainsi que les niveaux de toxicité et de pathogénèse: en effet, toute estimation globale doit tenir compte des synergies.

Un autre aspect éthique important ré-

"Car en dernier ressort, la société doit elle-même accepter les risques pour que ceux-ci soient assumés - au niveau psychique aussi bien qu'au niveau de la responsabilité commune."

side, comme l'écrit Primas [5, p.12], dans le fait que l'analyse scientifique d'un problème n'est pas tout: il faut y ajouter l'autocritique des méthodes et des points de vue adoptés; "Das Ethos einer zukünftigen Naturwissenschaft verlangt, dass nicht nur Unehrlichkeit, sondern auch Einäugigkeit als unmoralisch zu gelten hat." Comme démonstration, Primas reprend l'exemple du riz indica qui sert à combattre la faim et dont les gènes ont été manipulés pour l'immuniser contre un virus.

Au niveau de la qualification et du perfectionnement des scientifiques, l'intégration des aspects philosophiques et éthiques entraînerait de profonds changements.

2.3 Collaboration interdisciplinaire

L'estimation d'impact ne peut plus être uniquement l'affaire des SN/GC. Sociologie, philosophie, perfectionnement et psychologie ont maintenant leur mot à dire. Par exemple, la psychologie des risques permet de déterminer la réaction des individus face aux risques et aux dangers effectifs, et de prévoir un comportement compatible avec l'environnement. Lors de l'établissement de projets de recherche, le travail interdisciplinaire devient de plus en plus indispensable; le Fonds national suisse encourage d'ailleurs le mouvement. De la sorte, les SH/SS sont traitées sur pied d'égalité (cf. chap. 1.2).

De plus, admettre qu'il faille collaborer et coordonner les points de vue revient à s'interroger sur les principes de la formation et du perfectionnement des scientifiques. Ceux-ci devraient en effet apprendre à mieux connaître l'esprit des SH/SS afin de faire fructifier les échanges. Ce processus est également vrai en sens inverse pour les SH/SS (cf. chap. 1.3)

2.4 Conséquences pour l'enseignement

Dans les cadres des diplômes en sciences environnementales, les programmes

technik beispielsweise die Methoden der Umweltverträglichkeits-, Toxizitäts- und Pathogenitätsprüfung unter Einbezug von Synergismen verfeinert werden, damit eine umfassende Folgenabschätzung möglich ist.

Einen weiteren wichtigen ethischen Aspekt der Naturwissenschaften greift Primas [5: S.12] auf, wenn er darauf hinweist, dass ein Problem nicht nur fachwissenschaftlich analysiert werden darf, sondern dass auch gesagt werden muss, in welcher Hinsicht eine bestimmte Methodik oder Sichtweise verfehlt ist. Er sagt: "Das Ethos einer zukünftigen Naturwissenschaft verlangt, dass nicht nur Unehrllichkeit, sondern auch Einäugigkeit als unmoralisch zu gelten hat." Diese Problematik zeigt er am Beispiel der genmanipulierten, virusresistenten Reissorte Indica und deren Einsatz im Kampf gegen den Hunger auf.

Für die Qualifikation von zukünftigen ForscherInnen und deren Aus- und Weiterbildung hätte der Einbezug von philosophischen und ethischen Ueberlegungen grosse Konsequenzen.

2.3 Interdisziplinäre Zusammenarbeit

Solche Fragen der Folgenbewertung können nicht mehr allein vom natur- oder ingenieurwissenschaftlichen Standpunkt aus beantwortet werden, dazu braucht es den Einbezug der Sozial- und Geisteswissenschaften, wie der Soziologie, der Psychologie (z.B. Psychologie des Risikobewusstseins, d.h., wie Menschen auf Risiken und effektive Gefahren reagieren; psychologische Konzepte, die umweltgerechtes Verhalten voraussagen können usw.), der Philosophie (Ethik) und der Erwachsenenbildung. Bei der Formulierung der Forschungsfragen wären daher (wie vom Nationalfonds bereits vermehrt gefordert) interdisziplinär zusammengesetzte Forscher-Teams zu bilden, die gemeinsam das Projekt durchführen und die geistes-/sozialwissenschaftlichen Belange gleichwertig einbeziehen (vgl. Kap. 1.2).

Zusätzlich hat das Erkennen dieser notwendigen Vernetzungen und die Unerlässlichkeit der Zusammenarbeit auch zur Folge, dass grundsätzliche Ueberlegungen zur Aus- und Weiterbildung von NaturwissenschaftlerInnen angestellt werden müssen. Die NW und Ing. sollten auch in die Lage versetzt werden, die Denkweise der SW/GW zu

kennen und zu verstehen und somit auch besser kooperieren zu können. Dieser Prozess gilt, wie in Kapitel 1.3 beschrieben, auch in umgekehrter Richtung für die SW/GW.

2.4 Folgen für die Ausbildung

Im Rahmen der Diplomausbildung Umweltnaturwissenschaften wird dieser Problematik erstmals Rechnung getragen, indem neben einer naturwissenschaftlichen Grundausbildung im Fachstudium zusätzlich zu den naturwissenschaftlichen und umwelttechnischen Disziplinen auch eine Teilausbildung in Umweltsozialwissenschaften stattfindet. Diese beinhaltet wichtige Disziplinen, welche für Lösungen und Entscheidungshilfen in den Bereichen der Umwelt- und Risikoproblematik von Bedeutung sind. Dazu gehören Vorlesungen und Kolloquia zu Philosophie und Ethik der Mensch-Umwelt-Beziehung, Psychologie und Soziologie der Mensch-Umwelt-Beziehung, Recht, Politik und Oekonomie für Umweltnaturwissenschaften.

In diesem Studiengang sind Studierende der Naturwissenschaften erstmals damit konfrontiert, sich in das Denken, Verstehen und Handeln in den Sozial- und Geisteswissenschaften einzuarbeiten. Es gilt, diese Chance wahrzunehmen und aus ihr zu lernen. Von grosser Bedeutung ist dabei, dass die Kooperation zwischen NW und SW/GW gefördert und damit eine Lösung der im Umweltbereich anstehenden Probleme möglich wird. Dabei sollte man sich bewusst sein, dass eine so verstandene Ausbildung in Umweltnaturwissenschaften nicht alle Fragen beantworten und schon gar nicht alle Probleme lösen kann. Dennoch trägt sie dazu bei, die künftigen WissenschaftlerInnen vermehrt daraufhin zu sensibilisieren, Fragen zu stellen, Prozesse der Ursachenzuschreibung aufzudecken und die mit diesen Zuschreibungen verbundenen Interessen und Weltansichten bewusst zu machen [6, S.108].

Es ist die Aufgabe der Didaktik und insbesondere der Umweltpädagogik, optimale Lernangebote und Konzepte zu entwickeln, die eine interdisziplinäre Integration von NW/Ing.W/SW/GW beinhalten.

Analoge Gedanken können zur Weiterbildung geäussert werden. Ständen bis anhin fachliche Weiterbildungsanstaltungen im Vordergrund, wird es in

Zukunft zudem auch immer mehr Weiterbildung zur Aneignung von Schlüsselqualifikationen, wie Sozialkompetenz, Kommunikationsfähigkeit, Dialogfähigkeit, Konfliktlösungskompetenz u.a.m. brauchen. Ideal wären Weiterbildungskurse, die, ausgehend von den Erkenntnissen der Erwachsenenbildung, mit geeigneten Unterrichtsformen und -methoden gleichzeitig fachliche und soziale Kompetenz vermitteln. Dies würde jedoch bedeuten, dass die Weiterbildung auch von didaktisch ausgebildeten Personen begleitet werden müsste (vgl. Kap. 1.1.1). Allgemein kann gesagt werden, dass die Bedeutung der Weiterbildung mit der immer stärker abnehmenden Halbwertszeit von Wissen wächst.

Kommen wir zum Schluss auf die ursprüngliche Frage zurück: **Wie kann eine Brücke zu den SW/GW geschlagen werden?**

Einen solchen Brückenschlag versucht z.B. der Studiengang UNW, an dem auch verschiedene MitarbeiterInnen der EAWAG als DozentInnen tätig sind. Wieweit eine solche Brücke auch an der EAWAG selber für Dienstleistungsbelange, wie Weiterbildung, externe/interne Information etc. funktionieren kann, hängt von den Entscheiden ab, wieweit dazu speziell geschulte Personen beigezogen werden und welche Möglichkeiten diese Personen erhalten, um innerhalb der EAWAG wirken zu können. Je grösser die Anzahl dieser Personen ist und je mehr Handlungsmöglichkeiten und finanzielle Mittel sie erhalten, um so aussichtsreicher wird das Unternehmen sein. Dabei muss man sich bewusst sein, dass sich oft verschiedene Denkweisen, Randbedingungen und unterschiedliche Interessen gegenüberstehen werden.

Wird es uns gelingen, dass wir uns von den SW/GW auf eine produktive Art hinterfragen lassen, um dann gemeinsam nach neuen Lösungen zu suchen? Oder genügt allen ihr Alltagsverständnis von Psychologie, Soziologie, Pädagogik und Politik? Ich hoffe auf die Bereitschaft von uns WissenschaftlerInnen, dass wir den Mut haben, nach neuen Wegen zu suchen und sie auch zu beschreiten.

Literatur und Dank: siehe Seite 10.

d'études tiennent compte pour la première fois de cette problématique: on ne suit plus seulement les cours fondamentaux en sciences naturelles et environnementales, mais aussi des cours traitant des SS appliquées à l'environnement. Cette formation complémentaire donne accès à des disciplines importantes pour toute activité décisionnelle en matière d'environnement et d'étude sur les risques. On fréquentera donc des cours ex cathedra et des colloques traitant des rapports entre individus et environnement dans des domaines tels que philosophie, éthique, psychologie, sociologie, droit, politique et économie.

Pour la première fois depuis la particularisation des sciences au cours du 19^{ème} siècle, les étudiantes et étudiants en sciences naturelles sont ainsi confrontés à l'esprit et au caractère des SH/SS. A la fois chance et enrichissement à ne pas manquer, cette occasion déterminante permet en effet de favoriser la collaboration entre SN et SH/SS, et de parvenir à des solutions pour les problèmes encore non résolus. Bien sûr, il ne faut pas perdre de vue qu'un tel enseignement ne résout pas toutes les questions, et encore moins tous les problèmes. Il contribue toutefois à sensibiliser les scientifiques; en s'interrogeant, ceux-ci deviendront conscients à la fois des processus, des intérêts et des conceptions qui sous-tendent la détermination des causes [6, p. 108].

A la didactique et à la pédagogie environnementale revient la tâche d'établir des programmes efficaces, présentant en substance l'intégration interdisciplinaire des SN/SH/SS/GC.

Il en va de même pour les CP. Ils ne seront plus axés uniquement sur l'enseignement scientifique, comme c'était le cas jusqu'à présent; en effet, ils comprendront dans une proportion toujours plus importante l'enseignement de capacités déterminantes telles que compé-

tences sociale, communicative, conciliatrice, etc. Les CP idéaux seraient ceux qui allient les compétences scientifiques et sociales aux formes et aux méthodes d'enseignement propres à la formation pour adultes. En clair, cela signifie que les CP devraient être surveillés par des personnes disposant d'un savoir didactique (cf. chap. 1.1.1). De manière générale, la signification des CP croît en raison inverse de la demi-vie des notions scientifiques.

En conclusion, reprenons la question initiale: comment établir une tête de pont du côté des SH/SS?

Le programme d'études en sciences naturelles et environnementales, auquel participent divers scientifiques de l'EAWAG en qualité d'enseignants, représente une tentative dans ce sens. Au sein de l'EAWAG, le perfectionnement, l'information interne et externe, etc, s'y prêtent également, avec toutefois des réserves au niveau décisionnel: il s'agit notamment de savoir dans quelle mesure des personnes spécialement formées seront mises à contribution et quelles seront leur marge de manoeuvre au sein de l'EAWAG. Plus leur nombre, leur autonomie et l'envergure des moyens financiers disponibles seront conséquents, plus l'entreprise sera riche en perspectives. Mais il ne faut pas oublier que les esprits, les conditions et les intérêts divergent souvent.

Réussirons-nous à nous laisser critiquer de manière productive par les SH/SS, pour ensuite chercher ensemble des solutions? Ou bien les notions quotidiennes de psychologie, de sociologie, de pédagogie et de politique suffisent-elles entièrement aux responsables? Je souhaite que les scientifiques, les collaborateurs et collaboratrices soient prêts à chercher de nouvelles voies et à les suivre.

Je remercie mes collègues Gertrude Hirsch, Markus Neuenschwander et Regula Niederer pour leurs remarques et leurs suggestions quant au fond et à la forme de mon exposé.

Meinen KollegInnen Dr. Gertrude Hirsch, Markus Neuenschwander und Regula Niederer danke ich für inhaltliche und redaktionelle Diskussionen und Anregungen.

- [1] Reischmann J., 1991: "Das bisschen Pädagogik kommt dann von selbst". Optimierte betriebliche Weiterbildung durch Coaching. In: Grundlagen der Weiterbildung, 2.Jg., Heft 1.S. 11-17.
- [2] Legewie H., 1990: Zwischen Resignation und Engagement. Zur Psychologie des Risikobewusstseins nach Tschernobyl. In: psychosozial, 13.Jg. Heft 1, S. 59-68.
- [3] Kast V., 1991: Angst als Ursache von Widerständen gegenüber umweltgerechtem Handeln. Vortrag, gehalten an der Universität Zürich, 6.12.1991, öffentliche Ringveranstaltung "Umweltgerechtes Handeln."
- [4] Irrgang B., 1990: Leitlinien einer Ethik der Gentechnik. In: Naturwissenschaften, Heft 77. S. 569-577. Springer Verlag.
- [5] Primas H., 1992: Umdenken in der Naturwissenschaft. In: Gaia, Heft 1. S. 5-15. Verlag Spektrum.
- [6] Kahlert J., 1991: Die missverstandene Krise. Theoriedefizite in der umweltpädagogischen Kommunikation. In: Zeitschrift für Pädagogik, 37.Jg., Heft 1. S.97-122.

Dr. Eva Buff Keller, Geographin im Hauptfach, Nebenfächer Soziologie und Pädagogik.

Langjährige Lehrtätigkeit an der ETHZ und an der Mittelschule. Beraterin für Aus- und Weiterbildung. Bis Ende März 1992 an der EAWAG.



Eva Buff Keller, Dr. sc. nat. EPFZ, branche principale: géographie, branches secondaires: sociologie, formation complémentaire en pédagogie. Longue expérience en qualité de chargée de cours à l'EPFZ et au Gymnase. Conseillère en enseignement et en perfectionnement. Collaboratrice de l'EAWAG jusqu'à fin mars 1992.

ÜBER DAS ÜBERLEBEN UND DIE ERHALTUNG DER AKTIVITÄT VON BAKTERIEN IM RAHMEN VON REINIGUNGSPROGRAMMEN FÜR DIE UMWELT

C. ANTHONY MASON, PATRICK STICHER UND GEÖFFREY HAMER

1. EINLEITUNG

Es ist bekannt, dass seit langem Missbrauch und mangelhafte Entsorgung von chemischen Stoffen die Umwelt stark belasten. Diese Fehler werden heute mit reduziertem Zugang zu den natürlichen Ressourcen, deren verringerte Qualität sowie mit enormen technischen und finanziellen Anstrengungen bezahlt. Zur Beseitigung dieser Umweltverschmutzungen ist es möglich, die mannigfaltigen Abbaufähigkeiten der mikrobiellen Welt zu nutzen. Die Hoffnung der Zukunft liegt bei den allgegenwärtigen Bakterien. Die Notwendigkeit für eine wirkungsvolle und nachhaltige Reinigung von chemisch verseuchter Umgebung, vor allem von Gewässern (Oberflächen- und Grundwasser), Böden und Sedimenten ist erkannt worden und bedingt eine konzentrierte multidisziplinäre Anstrengung. Dazu stehen den Umweltfachleuten eine Reihe von physikalischen, chemischen und mikrobiologischen Methoden zur Verfügung. Die Vorgehensauswahl muss von einem detaillierten Verständnis der abiotischen und biotischen Vorgänge im verschmutzten System abhängen und von einer fundierten Kenntnis der Wirkungsweise von Prozessen, die im speziellen Fall aktiviert werden können.

Dieser Aufsatz beschäftigt sich mit dem Einsatz von Mikroorganismen bei einer biologischen Reinigung von chemisch verschmutzter Umgebung und beschreibt das Konzept der Forschungsarbeiten der Abteilung Techn. Biologie an der EAWAG. Die Anwendung biologischer Mittel hat gegenüber Methoden wie Verbrennung, Extraktion, etc. Vorteile: sie sind oft billiger und die Möglichkeit, dass toxische Komponenten oder Derivate produziert werden ist erheblich geringer. Trotz mehr als hundert Jahren intensiver mikrobiologischer Forschungsgeschichte ist unser Verständnis über die Diversität, Biochemie, Genetik und Oekologie von Mikroorganismen noch relativ limitiert und beschränkt sich vornehmlich auf Versuche unter Laborbedingungen. Ein erfolgreicher Einsatz von Mikroorganismen bedingt fundierte Kenntnisse über

die Interaktionen zwischen Mikroorganismen, sowie den Einfluss von Umweltfaktoren auf das Überleben.

Es sei auch darauf hingewiesen, dass bei Verallgemeinerungen im Hinblick auf das Potential von Mikroorganismen zur Lösung offener Probleme Vorsicht geboten ist. Obwohl Mikroorganismen eine unbestritten wichtige Rolle im Nährstoff- und Elementzyklus der Biosphäre spielen, können sie nicht alle Erwartungen erfüllen. In der Abwassertechnik wird ihr Abbaupotential bereits zu einem bestimmten Grad zusammengefasst und optimiert, doch selbst hier gibt es viele offene Fragen über die Arbeitsweise der involvierten Prozesskulturen.

2. BIOLOGISCHE UMWELTSANIERUNG

Hier ist der Abbau von verschmutzten Komponenten das Resultat der Aktivität von Mikro- und Makroorganismen. Zwei prinzipiell verschiedene Methoden der Nutzung des biologischen Abbaupotentials stehen heute zur Verfügung (Fig. 1).

2.1. Biologischer Abbau *in situ* (In situ-Abbau):

Hier geht es darum, gezielt die Aktivität der vorgefundenen Mikroorganismen zu steigern um vermehrten Schadstoffabbau zu erreichen. Dabei muss entweder durch geeignete Umweltbedingungen eine Optimierung der Aktivität der Organismen vor Ort garantiert, oder durch Zugabe geeigneter Nährstoffe eine Vermehrung der schadstoffabbauenden Bakterien erreicht werden. Nach dem Unfall des Tankers Exxon Valdez vor der Küste Alaskas wurde u.a. auch mit dieser Technik experimentiert. 150 Kilometer der mit Erdöl verschmutzten Küste wurden mit verschiedenen Stickstoff- und Phosphordüngern behandelt, wodurch die Abbauleistungen der vorhandenen Mikroorganismen bis um das Zehnfache erhöht werden konnten [1].

2.2. Zufügen von Laborkulturen (Bioaugmentation):

Bestimmte Mikroorganismen, die bekannte, spezifische Abbaufähigkeiten

besitzen, werden in die verschmutzte Umgebung eingeführt. Der Schadstoff wird mit einem Mikroorganismus der diese spezielle Komponente abbauen kann, bekämpft. Diese Methode, fremde Mikroorganismen in eine Umgebung einzuführen, in der sie normalerweise selten oder gar nicht leben, wird in der Umweltbiologie erstaunlich oft angewendet und Parallelen finden sich beispielsweise in der biologischen Krankheitsbekämpfung, beim Kompostieren und in biologischen Düngern. Die Technik, Rhizobien in Böden zu geben um in Symbiose mit den Pflanzenwurzeln Stickstoffassimilation zu erreichen, ist seit 1890 ein durchaus übliches Vorgehen [2].

3. GENMANIPULIERTE MIKROORGANISMEN FÜR DEN BIOLOGISCHEN ABBAU?

Die Möglichkeiten, genmanipulierte Mikroorganismen in der Umwelt einzusetzen werden auch in Politik und Wissenschaft z.T. emotional diskutiert und in diesem Zusammenhang scheinen einige Anmerkungen wichtig:

Es ist sehr schwierig, einen einzelnen Mikroorganismus zu finden, der imstande ist einen speziellen Schadstoff vollständig zu CO_2 und H_2O zu abzubauen. Viel häufiger findet man, dass die notwendigen Enzyme, die den vollständigen Abbau einer Komponente hervorrufen können, auf verschiedenartige Mikroorganismen verteilt vorkommen. Es bestand deshalb die Absicht, alle relevanten Enzyme in einer einzigen "Superbakterie" zu kombinieren. Auf diese Weise wäre ein einzelner Organismus für die gesamte Mineralisierung befähigt [3].

Viele der Gene, die die notwendigen Enzyme für den biologischen Abbau von persistenten Schadstoffen kodieren, befinden sich nicht im Hauptchromosom der in Frage stehenden Bakterie sondern auf separaten "Minichromosomen" (Plasmide) [4]. Diese Plasmide können auch in der Umwelt leichter zwischen den einzelnen Organismen ausgetauscht werden. Es existieren auch verschiedene natürliche Mechanismen durch welche Gene auf dem Chromo-

SURVIE DES BACTÉRIES ET MAINTIEN DE LEUR ACTIVITÉ DANS LES PROGRAMMES D'ASSAINISSEMENT ENVIRONNEMENTAUX

C. ANTHONY MASON, PATRICK STICHER ET GEOFFREY HAMER

1. INTRODUCTION

Fait bien connu, l'abus et l'élimination imparfaite des substances chimiques nuisent considérablement à l'environnement. Aujourd'hui, ces fautes se payent: les ressources naturelles sont d'accès limité et de qualité médiocre, tandis que les efforts techniques et financiers ont pris une ampleur énorme. Dans la lutte contre la pollution chimique, il est possible de profiter du monde microbien et de ses multiples aptitudes de décomposition. Pour l'avenir, les espoirs portent sur les bactéries omniprésentes. On ne conteste plus la nécessité d'éliminer à fond et de manière durable les pollutions chimiques, en particulier celles des eaux de surface et des eaux souterraines, des sols et des sédiments. Mais cet objectif requiert un effort interdisciplinaire concerté. A cet effet, les environnementalistes disposent de toute une panoplie de méthodes physiques, chimiques et microbiologiques. Le choix d'un procédé suppose une compréhension allant jusque dans le détail des processus biotiques et abiotiques présents dans le système pollué. Il suppose en outre une connaissance profonde de l'impact des processus d'assainissement envisageables dans chaque cas.

Le présent exposé traite de l'utilisation de micro-organismes pour le nettoyage biologique de milieux chimiquement pollués. Il rend compte également du concept selon lequel la section "biologie technique" de l'EAWAG mène ses recherches. Par rapport aux méthodes telles que combustion, extraction, etc., les moyens biologiques ont des avantages multiples: meilleur marché, ils n'engendrent que très rarement des composés ou des dérivés toxiques. Malgré plus d'un siècle de recherche intensive en microbiologie, notre savoir concernant la diversité, la biochimie, la génétique et l'écologie des micro-organismes demeure relativement restreint et se limite avant tout aux expériences de laboratoire. Pour utiliser efficacement les micro-organismes, il faut connaître à fond les interactions entre ces micro-organismes ainsi que les effets des facteurs environnementaux sur leur survie.

Soulignons ici que, si les micro-organismes

représentent une solution potentielle aux problèmes actuels, il faut être prudent avant de généraliser. Bien qu'ils jouent incontestablement un rôle capital dans le cycle alimentaire et élémentaire de la biosphère, ils ne peuvent répondre à tout ce qu'on attend d'eux. Même dans le traitement des eaux usées, leur pouvoir désintégrant a d'ores et déjà été décrit et optimisé, mais beaucoup de questions subsistent quant au fonctionnement des agents impliqués.

2. ASSAINISSEMENT BIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

Il s'agit de la désintégration des substances nocives grâce à l'activité de micro-organismes et de macro-organismes. Actuellement, on dispose de deux méthodes fondamentalement différentes dans l'utilisation du potentiel de biodécomposition (fig. 1, voir page 11).

2.1 la biodécomposition *in situ* (bio-amélioration; en anglais: *in situ bioremediation*):

Cette méthode consiste à favoriser l'activité de micro-organismes déjà présents afin de renforcer la décomposition des polluants. Il y a deux solutions: soit l'activité des organismes est optimisée sur place grâce à des conditions environnantes adéquates, soit le nombre de bactéries décomposantes est augmenté grâce à l'apport de substances nutritives appropriées. Après l'accident du pétrolier Exxon Valdez au large de l'Alaska par exemple, on a expérimenté ce procédé. 150 kilomètres de côtes polluées ont été traitées avec des engrais azotés et phosphorés; de la sorte, on est arrivé jusqu'à décupler le pouvoir décomposant des micro-organismes disponibles [1].

2.2 Importation de cultures de laboratoire (bio-augmentation; en anglais: *bio-augmentation*):

Certains micro-organismes, disposant de propriétés décomposantes connues et spécifiques, sont introduits dans l'environnement concerné. La substance nocive est donc combattue avec un micro-organisme à action spécifique. L'introduction

de micro-organismes dans un environnement auquel ils sont étrangers, n'y vivant pas ou que rarement, est une méthode extrêmement courante en biologie environnementale, appliquée de manière analogue dans des domaines tels que insecticides biologiques, compostage et engrais biologiques. A titre d'exemple, on pratique, depuis 1890 déjà, l'adjonction de rhizobia dans le sol pour favoriser la fixation de l'azote en symbiose avec les racines végétales [2].

3. MICRO-ORGANISMES GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉS POUR LA DÉCOMPOSITION BIOLOGIQUE?

Une telle éventualité donne lieu à des discussions pas toujours objectives au niveau aussi bien politique que scientifique. Quelques remarques s'imposent à ce propos.

Il est très difficile de trouver un seul micro-organisme susceptible de réduire complètement une substance nocive donnée en CO₂ et H₂O. Le plus souvent, les enzymes requis pour la décomposition totale d'une molécule se trouvent répartis sur plusieurs micro-organismes différents. C'est la raison pour laquelle on a eu l'idée de combiner tous les enzymes nécessaires dans une seule "superbactérie". De cette manière, un seul organisme serait capable d'assumer le processus entier de la minéralisation [3].

De nombreux gènes recelant l'information pour les enzymes nécessaires à la décomposition biologique de substances persistantes ne se situent pas sur le chromosome principal de la bactérie en question, mais sur des "minichromosomes" séparés, appelés plasmides [4]. Ceux-ci peuvent être assez facilement échangés entre organismes, même en milieu naturel. Il existe également divers mécanismes naturels provoquant de tels transferts génétiques [5]. A l'heure actuelle, les techniques de travail au niveau moléculaire permettent de réaliser un transfert ponctuel de gènes définis sur un organisme porteur. De cette manière, on peut élaborer une "superbactérie" présentant des propriétés bien définies. En résumé, il existe en principe deux possibilités d'obtenir des bactéries

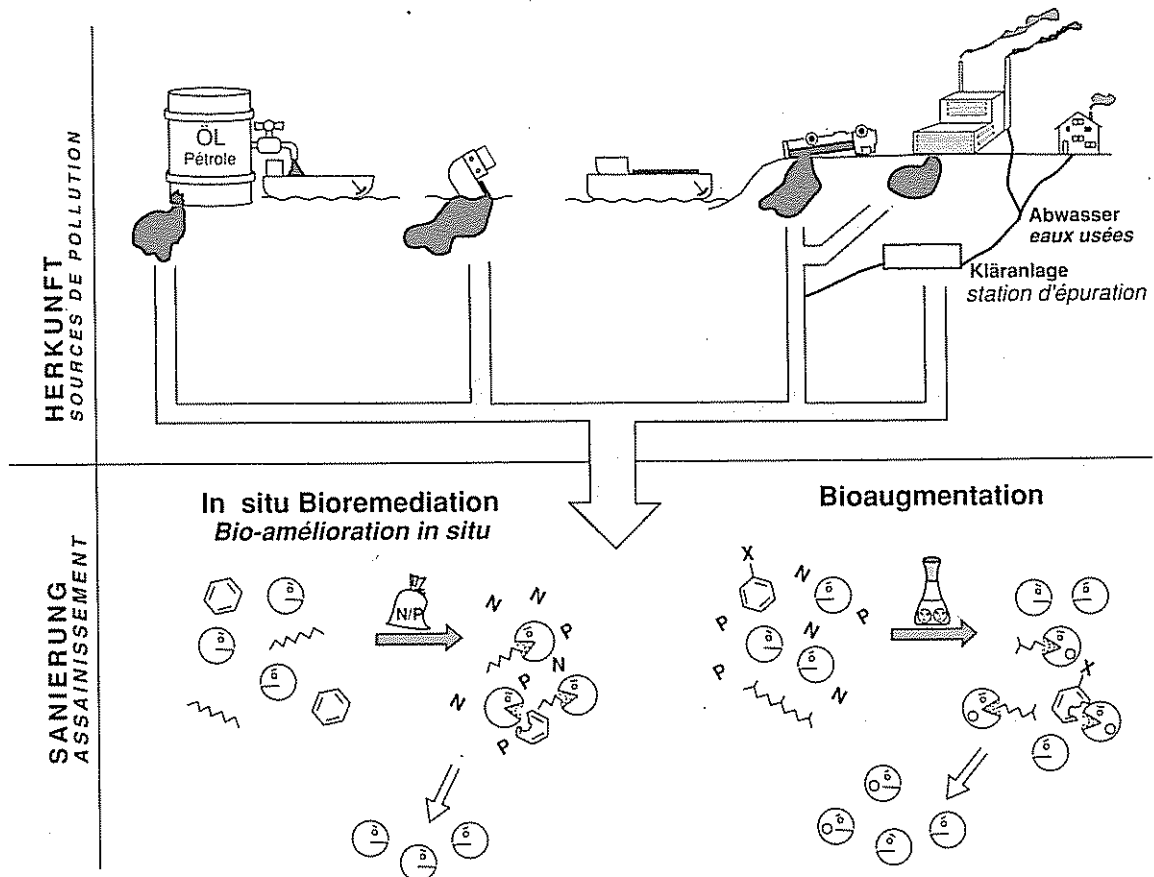


Fig. 1

L'assainissement biologique de l'environnement et ses alternatives

- a) La bio-amélioration (décomposition in situ ; en anglais: in situ bioremediation) s'obtient grâce à l'activité des microorganismes présents. Il peut souvent s'avérer nécessaire d'optimiser ce processus en fournissant les substances nutritives adéquates.
- b) Bio-augmentation (Adjonction de cultures de laboratoire ; en anglais : bioaugmentation). Ce procédé est indiqué quand la population présente n'arrive pas à décomposer par elle-même le polluant, ie. les composés chimiques.

Alternative Konzepten der biologischen Umweltsanierung (Bioremediation)

- a) Im in situ-Abbau wird die Aktivität der vorhandenen Mikroorganismen genutzt. Oft kann es erforderlich sein, die Abbau von Schadstoffen durch Beigabe von geeigneten Nährstoffen zu optimieren.
- b) Zufügen von Laborkulturen (Bioaugmentation). Dieses Vorgehen findet Anwendung, wenn die vorhandene Population den Verschmutzer (z.B. chemische Komponenten) nicht abzubauen vermag.

som selbst in die natürliche Umgebung eingebracht werden können [5]. Die heute vorhandenen molekularen Arbeitstechniken erlauben nun einen gezielten Transfer von bestimmten Genen in einen Trägerorganismus. Auf diese Weise kann eine "Superbakterie" konstruiert werden, die ganz bestimmte Abbaueigenschaften in sich vereinigt. Es gibt im Prinzip also zwei Möglichkeiten, Bakterien mit bestimmten Abbaueigenschaften zu erhalten, Selektion von natürlich sich bildenden Mutanten oder molekularbiologische Manipulation des Genmaterials. Dies heisst aber auch, dass man bei dem Einsatz gentechnologischer Methoden besonders vorsichtig sein soll. Im Ausland werden genetisch manipulierte Mikroorganismen (GEMS) bereits auf ihre Einsetzbarkeit hin getestet.

4. MIKROORGANISMEN, KONSORTIEN UND GEMEINSCHAFTEN

Reinkulturen von Mikroorganismen sind in der Natur selten, wenn sie überhaupt vorkommen. Mikrobielle Gemeinschaftsstrukturen in natürlicher Umwelt sind komplex und leider noch wenig bekannt (Fig. 2). Ihre Reaktionsweise ist jedoch seit einigen Jahren Ziel mikrobiologischer Forschung. Normalerweise werden die Abbaureaktionen durch Interaktion in biologischen Abbau- und Nährstoffzyklen von Gruppen hochspezialisierter Mikroorganismen erzeugt, die die mikrobiellen Transformationen, die auf makroskopischer Ebene beobachtet werden, ausführen [6]. Die biochemische Flexibilität einer mikrobiellen Gemeinschaft in einer spezifischen Umgebung ist abhängig von der

Art der verschiedenen vorhandenen mikrobiellen Konsortien und ihrer Interaktionen. Dass die biologische Reinigung von verschmutzter Umgebung ein Prozess von ganzen Gemeinschaften ist und nicht die Fähigkeit einer einzelnen Mikrobenart, hat Vor- und auch Nachteile. Negativ ist, dass meistens keine Mikroorganismenkulturen beigefügt werden können, die die Verschmutzung vollständig mineralisieren, wurde doch üblicherweise im Labor nach Reinkulturen gesucht, die die entsprechende Verschmutzung abzubauen vermochte. Oft werden auf diese Weise Mikroorganismen selektiv angereichert, die diese spezielle chemische Komponente vollständig und unabhängig abzubauen vermögen. Eine solche Kultur ist in natürlicher Umgebung jedoch nicht notwendigerweise ebenfalls in der Lage sich

avec des propriétés bien définies:

- la sélection de mutants naturels ou
- la manipulation des gènes.

Mais il ne faut pas oublier que la prudence est de rigueur quand il s'agit d'appliquer la technologie génétique. A l'étranger, des micro-organismes manipulés génétiquement sont en train d'être testés quant à leurs possibilités d'utilisation.

4. MICRO-ORGANISMES, CONSORTIUMS ET COMMUNAUTÉS

A supposer qu'elles existent dans la nature, les cultures micro-organiques homogènes sont toutefois rares; quant aux structures communautaires microbiennes en milieu naturel, elles sont complexes et malheureusement encore mal connues (fig. 2).

Pourtant, depuis quelques années, la recherche microbiologique s'attache à comprendre la manière dont ces communautés fonctionnent. En général, les réactions de décomposition se produisent grâce à l'interaction de cycles de décomposition d'une part, et de nutrition d'autre part. Ces cycles permettent à des groupes de micro-organismes hautement spécialisés d'exécuter les transformations microbiennes observées au niveau macroscopique [6]. La flexibilité biochimique d'une communauté microbienne dépend, dans un milieu donné, des divers genres de consortiums microbiens présents et de leurs interactions. Que le nettoyage biologique d'un milieu pollué soit le fait de communautés entières et non d'une seule sorte de microbes,

a ses bons et ses mauvais côtés. Désavantage: il est souvent impossible d'ajouter des cultures micro-organiques propres à minéraliser complètement une substance incriminée. En effet, les recherches en laboratoires ont été axées sur des cultures homogènes uniquement capables de décomposer le polluant en question, ce qui a conduit à enrichir des micro-organismes de manière sélective, donc susceptibles de décomposer des produits chimiques donnés de manière complète et indépendante. Toutefois, de telles cultures ne sont pas forcément capables de s'imposer en milieu naturel. Non seulement ces organismes doivent être capable de faire face à la concurrence de la flore déjà présente, mais ils sont aussi confrontés à un large éventail de polluants à décomposer. Par conséquent, l'idée d'une "superbactérie" nous paraît plutôt irréaliste. Les systèmes naturels contiennent des communautés microbiennes d'une grande diversité du point de vue biochimique. Quand les conditions d'un milieu spécifique se modifient un tout petit peu, par exemple quand la température change ou que l'apport nutritif varie, etc, la communauté microbienne peut s'adapter à ces modifications en déplaçant plus ou moins l'équilibre de sa composition.

Il arrive souvent qu'un écosystème soit fortement pollué par une substance donnée, dont la décomposabilité avait auparavant été démontrée en laboratoire; soit un chaînon important du processus de décomposition manque au niveau du potentiel biochimique de la commu-

nauté concernée, soit les organismes capables d'effectuer le travail sont handicapés par le manque ou la restriction des substances nutritives spécifiques vitales tels qu'azote ou phosphore. Voilà pourquoi la décomposition biologique in situ ne peut fonctionner que si les besoins nutritifs de la population présente sont préalablement satisfaits. On ne peut intervenir de manière efficace que si l'on comprend comment une manipulation de la communauté agit sur son équilibre microbien; on pourra ainsi créer de nouveaux consortiums microbiens susceptibles d'effectuer la décomposition souhaitée.

5. SURVIE ET STABILITÉ

En admettant qu'on dispose d'un organisme spécial, obtenu par sélection ou par manipulation génétique, capable de décomposer une substance nocive, on n'a fait qu'un premier pas dans le processus global d'assainissement environnemental. Le deuxième consiste à introduire cet organisme dans son nouveau milieu de sorte que (a) il puisse s'établir par lui-même, sans être exclu par la concurrence, et (b) il puisse demeurer actif. Quelques résultats sont déjà disponibles concernant la survie et le maintien de l'activité de souches bactériennes sélectionnées et importées. On a souvent constaté que, surtout dans des milieux faiblement pollués, ie. dans des conditions où la pression sélective pour le maintien de la souche introduite est moindre, cette souche n'est capable de s'implanter qu'en très haute concentra-

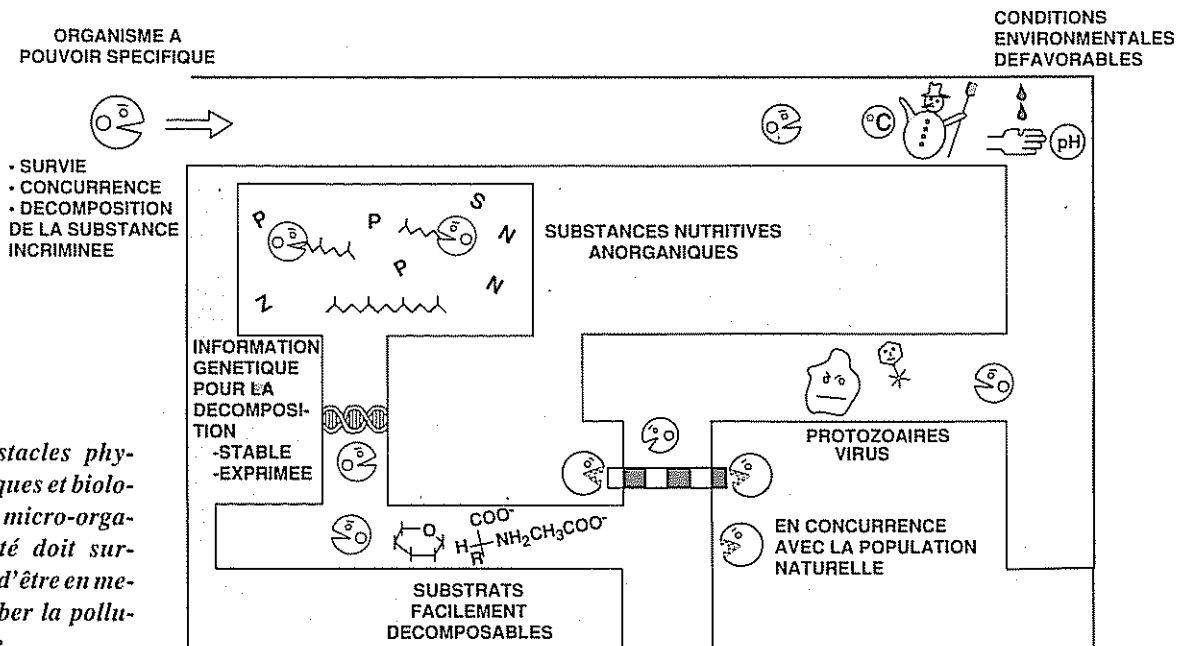


Fig. 3
La piste d'obstacles physiques, chimiques et biologiques qu'un micro-organisme importé doit surmonter avant d'être en mesure de résorber la pollution chimique.

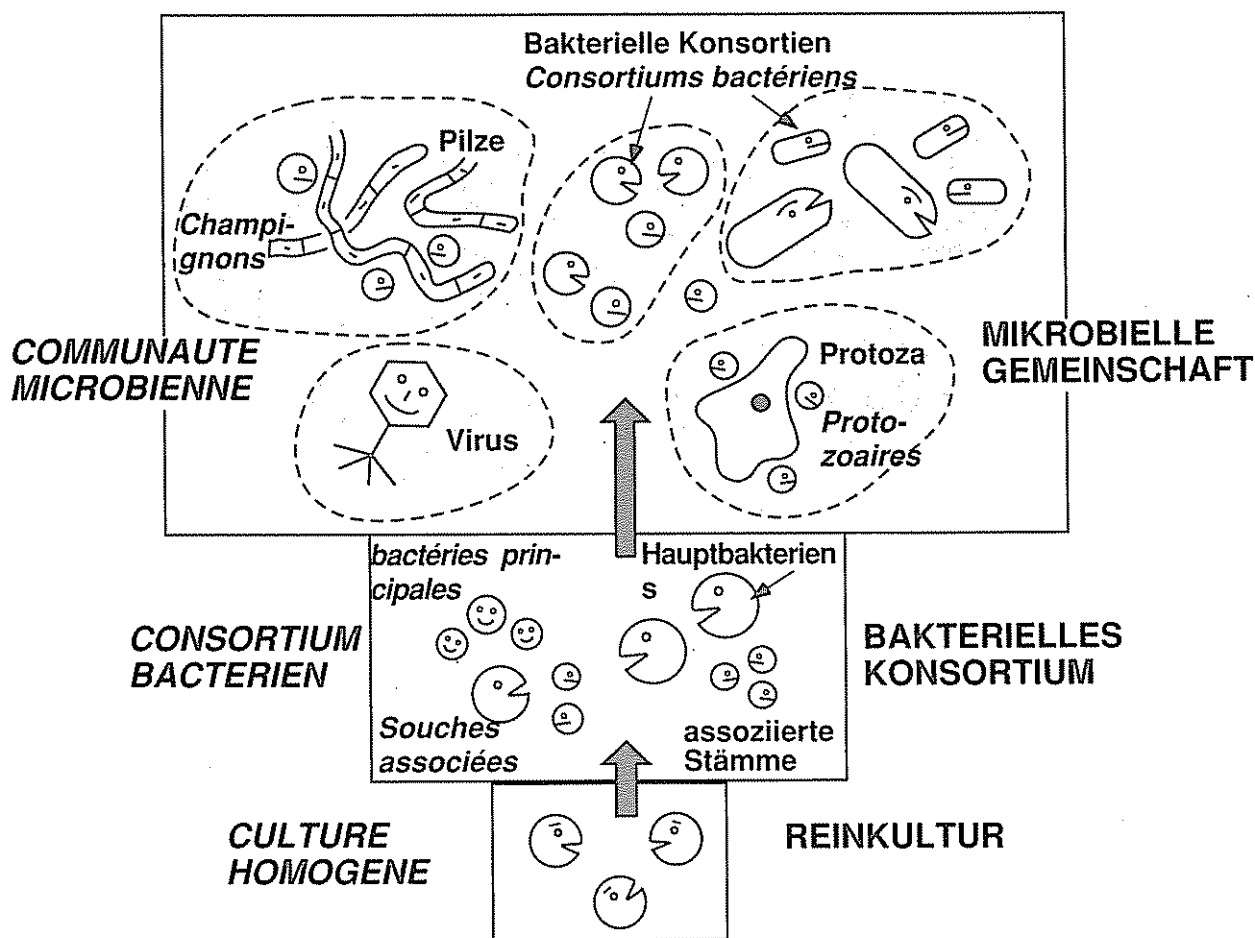


Fig. 2

Composition schématisée des communautés microbiennes.

Schematische Darstellung der Zusammensetzung mikrobieller Gemeinschaften.

durchzusetzen. Nicht nur müssen sich diese Organismen im Wettbewerb mit der bereits vorhandenen Flora behaupten können, meist finden sie auch ein breites Spektrum problematischer Schadstoffe, die abzubauen sind.

Von daher erscheint uns das Konzept der "Superbakterie" als eher unrealistisch. In natürlichen Systemen findet man eine biochemische Vielfaltigkeit von mikrobiellen Gemeinschaften. Wenn die Bedingungen in einer spezifischen Umgebung nur geringfügig ändern, z.B. Temperatur, schwankende Nährstoffzufuhr, usw., dann kann sich die mikrobielle Gemeinschaft an diese Veränderung durch kleinere oder grössere Verschiebungen in der Zusammensetzung der Gemeinschaft anpassen.

Wenn ein Ökosystem von einer speziellen Substanz stark verschmutzt ist, die sich im Labor als abbaufähig erwiesen hat, rührt dies oft daher, dass ein wichtiger Schritt im Abbauprozess im biochemischen Potential der vorliegenden Gemeinschaft fehlt oder dass die abbaufähigen Organismen durch das

Fehlen oder die Limitation von speziellen wichtigen Nährstoffen, z.B. N, P, behindert werden. Dies erklärt weshalb biologischer Abbau *in situ* nur funktionieren kann, wenn die Nährstoffbedürfnisse der vorhandenen Population vorher erfüllt worden sind. Ein gezielter Eingriff ist nur möglich, wenn man versteht, wie eine Manipulation der Gemeinschaft eine Veränderung des mikrobiellen Gleichgewichts bewirkt, so dass die so entstandenen, neuen mikrobiellen Konsortien den Abbau ausführen können.

5. ÜBERLEBEN UND STABILITÄT

Auch wenn man, sei es nun durch Selektion oder genetische Manipulation, einen speziellen Organismus, der den Schadstoff abbauen kann, in Händen hat, ist damit nur ein erster Schritt im gesamten Prozess der Umweltsanierung gelöst. Der zweite Schritt besteht darin, diesen Organismus auf solche Art in die neue Umgebung einzuführen, dass (a) er sich selber etablieren kann ohne von der Konkurrenz ausgeschlossen zu

werden und er (b) aktiv bleiben kann. Ueber das Ueberleben und die Erhaltung der Aktivität von zugeführten selektionierten bakteriellen Stämmen liegen bereits einige Resultate vor. Oft zeigte sich, dass speziell in Umgebungen mit geringer Schadstoffkonzentration, d.h., unter Bedingungen in denen der Selektionsdruck zur Erhaltung des eingeführten Stammes niedrig ist, der zugeführte Stamm nur in sehr hoher Konzentration in der Lage ist sich zu etablieren [7]. Ein solches Vorgehen ist aber oft nicht realisierbar. Die Hauptgründe für das erfolglose Einbringen von Mikroorganismen liegen im Vorhandensein von Protozoen, Infektion durch Bacteriophagen oder im Fehlen von Nährstoffen als Resultat einer Konkurrenz mit den bereits vorhandenen Mikroorganismen, die eventuell eine höhere Substrat/Nährstoff Affinität aufweisen. Dies kann besonders in verschmutzten Seen und im Grundwasser beobachtet werden. Die Mechanismen, die beim Ueberleben von Bakterien in fremder Umgebung zum Tragen kommen, sind noch wenig bekannt. Verall-

tion [7]. Mais un tel procédé n'est souvent pas réalisable. Les échecs, lors d'importations de micro-organismes, ont pour raisons principales la présence de protozoaires, l'infection par bactériophages ou le manque de substances nutritives résultant de la concurrence avec des micro-organismes déjà présents se caractérisant par une affinité assez élevée au niveau du substrat ou de la nutrition. C'est le cas particulièrement dans les lacs et les eaux souterraines pollués. Les mécanismes assurant la survie de bactéries en milieu étranger sont encore peu connus. Il est difficile de généraliser, en partie parce que les micro-organismes présentent une diversité taxinomique et biochimique considérable, et parce que les conditions physiques et chimiques qui prévalent dans les différents milieux ainsi que leur influence sur les stratégies de survie sont très variées. De même, on ne connaît que peu de choses sur la manière dont les souches importées se comportent avec les souches déjà présentes, surtout au niveau de l'échange génétique, ainsi que sur la manière dont la structure et la fonction des consortiums sont influencées (fig. 3). Beaucoup de travaux se basent sur des méthodes dépassées pour dépister les sortes de micro-organismes dans leur milieu (par ex. le décompte des micro-organismes vivants) bien que ces méthodes aient depuis longtemps été reconnues pour inadéquates [8].

6. ÉCOLOGIE MOLÉCULAIRE ET TECHNOLOGIE DE DÉTECTION

La biologie moléculaire a donné le jour à une nouvelle science: l'écologie moléculaire, laquelle s'occupe des mécanismes moléculaires régissant l'interaction d'un organisme avec son milieu. Cette science se pose avant tout les questions suivantes. Qu'est-ce qui régule l'expression de certains gènes? Comment les micro-organismes réagissent-ils au niveau génétique, quand il sont confrontés à des conditions physiques défavorables ou quand il sont exposés à des composés chimiques? La caractérisation de ce qu'on appelle "stress response", résultant de l'effet d'une substance polluante, est un important domaine de recherche au sein du département "biologie technique" à l'EAWAG. L'écologie moléculaire se préoccupe également du développement et de l'application de

nouvelles techniques permettant de mieux dénombrer des bactéries spécifiques dans des communautés complexes [9]. A l'heure actuelle, on arrive même à surveiller avec plus d'exactitude la survie d'un micro-organisme spécifique. De tels programmes de contrôle jouent un rôle capital dans la phase de développement et de recherche portant sur l'utilisation de cultures fabriquées en laboratoire. Les méthodes de l'écologie moléculaire ne s'appliquent pas seulement à des micro-organismes définis, mais permettent également de poursuivre l'évolution de certains gènes - des données qui sont une condition préalable à toute discussion scientifique sur l'emploi en milieu naturel d'organismes génétiquement manipulés [cf. directives CSSB].

7. LES SUBSTRATS HOMOGENES SONT UN MYTHE DE LABORATOIRE: L'ENVIRONNEMENT NATUREL EST COMPLEXE.

Souvent, on est enclin à se limiter à l'éloignement biologique de chaque substance nocive. Les milieux pollués se divisent en trois groupes:

- a) ceux qui ont été pollués par un mélange complexe tel que pétrole brut, mazout, kérosène, charbon, etc.
- b) ceux qui ont été pollués par un mélange simple tel que dissolvants, explosifs, etc
- c) ceux qui ont été pollués par des déchets spéciaux, des produits "off specification", des produits chimiques inclassifiables, des résidus d'incendie avec des modifications chimiques difficiles à définir.

Des solutions générales sont envisageables pour les deux premières catégories; quant à la troisième, elle implique une recherche exhaustive pour chacun des polluants. On ne s'étonnera donc pas de voir que le concept "culture homogène - substrat homogène" ne peut être appliqué en pratique malgré l'abondance des données livrées par les recherches de laboratoire. La tâche des microbiologistes environnementaux consiste maintenant à développer des programmes aussi globaux que possible assurant le succès de l'utilisation de certains organismes en milieu complexe. Ces programmes tiendront notamment compte des mécanismes rétroactifs présents dans des populations composées d'un ou de

plusieurs consortiums stables, dont la croissance sur un substrat complexe ou sur les produits résultant de leur métabolisme est possible.

8. PROGRAMMES

Le pétrole brut est par excellence un mélange de substances nocives ayant un impact aussi bien qualitatif que quantitatif sur les systèmes naturels. Les hydrocarbures que contient le brut peuvent troubler de manière durable bien des processus biologiques. Fait le plus inquiétant, quelques hydrocarbures, même en petite quantité, ont un impact fortement mutagène. Le réseau de transport pétrolier très dense d'une part, l'utilisation intensive de combustibles fossiles à des fins énergétiques ou comme produits de base pour la technologie des plastiques d'autre part, ont contribué à augmenter de manière assez considérable la pollution pétrolière de source humaine. Les transports ont provoqué, en 1981, l'écoulement de 1 à 2,6 millions de tonnes d'hydrocarbures dans les écosystèmes marins, dont 0,3 à 0,4 millions sont dus aux accidents de pétroliers uniquement. Les consommateurs institutionnels et privés signent responsables pour 0,6 à 3 millions de tonnes d'hydrocarbures répandues dans les mers et les océans. En comparaison, la même année, 0,03 à 2,5 millions de tonnes se sont naturellement écoulées dans les écosystèmes marins [10]. Dans un passé encore récent, des cultures spécifiques ont été utilisées pour nettoyer des domaines côtiers, des surfaces maritimes et, dans certains cas même, des stations d'épuration. Souvent, aucun succès n'a été obtenu, ou alors il était très difficile d'attribuer de manière univoque le travail de décomposition aux micro-organismes importés. A Buffalo, un groupe de travail a testé l'efficacité de 16 mélanges de bactéries commercialisés et recommandés pour le nettoyage biologique. Les résultats étaient décevants [11]. Dans aucun cas, l'adjonction d'une culture n'a permis d'améliorer la capacité de décomposition de la population bactérienne déjà présente dans le système de test. Ces résultats ne signifient toutefois pas qu'il faille condamner trop vite l'utilisation de telles cultures pour cause d'inefficacité. Ils indiquent seulement que l'importation incontrôlée de micro-organismes dans des systèmes naturels n'obtient guère le succès désiré. En re-

gemeinerungen sind schwierig, zum Teil wegen der enormen taxonomischen wie auch biochemischen Diversität von Mikroorganismen, und wegen der unterschiedlichen physikalischen und chemischen Parameter, die in den verschiedenen Umfeldern vorherrschen und ihren Einfluss auf Überlebensstrategien ausüben. Wie die eingeführten Stämme mit den vorhandenen Stämmen, im besonderen im Hinblick auf den genetischen Austausch interagieren und wie die Struktur und Funktion der Konsortien beeinflusst wird, ist ebenfalls noch wenig bekannt. (Fig. 3). Viele Arbeiten stützen sich auf überholte Methoden zur Auffindung von Mikroorganismen in der Umgebung (z.B. Lebendkeimzahlen), obwohl diese Methoden längst als inadäquat erkannt wurden.[8].

6. MOLEKULARE ÖKOLOGIE UND NACHWEIS-TECHNOLOGIE

Aus der molekularen Biologie hat sich eine weitere Wissenschaft entwickelt: die molekulare Oekologie. Diese Wissenschaft beschäftigt sich mit den molekularen Mechanismen der Interaktion eines Mikroorganismus mit seiner Umgebung. Im Vordergrund stehen

die Fragen: Was reguliert die Expression von bestimmten Genen? Wie reagieren Mikroorganismen auf der genetischen Ebene, wenn sie ungünstige physikalische Bedingungen antreffen oder wenn sie chemischen Schadstoffen ausgesetzt sind? Die Charakterisierung der sogenannten "Stress Antwort" als Resultat einer Schadstoffeinwirkung ist ein wichtiges Forschungsfeld in der Abteilung Techn. Biologie an der EAWAG. Die molekulare Oekologie beschäftigt sich auch mit der Entwicklung und Anwendung neuer Techniken zur genaueren Enumerierung spezifischer Bakterien in komplexen Gemeinschaften [9]. Möglich geworden ist nun sogar eine genauere Überwachung des Überlebens eines speziellen Mikroorganismus. Solche Nachweiskonzepte sind in der Entwicklung und Forschungsphase über die Nutzung labormässig hergestellter Kulturen von grosser Bedeutung. Die Methoden der molekularen Ökologie erfassen nicht nureinzelne Mikroorganismen, sondern sind auch in der Lage, einzelnen Gene zu verfolgen - Daten, die für eine wissenschaftliche Diskussion über die Freisetzung genmanipulierter Organismen Voraussetzung sind [SKBS-Richtlinien].

7. EINZELSUBSTRATE SIND LABORMYTHOS: DIE NATÜRLICHE UMWELT IST KOMPLEX.

Oft ist man geneigt, sich auf die biologische Entfernung eines einzelnen Schadstoffes zu beschränken. Verschmutzte Umgebungen lassen sich grundsätzlich in drei Gruppen unterteilen:

- solche, die durch komplexe Mischungen verschmutzt wurden, wie Rohöl, Heizöl, Kerosin, Kohle etc.
- solche, die durch einfache Mischungen verschmutzt wurden, Lösungsmittel, Sprengstoffe etc. und die dritte Gruppe
- bezieht sich auf Gebiete, die durch verschiedenartige Abfälle, "off specification" Produkte, schlecht definierte Chemikalien, Brandabfälle mit schlecht definierbaren chemischen Modifikationen verunreinigt wurden.

Allgemeine Lösungen sind bei den ersten beiden Kategorien möglich aber die komplexe und unbestimmte Art der dritten Kategorie bedingt eine sehr gründliche Untersuchung jeder einzelnen Komponente. Es überrascht deshalb

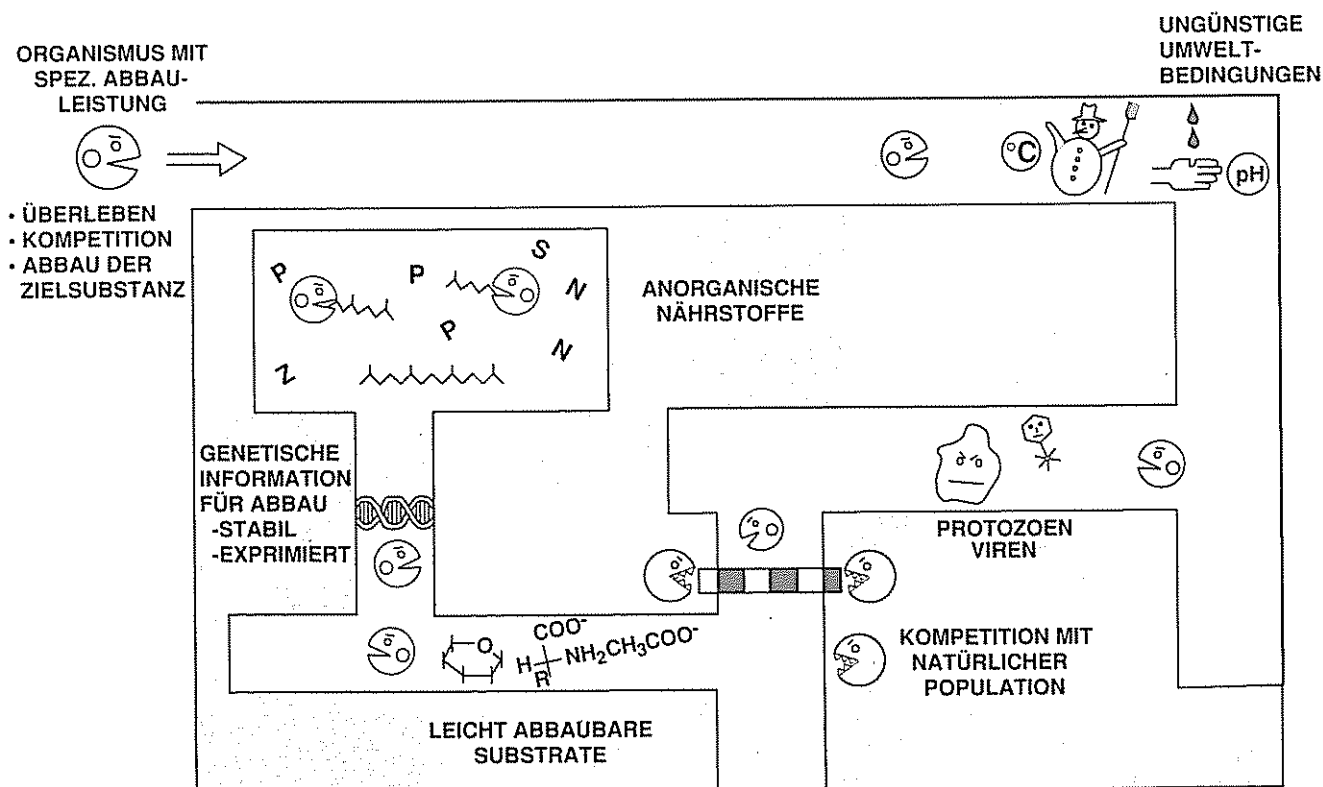


Fig. 3. Das Labyrinth von physikalischen, chemischen und biologischen Hürden, welche ein zugeführter Mikroorganismus bewältigen muss bevor er die chemische Verschmutzung abzubauen vermag

vanche, lorsque les paramètres systémiques sont bien connus et que le contrôle du processus est effectué soigneusement, le procédé représente une possibilité d'améliorer (de manière flexible, hautement efficace et peut-être aussi bon marché) le travail de décomposition microbien dans les stations d'épuration industrielles. L'efficacité avec laquelle un micro-organisme spécialisé remplit sa mission dans un système naturel dépend, dans une large mesure, des conditions locales et du processus de contrôle. Pour utiliser une culture avec succès, il faut d'abord que l'organisme importé puisse s'établir dans le système. Il faut aussi que les échanges de métabolisme nécessaires à la décomposition d'une substance nocive soient actifs dans des conditions environnementales données. Pour nous, l'intérêt réside dans les possibilités d'influencer le comportement et les interactions d'une culture bactérienne importée en modifiant de manière adéquate les conditions environnementales.

Particulièrement dans le domaine de l'épuration des eaux, plusieurs possibilités ont été proposées pour augmenter la capacité de décomposition en ajoutant des micro-organismes. Dans la plupart des stations d'épuration communales, de telles importations se limitent à la phase d'arrivée. Des importations dans une phase plus tardive se sont souvent révélées inefficaces, car les micro-organismes introduits n'étaient pas à la hauteur de la concurrence que leur livrent les microbes déjà présents, et n'ont pas su lutter contre l'appétit vorace des protozoaires. Pourtant, les stations d'épuration permettent précisément de retenir certaines substances nocives avant qu'elles ne se perdent dans l'environnement; c'est le cas par exemple de l'hydrocarbure Pristan. Cette molécule complexe (C 19) apparaît lors de pollutions aux hydrocarbures ainsi que dans les eaux industrielles des raffineries. Jusqu'à une date récente, on supposait que cette molécule ne pouvait pas être dégradée biologiquement, car on a toujours constaté la même concentration de Pristan dans les zones polluées par des hydrocarbures. Dans notre laboratoire, C. Kroll a isolé des micro-organismes capables de décomposer cette substance. Or, si celle-ci n'est pas décomposée en milieu naturel, c'est moins parce qu'il manquerait de micro-organismes capables d'en

opérer la décomposition que parce que ceux-ci peuvent aussi croître sur d'autres substrats préférés au Pristan en raison de chaînes plus courtes, d'embranchements moins nombreux, etc. Même si les autres substrats sont éloignés de la zone concernée, le Pristan ne sera pas décomposé. Il semble que la présence d'autres substances nutritives agisse de manière limitative et empêche par là la décomposition du Pristan. Par conséquent, il n'est pas étonnant que le Pristan puisse passer outre l'épuration des eaux d'une raffinerie, étant donné que, dans ce cas aussi, les autres composants du pétrole brut sont de préférence décomposés. Une solution résiderait à immobiliser les micro-organismes [13]. De la sorte, on peut changer radicalement leur physiologie. Beaucoup de ces modifications semblent favoriser la décomposition des substances nocives. Par ailleurs, des organismes immobilisés sont moins facilement emportés et résistent mieux à la concurrence.

9. CONCLUSIONS

Ce survol met en évidence non seulement l'importance d'une connaissance profonde des facteurs physiques, chimiques et autres influençant de manière décisive la neutralisation des polluants, mais aussi la nécessité d'un savoir biologique étendu. Chaque cas particulier doit être isolé et traité dans le détail, ce qui suppose une banque de données concernant les études et les recherches déjà menées. L'utilisation de cultures spéciales peut bien avoir été infructueuse dans certains cas, soit que des conditions environnementales n'aient pas été prises en considération, soit que le programme n'ait pas été valable. Mais on peut toujours appliquer diverses méthodes: il convient en premier lieu de les évaluer soigneusement avant de déterminer la plus adéquate. De nombreuses questions subsistent quant à la survie des micro-organismes dans les milieux naturels et techniques; une banque de données les répertoriant fournirait de précieux services pour le maintien d'un environnement propre.

Nous remercions nos collègues Mario Snozzi et Ilse-Dore Quednau pour leurs remarques et leurs suggestions quant au fond et la forme de notre exposé, d'une part, et pour la traduction en allemand, d'autre part.

1. Holloway M. (1991): Soiled Shores. *Sci. Am.*, 265 (4), 80-94.
2. Hirsch P.R. and Spokes J.R. (1988): *Rhizobium leguminosarium* as a Model for Investigating Gene Transfer in Soil. In: Risk Assessment for Deliberate Releases, Klingmüller W. ed.) pp. 10-17, Springer-Verlag, Berlin.
3. Colwell R.R. (1991): Risk Assessment in Environmental Biotechnology. *Curr. Opin. Biotechnol.* 2, 470-475.
4. Saylor G.S. et al., (1990): Catabolic Plasmids of Environmental and Ecological Significance. *Microb. Ecol.* 19, 1-20.
5. Fry J.C. and Day M.J. (eds) (1990): *Bacterial Genetics in Natural Environments*. Chapman and Hall, London.
6. Hamer G. and Heitzer A. (1991): Polluted Heterogeneous Environments: Macro-Scale Fluxes, Micro-Scale mechanisms and Molecular-Scale Control. In: *Environmental Biotechnology for Waste Treatment*. Saylor G.S et al. eds., pp 233-248. Plenum Press, London.
7. Ramadan M.A. et al. (1990): Inoculum Size as a Factor Limiting Success of Inoculation for Biodegradation. *Appl. Environ. Microbiol.* 56, 1392-1396.
8. Mason C.A. et al. (1986): The Death and Lysis of Microorganisms in Environmental Processes. *Fems Microbiol. Rev.* 39, 373-401.
9. Olson B.H. (1991): Tracking and Using Genes in the Environment. *Env. Sci. Technol.* 25, 604-611.
10. National Research Council (1985): *Oil in the Sea - Inputs, Fates and Effects*. National Academic Press, Washington.
11. Lange C.R., et al (1988): Constraints of Bioaugmentation in Enhancing Biological Treatment Performance. *Proc. 42nd Ind. Waste Conf. Purdue Univ.* LEWIS Publishers, Chelsea, p. 275-284
12. Crawford R.L. (1991): Bioremediation of Groundwater Pollution. *Curr. Opin. Biotechnol.* 2, 436-439.
13. Crawford R.L. et al. (1990): Microorganism stabilization for *in situ* degradation of toxic chemicals. In: *Advances in Biotechnology Series, Vol 4. Biotechnology and Biodegradation*, Kamely et al. Eds. pp 203-211, Portfolio Publishing Co. Texas.

nicht, dass ein "Reinkultur-Monosubstrat" Konzept in der Praxis nicht angewandt werden kann obwohl zahlreiche Daten aus den Laborstudien vorliegen. Die Aufgabe des Umwelt-Mikrobiologen liegt nun darin, möglichst umfassende Konzepte für eine erfolgreiche Anwendung einzelner Mikroorganismen in komplexer Umgebung zu entwickeln in Kenntnis der Interaktionsmechanismen in Populationen aus einem oder mehreren stabilen Konsortien, denen Wachstum auf einem Mischsubstrat (oder ihren Stoffwechselprodukten) möglich ist.

8. KONZEPTE

Ein Schadstoffgemisch mit grossen qualitativen und quantitativen Einflüssen auf natürliche Systeme ist Erdöl. Die Kohlenwasserstoffe im Erdöl können viele biologische Prozesse nachhaltig schädigen; vor allem die in kleinsten Mengen stark mutagene Wirkung einiger Kohlenwasserstoffe ist bedenklich. Bedingt durch die intensive Verwendung fossiler Brennstoffe als Energieträger und Ausgangsstoffe in der chemischen Technologie, sowie durch das dichte Transportnetz für Erdöl ist der Oeleintrag in die Umwelt aus antropogenen Quellen relativ hoch. Als Folge des Transportes gelangten 1981 1 - 2.6 Millionen Tonnen Kohlenwasserstoffe in marine Ökosysteme. Davon kamen 0.3 - 0.4 Millionen Tonnen allein auf Tankerunfälle. Institutionelle und private Verbraucher verursachten 1981 weltweit 0.6 - 3 Millionen Tonnen Kohlenwasserstoffeinträge in marine Gewässer. Aus natürlichen Quellen gelangten 1981 0.03 - 2.5 Millionen Tonnen in marine Ökosysteme [10].

In jüngerer Vergangenheit wurden spezielle Kulturen bei der Reinigung verschmutzter Küstengebiete und Meeresoberflächen und in einigen Fällen auch in Kläranlagen eingesetzt. Oftmals blieb der Erfolg aus oder es war zumindest schwierig, Abbauleistungen eindeutig den eingeführten Mikroorganismen zuzuordnen. Eine Arbeitsgruppe in Buffalo testete 16 kommerzielle, für biologische Reinigung empfohlene Bakteriengemische auf ihre Leistung. Das Ergebnis war ernüchternd [11]. Die Abbauleistungen der bereits im Testsystem vorhandenen bakteriellen Population konnte durch die zugesetzte Kultur in keinem Fall verbessert werden. Dieses Ergebnis darf allerdings nicht

dazu verleiten, den Einsatz solcher Kulturen voreilig als nicht effizient zu verurteilen. Das Resultat zeigt jedoch, dass die unkontrollierte Zugabe von Mikroorganismen in natürliche Systeme kaum den gewünschten Erfolg erzielen wird. Das Vorgehen ist hingegen bei profunder Kenntnis der Systemparameter und sorgfältiger Prozesskontrolle eine höchst effiziente, vielseitige und vermutlich auch kostengünstige Möglichkeit zur Verbesserung der mikrobiellen Abbauleistungen in industriellen Kläranlagen. Wie effizient ein spezialisierter Mikroorganismus in einem natürlichen System die angestrebte Funktion erfüllen kann, hängt weitgehend von den lokalen Umweltbedingungen und der Prozesskontrolle ab. Ein erfolgreicher Einsatz von Kulturen erfordert einerseits, dass sich der eingeführte Organismus im System etablieren kann; andererseits müssen die für den Abbau einer Problemsubstanz notwendigen Stoffwechselwege unter den gegebenen Umweltbedingungen aktiv sein. Uns interessieren die Möglichkeiten, wie wir mittels geeigneter Variation der Umweltbedingungen das Verhalten und die Wechselwirkungen in einer supplementierten Bakteriennischkultur beeinflussen können.

Besonders in der Abwasserreinigung wurden verschiedene Möglichkeiten vorgeschlagen, wie durch die Beigabe von Mikroorganismen die Abbauleistung des Prozesses erhöht werden kann. In den meisten kommunalen Kläranlagen beschränken sich solche Beigaben auf die Einlaufphase; spätere Beigaben haben sich oft als ineffizient erwiesen, da sie dem Wettbewerb mit den vorhandenen Mikroben und dem Frass durch Protozoen nicht gewachsen waren. Dabei könnte gerade in Kläranlagen die Möglichkeit genutzt werden Schadstoffe zurückzuhalten bevor sie in die Umwelt gelangen können, z. B. der Kohlenwasserstoff Pristan. Diese verzweigte C-19-Verbindung tritt bei Ölverschmutzungen auf und auch im Abwasser von Oelraffinerien. Bis vor kurzem nahm man an, dass diese Komponente nicht biologisch abgebaut werden kann, da sie bei Oelverschmutzungen immer in gleichbleibender Konzentration gefunden wurde. C. Kroll hat in unserem Labor Mikroorganismen isoliert, die in der Lage sind, diese Komponente abzubauen. Wenn diese Komponente in der natürlichen Umwelt nicht abgebaut wird, liegt dies weniger daran, dass abbau-

fähige Mikroorganismen nicht vorhanden sind, sondern eher daran, dass diese Organismen auch auf anderen Substraten wachsen können, die dem Pristan vorgezogen werden (kürzere Ketten, weniger Verzweigungen etc). Auch wenn die anderen Substrate aus der in Frage stehenden Umgebung entfernt sind, wird das Pristan nicht abgebaut. Es scheint als ob andere Nährstoffe limitierend geworden seien (Makro- oder Spurenelemente wie im Fall der marinen Umwelt) und so den Pristanabbau behindern. Es ist deshalb auch nicht erstaunlich, wenn Pristan ungehindert die Abwasserreinigung einer Öltraffinerie passieren kann, da auch in diesem Fall die übrigen Erdölkomponenten bevorzugt abgebaut werden. Eine Möglichkeit besteht in der Immobilisierung von Mikroorganismen [13]. Durch Immobilisierung kann die Physiologie drastisch verändert werden. Viele dieser Änderungen scheinen den Schadstoffabbau zu begünstigen. Immobilisierte Organismen sind auch weniger anfällig auf Auswaschung und Konkurrenzierung.

9. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Dieser Überblick zeigt nicht nur die Bedeutung eines fundierten Verständnisses von physikalischen, chemischen und anderen Faktoren auf, die die erfolgreiche Schadstoffbeseitigung beeinflussen können, sondern auch die Notwendigkeit fundierter biologischer Kenntnisse. Der einzelne Fall muss gesondert und detailliert angegangen werden, was eine Grundlagen- und Forschungs-Datenbank voraussetzt. Der Einsatz spezieller Kulturen könnte in einigen Fällen versagt haben, weil gewisse Umweltsbedingungen nicht in die Betrachtungen einbezogen worden waren und nicht weil das Konzept selbst versagte. Immer sind verschiedene Methoden möglich und jede einzelne muss sorgfältig evaluiert werden um die die am besten geeignete zu bestimmen. Viele Fragen über das Überleben von Mikroorganismen in natürlichen und technischen Systemen sind noch offen und eine solche Datenbank wird einen wertvollen Beitrag zu einer sauberen Umwelt bieten.

Unseren KollegInnen Mario Snozzi und Ilse-Dore Quednau danken wir für ihre inhaltliche und redaktionelle Diskussionen sowie für die Übersetzung ins Deutsche □

ANALYSE DES DONNÉES AU MOYEN DE MODÈLES DE RÉGRESSION NON-LINÉAIRES

HANS-PETER E. KOHLER ET PAUL G. TRATNYEK

1. INTRODUCTION

1.1 Rapports fonctionnels et méthode des moindres carrés

Chimistes, biochimistes et microbiologistes sont souvent occupés à examiner les rapports fonctionnels entre des couples de données. La relation fonctionnelle entre variables peut résulter d'une théorie fondamentale, comme c'est le cas pour les lois régissant la vitesse des réactions chimiques et biochimiques; elle peut aussi tout simplement être décrite à l'aide d'une fonction appropriée telle que polynôme ou exponentielle. Les données servent à définir les paramètres d'un modèle, à en vérifier à la fois la validité et l'adéquation. Ce genre de problématique est grandement facilitée si on a recours à l'analyse régressionnelle ou corrélationnelle.

En statistique, on parle de régression de Y par rapport à X quand une variable (Y) est considérée comme dépendante et que l'autre (X) est considérée comme indépendante, cette dernière étant supposée échapper à toute erreur aléatoire - nous ne nous préoccupons pas ici des régressions multiples. En revanche, on parle de corrélation entre X et Y quand aucune des variables ne peut être considérée comme dépendante ou indépendante. La relation fonctionnelle la plus simple entre ces deux variables s'exprime par le modèle linéaire suivant:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

Ce modèle comprend un élément déterministe, $\beta_0 + \beta_1 X_i$, et un élément stochastique, ε_i . Les valeurs estimées pour les paramètres réels sont calculés par la méthode des moindres carrés. La courbe est prévue de sorte que la somme des carrés de tous les écarts des valeurs par rapport à la courbe soit réduite au maximum. La variable statistique χ^2 est par conséquent minimisée.

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^N \left(\frac{Y_i - Y(x_i)}{\sigma_i} \right)^2 \quad (2)$$

Les valeurs estimées grâce à ce procédé

s'appellent valeurs estimées LS (de l'anglais "least square"). Si les variables aléatoires indépendantes de ε_i et normalement réparties correspondent à la valeur moyenne zéro et à la variance finie σ^2 , les valeurs estimées LS d'un modèle linéaire équivalent aux valeurs estimées ML (de l'anglais "maximum likelihood"), c'est-à-dire aux valeurs estimées qui ont donné lieu avec la plus grande probabilité à l'ensemble de données considérées. Ces valeurs correspondent à l'espérance mathématique et ont une variance minimale; donc dans ce cas, la méthode des moindres carrés livre pratiquement les meilleures estimations [1]. Cet avantage, ajouté au fait que les paramètres de modèles linéaires sont simples à déterminer, a certainement contribué à la vogue que connaissent les modèles linéaires de régression.

Mais les scientifiques doivent quotidiennement recourir à des modèles non-linéaires. Parfois, on peut les transposer en modèles linéaires, mais cet ajustement ne va pas sans créer de sérieux problèmes, comme nous le verrons plus loin. Nous allons montrer ici comment il est possible d'utiliser des modèles non-linéaires et d'en calculer les paramètres grâce aux ordinateurs et aux programmes statistiques modernes. En non-linéarité, la méthode des moindres carrés ne fournit plus de base analytique; il faut donc recourir à des algorithmes itératifs qui minimisent la somme des carrés des écarts dans l'espace paramétrique multidimensionnel.

1.2 Modèles non-linéaires

Quand on parle d'un modèle non-linéaire, "non-linaire" se rapporte toujours aux paramètres. Du point de vue formel, "non-linaire" signifie qu'au moins une des dérivées de Y par rapport aux paramètres est elle-même une fonction d'au moins un des paramètres. Le modèle suivant est donc linéaire:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \varepsilon \quad (3)$$

Certains modèles non-linéaires peuvent être mathématiquement transformés en modèles linéaires. A titre d'exemple, voici un modèle exponentiel:

$$Y = \beta_0 \exp(-\beta_1 X) + \varepsilon \quad (4)$$

Comme le montre l'équation (4), ce modèle ne peut être exprimé sous forme linéaire que dans le cas d'un facteur d'erreur stochastique multiplicatif. Si ce facteur d'erreurs s'additionnait, le modèle ne pourrait plus être linéarisé. Les logarithmes permettent de passer de (4) à (5).

$$\ln Y = \ln \beta_0 - \beta_1 X + \ln \varepsilon \quad (5)$$

L'équation (5) montre que le facteur d'erreur stochastique $\ln \varepsilon$ n'est plus distribué au hasard dans les cas où ε l'était.

Il faut souligner ici qu'une répartition normale du facteur d'erreur est nécessaire quand on veut effectuer des tests de signification valables et déterminer les marges de fiabilité. L'expérimentateur doit par conséquent soigneusement vérifier que les conditions pour une application optimale de la méthode LS soient encore remplies lors des transformations mathématiques [2]. Pour ces raisons, certains auteurs préconisent de décrire des données non-linéaires directement avec un modèle non-linéaire, plutôt que de décrire des données transformées avec la version linéaire du même modèle [3]. Au chapitre 2, ce point de vue sera repris plus exhaustivement, avec un exemple concret à l'appui.

1.3 Modèles de régression non-linéaires quasi-linéaires.

Les modèles de régression non-linéaires ne présentent en général aucune valeur estimée calculée par la méthode des moindres carrés pour les paramètres (ie. les estimations LS) qui correspondent à l'espérance mathématique tout en étant répartis normalement et en possédant une variance minimale. Les valeurs estimées n'acquièrent ces propriétés que de manière asymptotique, c'est-à-dire quand le nombre de valeurs mesurées s'approche de l'infini.

Il existe toutefois des modèles non-linéaires dont les prédictions paramétriques correspondent assez bien à l'espérance mathématique tout en étant réparties normalement et en possédant une variance minimale même quand on dispose de mesures peu nombreuses. En d'autres termes, les estimations LS deviennent quasiment des valeurs estimées ML. Ce genre de modèle est appelé

DATENANALYSE MITTELS NICHTLINEAREN

REGRESSIONSMODELLEN

HANS-PETER E. KOHLER UND PAUL G. TRATNYEK

1. EINFÜHRUNG

1.1 Funktionale Zusammenhänge und die Methode der kleinsten Quadrate.

Vielfach sind ChemikerInnen, BiochemikerInnen oder MikrobiologInnen damit beschäftigt funktionale Zusammenhänge zwischen Datenpaaren zu untersuchen. Die funktionale Beziehung zwischen den Variablen kann einerseits aus einer zugrundeliegenden Theorie stammen, wie zum Beispiel bei Geschwindigkeitsgesetzen chemischer und biochemischer Reaktionen, oder andererseits einfach durch eine geeigneten Funktionen parameterisiert werden, wie zum Beispiel Polynome oder Exponentialfunktionen. Die Messdaten dienen dazu, Modellparameter zu ermitteln und Aussagen zu machen über die Güte des Modells sowie seine Fähigkeit zu vernünftigen Voraussagen. Diese Art der Fragestellung lässt sich mit Hilfe der Regressions- oder Korrelationsanalyse behandeln.

In der Statistik spricht man von Regression von Y bezüglich X (multiple Regressionen werden im folgenden nicht berücksichtigt), falls eine Variable (X) als unabhängig und die andere (Y) als abhängig angesehen wird unter der Annahme, dass die unabhängige Variable keinem zufälligen Fehler unterworfen ist. Von Korrelation zwischen X und Y dagegen wird gesprochen, falls keine der Variablen als abhängig oder unabhängig angesehen wird. Die einfachste funktionale Beziehung zwischen zwei Variablen wird durch das folgende lineare Modell beschrieben.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

Das Modell besteht aus einem deterministischen Teil, $\beta_0 + \beta_1 X_i$, und einem stochastischen Teil, ε_i . Die Schätzwerte für die wahren Parameter werden mittels der Methode der kleinsten Quadrate berechnet, d.h. die Kurve wird so gelegt, dass die Summe der Quadrate aller Abstände der Datenpunkte von der Kurve

$$\chi^2 \equiv \sum_{i=0}^N \left(\frac{Y_i - Y(x_i)}{\sigma_i} \right)^2 \quad (2)$$

möglichst klein wird. Dazu wird die Statistik χ^2 minimiert.

Die durch dieses Verfahren gewonnenen Schätzwerte werden als LS-Schätzwerte (LS aus dem Englischen "least square") bezeichnet. Unter der Annahme, dass die ε_i unabhängige, normalverteilte Zufallsvariablen mit dem Mittelwert Null und der finiten Varianz σ^2 sind, sind die LS-Schätzwerte eines linearen Modells auch die ML-Schätzwerte (ML aus dem Englischen "maximum likelihood"), d.h. diejenigen Schätzwerte aus denen der betrachtete Datensatz mit grösster Mutmasslichkeit (maximum likelihood) entsprang. Diese Schätzwerte sind erwartungstreu (unbiased) und haben minimale Varianz, d.h. die Methode der kleinsten Quadrate ergibt in diesem Fall die bestmöglichen Schätzwerte in der Praxis [1]. Dies und die Tatsache, dass die Parameter linearer Modelle einfach zu bestimmen sind, haben sicher zur weiten Verbreitung linearer Regressionsmodelle beigetragen.

Im wissenschaftlichen Alltag sind aber viele Modelle nichtlinear. Manchmal können sie in lineare Modelle umgewandelt werden, aber solche Transformationen sind, wie weiter unten gezeigt wird, mit schwerwiegenden Problemen verbunden. Wir werden im folgenden versuchen darzustellen, dass es dank moderner Computer und Statistikprogrammen möglich ist, direkt nichtlineare Modelle zu verwenden und deren Parameter zu berechnen. Da im nichtlinearen Fall der Ansatz der Methode der kleinsten Quadrate keine analytischen Lösungen mehr liefert, werden iterative Algorithmen, welche die Summe der Abweichungsquadrate im multidimensionalen Parameterraum minimieren, verwendet.

1.2 Nichtlineare Modelle.

Wenn man von einem nichtlinearen Modell spricht, so ist nichtlinear immer in Bezug auf die Parameter aufzufassen. Formal heisst nichtlinear, dass wenigstens eine der Ableitungen von Y in Bezug auf die Parameter eine Funktion mindestens einer der Parameter ist. Das folgende Modell ist demzufolge ein lineares Modell.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_{11} X^2 + \varepsilon \quad (3)$$

Einige nichtlineare Modelle können durch mathematische Transformationen, in lineare Modelle umgeformt werden. Als Beispiel sei das folgende Exponentialmodell (4) erwähnt.

$$Y = \beta_0 \exp(-\beta_1 X) + \varepsilon \quad (4)$$

Dieses Modell ist aber, wie in Gleichung 4 dargestellt, nur im Falle eines multiplikativen stochastischen Fehlerterms linearisierbar. Falls der Fehlerterm additiv wäre, könnte das Modell nicht mehr linearisiert werden. Durch Logarithmierung gelangt man von (4) zu (5).

$$\ln Y = \ln \beta_0 - \beta_1 X + \ln \varepsilon \quad (5)$$

Aus Gleichung 5 kann entnommen werden, dass der stochastische Fehlerterm $\ln \varepsilon$ nicht mehr normalverteilt ist, falls ε normalverteilt war.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Durchführung gültiger Signifikanztests und die Bestimmung von Konfidenzintervallen eine Normalverteilung des Fehlerterms verlangt. Der Experimentator muss deshalb sorgfältig überprüfen, ob die Voraussetzungen für eine optimale Anwendung der LS-Methode bei mathematischen Transformationen des Modells noch gegeben sind [2]. Aus diesen Gründen schlagen gewisse Autoren vor, dass es in den meisten Fällen besser ist, nichtlineare Daten direkt mit einem nichtlinearen Modell zu beschreiben, als transformierte Daten mit einer linearisierten Version desselben Modells [3]. Weiter unten im Abschnitt 2 wird dieser Sachverhalt anhand eines konkreten Beispiels nochmals eingehender besprochen.

1.3 "Close-to-linear" nichtlineare Regressionsmodelle

Nichtlineare Regressionsmodelle haben im allgemeinen keine mittels der Methode der kleinsten Quadrate berechneten Schätzwerte für die Parameter (LS-Schätzwerte), welche erwartungstreu, normalverteilt und minimale Varianz besitzen. Die Schätzwerte erlangen diese Eigenschaften nur asymptotisch, das heisst wenn die Anzahl der Messwerte gegen unendlich geht.

Es gibt aber nichtlineare Modelle, deren Schätzwerte für die Parameter schon bei relativ kleinem Stichproben-

quasi-linéaire [4]. En général souhaitables, les caractéristiques susmentionnées permettent, quand elles ne sont pas erronées, de construire aisément les marges et les zones de fiabilité pour les valeurs estimées des paramètres. Cet ajustement paramétrique permet de modifier des modèles vraiment non-linéaires en modèles quasi-linéaires. Ratkowsky examine diverses méthodes permettant de déterminer à quel point les modèles sont quasi-linéaires [1,4].

1.4 Validité de l'ajustement

La répartition de la probabilité de χ^2 peut être utilisée pour estimer la validité de l'adaptation d'un modèle. Q tout spécialement, c'est-à-dire la probabilité calculée que χ^2 dépasse aléatoirement une valeur donnée, permet de quantifier la validité de l'ajustement. Quand Q est très petit, les incohérences patentées ne peuvent plus être considérées comme des fluctuations aléatoires; il s'agit bien au contraire d'indices révélant soit que le modèle est faux, soit que les erreurs de mesure sont plus grandes que prévu ou qu'elles ne sont pas réparties normalement [5]. En général, on s'attendrait, dans le cas d'une adaptation raisonnable, à ce que $\chi^2 \approx v$, ou v , le nombre de degrés de liberté, équivaut à N-M. N est le nombre de points de mesures et M, le nombre de paramètres du modèle. Il faut souligner ici que l'application de la variable statistique χ^2 nécessite la prise en compte de l'écart standard des points indépendamment de toute expérience et de tout calcul, ie. la régression doit être pondérée.

1.5 Résumons

Les valeurs estimées pour les paramètres de modèles linéaires sont simples à calculer, car la méthode des moindres carrés permet de trouver des solutions analytiques. Si le facteur d'erreur aléatoire est normalement réparti, ces valeurs estimées le sont aussi et les marges de fiabilité peuvent être aisément déterminées. Les valeurs estimées LS deviennent des valeurs ML et, partant, les meilleurs estimations pratiquement disponibles.

Malheureusement, la plupart des modèles utilisés par les scientifiques sont non-linéaires et le calcul des valeurs estimées implique le recours à des méthodes numériques. En général, les valeurs LS n'équivalent plus aux valeurs ML; cette identité n'est vraie que dans le

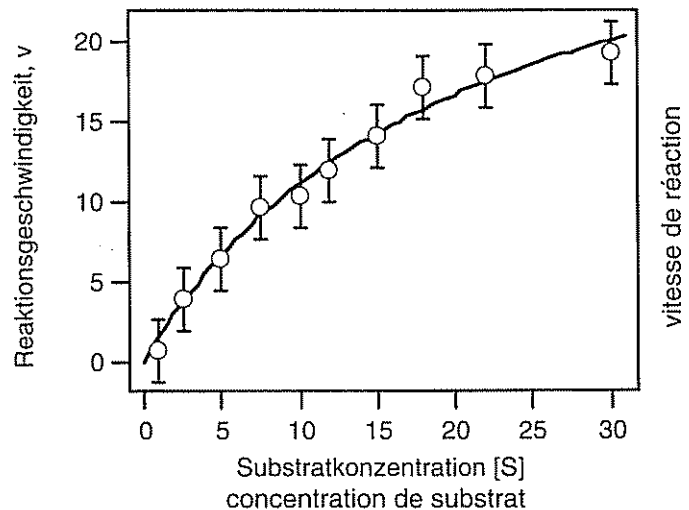


Fig.1
Modèle de Michaelis-Menten.
Les points ont été simulés selon l'équation (5) grâce à un générateur aléatoire avec $K_M = 15$, $V_{max} = 30$ et un écart standard de $s = 1.0$. Les marges d'erreur représentées équivalent aux marges de fiabilité à 95%.

cas des modèles quasi-linéaires. Pour cette raison, il est capital d'adapter les paramètres des modèles vraiment non-linéaires pour en améliorer les propriétés statistiques.

On essaie souvent de linéariser des modèles non-linéaires, toutefois sans tenir compte de l'élément déterministe du modèle et en négligeant toute pondération. Vu que la transformation mathématique annihile les propriétés statistiques souhaitables des valeurs estimées, même quand une pondération intervient, on préférera décrire des données non-linéaires directement avec un modèle non-linéaire. Nous espérons que les exemples concrets suivants plaideront de manière convaincante pour que l'on recoure toujours plus au modèle non-linéaire, surtout dans les cas où la représentation graphique met en évidence des rapports non-linéaires. A l'ère de l'ordinateur, les programmes statistiques permettant de calculer plus ou moins sans problèmes les paramètres non-linéaires sont devenus chose courante; par conséquent, la peur sous-jacente des calculs compliqués n'a plus de raison d'être.

2. LE MODÈLE DE MICHAELIS-MENTEN (ISOTHERME DE LANGMUIR**)

Le modèle de Michaelis-Menten décrit la vitesse d'une réaction enzymati-

Michaelis - Menten Modell.

Die Datenpunkte wurden gemäss Gleichung (5) mit einem Zufallsgenerator simuliert mit $K_M = 15$, $V_{max} = 30$ und einer Standardabweichung von $s = 1.0$. Die eingezeichneten Fehlerschranken stellen das 95%-Konfidenzintervall dar.

que par rapport à la concentration du substrat en présence d'une quantité constante d'enzymes (fig. 1).

$$v = \frac{V_{max} [S]}{K_M + [S]} \quad (6)$$

[S] représente la concentration du substrat; v , la vitesse de réaction; K_M , la constante de Michaelis et V_{max} , la vitesse maximale de réaction. Une linéarisation courante de l'élément déterministe du modèle consiste à représenter les valeurs mesurées sous forme réciproque double (7).

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{V_{max}} + \frac{K_M}{V_{max}} \frac{1}{[S]} \quad (7)$$

Il s'agit de la notation dite de Lineweaver-Burk.

Le lecteur se rendra aisément compte des difficultés surgissant quand un facteur d'erreur aléatoire additif est pris en compte lors de la linéarisation. Si on admet raisonnablement que les erreurs de mesure des données originales sont réparties normalement, cette forme de représentation ne suffit pas pour une analyse régressive, car les erreurs ne sont plus réparties régulièrement une fois la transformation effectuée, comme

* Le modèle (5) correspond à l'isotherme d'absorption de Langmuir [6]; par conséquent, la discussion qui suit vaut également pour ce modèle-là.

Fig. 2

Linéarisation de l'équation (6) et représentation sous forme réciproque double (dite de Lineweaver-Burk, 7). Les marges d'erreur représentées indiquent la marge de fiabilité à 95%. La transformation provoque une répartition en biais des points, comme le montre la comparaison entre les marges d'erreur supérieures et inférieures. Une régression linéaire normale pondère trop les points à grande marge d'erreur, raison pour laquelle l'intersection de la droite de régression avec l'ordonnée est négative, situation donnant lieu par calcul à des estimations négatives pour V_{max} . Une pondération ultérieure améliorerait les valeurs estimées des paramètres, mais comme les points sont répartis en biais, les valeurs estimées LS ainsi obtenues ne correspondent pas aux valeurs estimées ML.

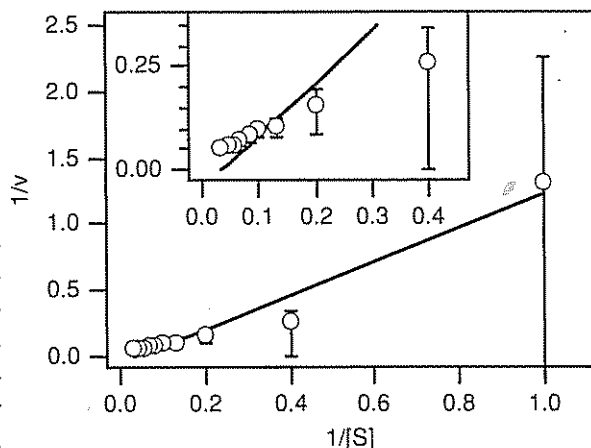


Fig. 2.

Linearisierung der Gleichung (6) und Darstellung in der doppelt reziproken Form (Lineweaver-Burk-Darstellung, 7). Die ein-gezeichneten Fehlerschranken stellen das 95%-Konfidenzintervall dar. Die Transformation bewirkt eine schiefe Verteilung der Datenpunkte. Dies ist ersichtlich aus den Unterschieden zwischen der oberen und der unteren Fehlerschranke. Eine normale lineare Regression gewichtet die Datenpunkte mit den grossen Fehlerschranken viel zu stark,

darum weist die Regressionsgerade einen negativen Achsenabschnitt auf, d.h. berechnete Schätzwerte für V_{max} werden negativ. Eine allfällige Gewichtung würde die Parameterschätzwerte verbessern, aber da die Datenpunkte schief verteilt sind, werden die so erhaltenen LS-Schätzwerte keine ML-Schätzwerte sein.

umfang annähernd erwartungstreu und normalverteilt sind und minimale Varianz besitzen, d. h. die LS-Schätzwerte werden annähernd zu ML-Schätzwerten. Solche Modelle werden "close-to-linear" genannt [4]. Diese Eigenschaften sind allgemein wünschenswert, da, falls sie zutreffen, auf einfache Art und Weise Konfidenzintervalle und Konfidenzregionen für die Schätzwerte der Parameter konstruiert werden können. Durch Reparameterisierung können Modelle, welche "far-from-linear" sind, "close-to-linear" werden. Ratkowsky diskutiert verschiedene Methoden um zu überprüfen inwieweit Modelle "close-to-linear" sind [1,4].

1.4 Güte der Anpassung

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung von χ^2 kann verwendet werden, um die Güte der Anpassung eines Modells abzuschätzen. Speziell, Q , die berechnete Wahrscheinlichkeit, dass χ^2 einen bestimmten Wert zufällig überschreitet, ergibt ein quantitatives Mass für die Güte der Anpassung. Falls Q sehr klein ist, können ersichtliche Unstimmigkeiten nicht mehr als zufällige Fluktuationen angesehen werden, sondern sind Hinweise, dass entweder das Modell falsch ist, die Messfehler grösser als angenommen oder die Messfehler nicht normalverteilt sind [5]. Im Allgemeinen würde man für eine vernünftige Anpassung erwarten, dass $\chi^2 \approx \nu$, wobei ν , die Anzahl der Freiheitsgrade, gleich $N-M$ zu setzen ist. N ist die Anzahl der Daten-

punkte und M die Anzahl der Parameter des Modells. Es ist darauf hinzuweisen, dass eine Anwendung der χ^2 -Statistik eine Berücksichtigung der experimentell oder rechnerisch unabhängig ermittelten Standardabweichung der Datenpunkte verlangt, d.h. die Regression muss gewichtet werden.

1.5 Das Wichtigste in Kürze!

Die Schätzwerte für die Parameter linearer Modelle sind einfach zu berechnen (die Methode der kleinsten Quadrate liefert analytische Lösungen) und falls der stochastische Fehlerterm normalverteilt ist, sind die Schätzwerte für die Parameter auch normalverteilt und Konfidenzintervalle können auf einfache Art und Weise bestimmt werden. Das heisst die LS-Schätzwerte sind ML-Schätzwerte und somit die besten in der Praxis zur Verfügung stehenden Schätzwerte.

Leider sind viele Modelle, die in der Wissenschaft Verwendung finden, nicht-linear und zur Berechnung der Schätzwerte für die Parameter werden numerische Methoden gebraucht. Die LS-Schätzwerte sind im allgemeinen nicht mehr ML-Schätzwerte; das trifft nur noch für "close-to-linear" Modelle zu. Darum ist es wichtig "far-from-linear" Modelle durch Reparameterisierung in ihren statistischen Eigenschaften zu verbessern.

Vielfach wird versucht nichtlineare Modelle zu linearisieren, meistens nur unter Berücksichtigung des deterministi-

schen Teils des Modells und unter Auslassung einer Gewichtung. Da mit der mathematischen Transformation, auch wenn eine Gewichtung mit einbezogen wird, in den meisten Fällen die statistisch wünschenswerten Eigenschaften der Schätzwerte verloren gehen, ist es vorzuziehen nichtlineare Daten direkt mit einem nichtlinearen Modell zu beschreiben. Wir hoffen, dass uns anhand der folgenden konkreten Beispiele ein überzeugendes Plädoyer für die vermehrte Verwendung nichtlinearer Modelle, vor allem in den Fällen, in welchen graphische Darstellungen auf nichtlineare Zusammenhänge hinweisen, gelingt. Da im heutigen Computerzeitalter Statistikprogramme, welche eine mehr oder weniger problemlose Berechnung nichtlinearer Modellparameter ermöglichen, zur Verfügung stehen, sollte die Angst vor komplizierten Berechnungen kein Hinderungsgrund mehr sein in Bezug auf die Berücksichtigung nichtlinearer Modelle.

2. DAS MICHAELIS-MENTEN MODELL (LANGMUIR - ISOTHERME*)

Das Michaelis-Menten Modell (6) beschreibt die Geschwindigkeit einer enzymatischen Reaktion in Abhängigkeit der Substratkonzentration bei kon-

* Modell (5) entspricht der Langmuir-Adsorptions-Isotherme [6] und die nachfolgende Diskussion gilt dementsprechend auch für dieses Modell.

Fig. 3
Modèle de la racine carrée.
Les données [9,10] ont été
adaptées à l'équation 13. Les
valeurs estimées des para-
mètres et les grandeurs statis-
tiques y relatives sont re-
présentées dans la tab. 2.

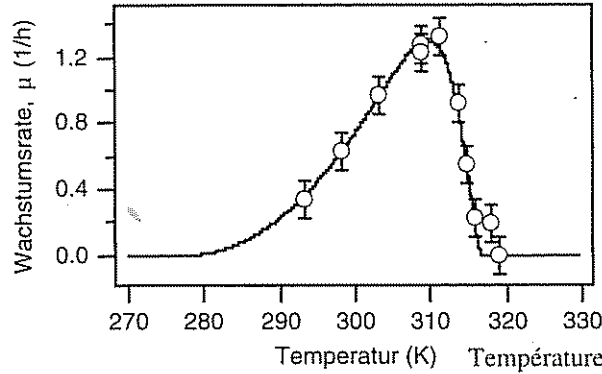


Fig. 3.
Quadratwurzel-Modell. Die
Daten [9,10] wurden an Glei-
chung 13 angepasst. Schätz-
werte der Modellparameter
und dazugehörige statisti-
schen Größen sind in Tab. 2
dargestellt.

le montre la fig. 2. Même une pondé-
ration adéquate des données, laquelle at-
tribuerait une variance propre à chaque
point, ne peut résoudre totalement le
problème.

Pour les raisons exposées ci-dessus, il
semble raisonnable de décrire les don-
nées non-linéaires directement avec le
modèle non-linéaire. Grâce à des simu-
lations, Ratkowsky [7] a montré que le
modèle (6) n'est pas quasi-linéaire; il a
donc proposé une adaptation des para-
mètres avec $\phi_1 = 1/V_{max}$ et $\phi_2 = K_M/V_{max}$.
Le modèle ainsi transformé (8) s'exprime
comme suit:

$$v = \frac{[S]}{\phi_1 [S] + \phi_2} \quad (8)$$

Les valeurs estimées pour ϕ_1 et ϕ_2
peuvent être calculées si on recourt à un
programme statistique moderne. Les va-
leurs estimées initiales nécessaires pour
l'algorithme itératif ont été calculées
avec l'équation (9), une variante simple
de (8).

$$\frac{[S]}{v} = \phi_1 [S] + \phi_2 \quad (9)$$

Vu que le modèle (8) se comporte
quasi-linéairement, les éléments diag-
onaux de la matrice de covariance (tab. 1)
peuvent être assimilés aux variances
estimées des valeurs estimées des para-
mètres.

Pour les valeurs simulées et représen-
tées en fig. 1, une estimation avec une

Tab. 1

Matrice de covariance pour les valeurs
estimées LS ϕ_1 et ϕ_2 . Les éléments
diagonaux peuvent être interprétés
comme les variances (σ_1^2 et σ_2^2) de ϕ_1
et ϕ_2 , et les éléments {1,2} et {2,1}
comme la covariance (σ_{12}^2).

marge de fiabilité à 95% donne les valeurs suivantes: $\phi_1 = 0.029827 \pm 0.00839$ et $\phi_2 = 0.60469 \pm 0.14841$.

Les estimations pour les grandeurs intéressantes K_M et V_{max} peuvent être aisément
calculées grâce aux équations de reparamétrisation. Les marges de fiabilité y
relatives peuvent être estimées de diverses manières.

Soit on calcule les marges de fiabilité par la méthode des marges de valeurs; dans
le cas de V_{max} , le calcul s'effectue aisément. Il suffit d'opérer le calcul sur les limites
d'erreur supérieure et inférieure. Les résultats obtenus pour une valeur estimée et une
marge de fiabilité à 95% sont $46.7 \geq 33.5 \geq 26.2$. Dans le cas de K_M , la marge de
fiabilité ne peut plus être estimée aussi simplement, car le problème statistique de
la répartition d'un quotient de deux grandeurs réparties normalement, ne peut pas
être résolu.

Soit on applique la loi du maintien de l'erreur; le calcul des valeurs approximatives
pour les variances de K_M et V_{max} s'effectue comme suit:

$$\sigma_{V_{max}}^2 = V_{max}^2 \frac{\sigma_1^2}{\phi_1^2} \quad (10)$$

$$\sigma_{K_M}^2 = K_M^2 \left[\frac{\sigma_1^2}{\phi_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{\phi_2^2} - 2 \frac{\sigma_{12}^2}{\phi_1 \phi_2} \right] \quad (11)$$

Le calcul des valeurs estimées et des marges de fiabilité donne les résultats
suivants: $K_M = 20.3 \pm 10.4$, und $V_{max} = 33.5 \pm 9.5$.

Comme on le voit, les marges diffèrent selon la méthode. La raison en est que la
loi du maintien de l'erreur représente l'erreur du résultat comme forme linéaire dans
les erreurs des valeurs prises en considération. Cela ne vaut pas de manière exacte
pour la dépendance non-linéaire présente entre ϕ_1 , ϕ_2 et K_M , V_{max} . En effet, plus
l'erreur relative pour ϕ_1 et ϕ_2 est petite, plus la deuxième méthode livre de meilleures
approximations.

Les valeurs pour χ^2 et Q (4.09 et 0.85) confirment que le modèle (8) décrit de
manière satisfaisante les données. La fig. 2 montre que la version linéarisée du
modèle (7) ne livre aucune description adéquate des données. En effet, l'intersection
de la droite de regression avec l'ordonnée est négative, situation donnant lieu par
calcul à des estimations négatives pour V_{max} . Or un tel résultat n'est pas compatible
avec la théorie.

3. LE MODÈLE DE LA RACINE CARRÉE

Il s'agit d'un modèle non-linéaire décrivant la relation entre température et
croissance microbienne [8].

$$\sqrt{\mu_m} = b (T - T_{min}) (1 - \exp[c (T - T_{max})]) \quad (12)$$

| | | |
|----------|-----------------------|--------------|
| | ϕ_1 | ϕ_2 |
| ϕ_1 | $1.325 \cdot 10^{-5}$ | -0.000211308 |
| ϕ_2 | -0.000211308 | 0.0041416 |

Tab. 1

Covarianzmatrix für die LS-Schätz-
werte ϕ_1 und ϕ_2 . Die Diagonalelemente
können als die Varianzen (σ_1^2 und σ_2^2)
von ϕ_1 und ϕ_2 , die Elemente {1,2} und
{2,1} als die Kovarianz (σ_{12}^2) interpre-
tiert werden.

stanter Enzymmenge (Fig. 1).

$$v = \frac{V_{\max} [S]}{K_M + [S]} \quad (6)$$

[S] ist die Substratkonzentration, v ist die Reaktionsgeschwindigkeit, K_M ist die Michaelis-Konstante und V_{\max} ist die maximale Reaktionsgeschwindigkeit. Eine gängige Linearisierung des deterministischen Teils des Modells ist die Darstellung der Messergebnisse in der doppelt reziproken Form (7).

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{V_{\max}} + \frac{K_M}{V_{\max}} \frac{1}{[S]} \quad (7)$$

der sogenannten Lineweaver-Burk-Darstellung.

Die Schwierigkeiten, die entstehen, falls bei der Linearisierung ein additiver stochastischer Fehlerterm mitberücksichtigt wird, kann der Leser gut nachvollziehen. Unter der vernünftigen Annahme, dass die Messfehler der Originaldaten normalverteilt sind, ist diese Darstellungsform unzulänglich für eine Regressionsanalyse, da, wie aus Fig. 2 abgelesen werden kann, die Messfehler nach erfolgter Transformation nicht mehr normalverteilt sind. Selbst eine entsprechende Gewichtung der Daten, welche jedem Datenpunkt eine eigene Varianz erlauben würde, kann dieses Problem nicht vollumfänglich beheben.

In Erwägung der obigen Gründe scheint es vernünftig zu sein, die nichtlinearen Daten direkt mit dem nichtlinearen Modell zu beschreiben. Ratkowsky [7] hat mittels Simulationen gezeigt, dass das Modell (6) nicht "close-to-linear" ist und hat eine Reparametersierung mit $\phi_1 = 1/V_{\max}$ und $\phi_2 = K_M/V_{\max}$ vorgeschlagen. Das umgeformte Modell (8) sieht folgendermassen aus:

$$v = \frac{[S]}{\phi_1 [S] + \phi_2} \quad (8)$$

Schätzwerte für ϕ_1 und ϕ_2 können unter Verwendung eines modernen Statistikprogramms berechnet werden. Anfangsschätzwerte ($\phi_1 = 0.020$, $\phi_2 = 0.787$), welche für den iterative Algorithmus benötigt werden, wurden aus der Darstellung (9), einer einfachen Umformung von (8), berechnet.

$$\frac{[S]}{v} = \phi_1 [S] + \phi_2 \quad (9)$$

Da sich das Modell (8) "close-to-linear" verhält, können die Diagonalelemente der Kovarianzmatrix (Tab. 1) als die geschätzten Varianzen der

Parameterschätzwerte aufgefasst werden.

Für die in Fig. 1 dargestellten, simulierten Daten erhält man als Parameterschätzwerte mit den dazugehörigen 95%-Konfidenzintervallen folgende Werte: $\phi_1 = 0.029827 \pm 0.00839$ und $\phi_2 = 0.60469 \pm 0.14841$.

Schätzwerte für die interessierenden Grössen K_M und V_{\max} können gemäss der Reparametersierungsgleichungen auf einfache Weise berechnet werden. Die dazugehörigen Konfidenzintervalle lassen sich auf verschiedene Arten abschätzen:

Einerseits kann ein Konfidenzintervall mittels der Methode der Wertschranken angegeben werden und im Falle von V_{\max} kann die Rechnung ausgeführt werden. Dies erfordert nur, dass die Rechnung für die obere und die untere Fehlerschranke durchgeführt wird. Als Resultat erhält man für den Schätzwert und das 95%-Konfidenzintervall $46.7 \geq 33.5 \geq 26.2$. Im Falle von K_M lässt sich das 95%-Konfidenzintervall mit dieser Methode nicht mehr auf einfache Art und Weise abschätzen, da das statistische Problem der Berechnung des Konfidenzintervalls eines Quotienten zweier normalverteilter Grössen nicht befriedigend gelöst ist.

Andererseits lassen sich approximative Schätzwerte für die Varianzen für K_M und V_{\max} gemäss des Fehlerfortpflanzungsgesetzes auf folgende Art und Weise berechnen:

$$\sigma_{V_{\max}}^2 = V_{\max}^2 \frac{\sigma_1^2}{\phi_1^2} \quad (10)$$

$$\sigma_{K_M}^2 = K_M^2 \left[\frac{\sigma_1^2}{\phi_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{\phi_2^2} - 2 \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\phi_1 \phi_2} \right] \quad (11)$$

Als Resultat dieser Rechnung erhält man für die Schätzwerte und die approximativen 95%-Konfidenzintervalle folgenden Werte: $K_M = 20.3 \pm 10.4$, und $V_{\max} = 33.5 \pm 9.5$.

Wie man sieht, unterscheiden sich die durch verschiedenen Methoden berechneten Intervalle. Der Grund liegt darin, dass das Fehlerfortpflanzungsgesetz den Fehler des Resultats als Linearform in den Fehlern der vermittelnden Werte darstellt. Dies gilt aber nicht exakt für die vorliegenden nichtlinearen Abhängigkeiten zwischen ϕ_1 , ϕ_2 und K_M, V_{\max} . Je kleiner die relativen Fehler für ϕ_1 und ϕ_2 werden, desto bessere Approximationen können mit der zweiten Methode berechnet werden.

Die Werte für χ^2 und Q (4.09 bzw. 0.85) bestätigen, dass das Modell (8) die Daten auf befriedigende Art und Weise beschreibt. Aus Fig. 2 kann entnommen werden, dass die linearisierte Version des Modells (7) keine angemessene Beschreibung der Daten liefert. Der Achsenabschnitt ist negativ, d.h. Schätzwerte für V_{\max} sind ebenfalls negativ. Dies aber ist mit der Theorie nicht vereinbar.

3. DAS QUADRATWURZEL MODELL

Das Quadratwurzel-Modell (12) ist ein nichtlineares Modell, welches die Temperaturabhängigkeit mikrobiellen Wachstums beschreibt [8].

$$\sqrt{\mu_m} = b (T - T_{\min}) (1 - \exp[c (T - T_{\max})]) \quad (12)$$

μ_m ist die maximale Wachstumsrate, T_{\min} und T_{\max} sind die theoretischen minimal bzw. maximal Temperaturen für das Wachstum. Um Problemen mit der Fehlerfortpflanzung der Originaldaten zu begegnen, wurde vorgeschlagen [9], μ_m als unabhängige Variable anzusehen. Dies ergibt das folgende Modell:

$$\mu_m = b^2 (T - T_{\min})^2 (1 - \exp[c (T - T_{\max})])^2 \quad (13)$$

Dazu gelten folgenden Nebenbedingungen i) falls $T < T_{\min}$, dann $\mu_m = 0$; ii) falls $T > T_{\max}$, dann $\mu_m = 0$. Gleichung 13 und die Nebenbedingungen definieren eine differenzierbare Funktion. Mittels einer Simulationsstudie konnte gezeigt werden, dass sich das verbesserte Modell (13) "close-to-linear" verhält [9]. Tab. 2 zeigt die Ergebnisse eines Vergleichs des verbesserten Modells (13) mit dem ursprünglichen Modell (12). Die Werte für χ^2 und Q , welche aus einer gewichteten Angleichung erhalten wurden, lassen schliessen, dass für auf Glukose gewachsene *Klebsiella pneumoniae* NCIB 418 die ersichtlichen Abweichungen zwischen den Datenpunkten und dem Modell im Falle des verbesserten Modells (13) als zufällige

Fig. 4

Le modèle de Marcus.

Les constantes de vitesse pour l'oxydation au peroxyde de chlore de phenoxydations substitués [15] ont été adaptées à l'équation marcusienne au moyen d'une régression non-linéaire [14].

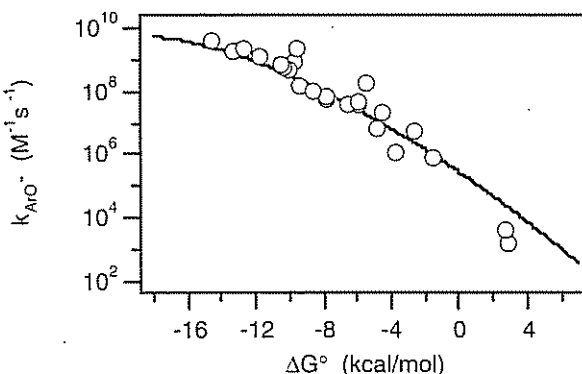


Fig. 4.

Marcus-Modell. Geschwindigkeitskonstanten für die Oxidation von substituierten Phenoxydationen mit Chlordioxid [15] wurden mittels nichtlinearer Regression an die Marcus-Gleichung (14) angeglichen [14].

μ_m représente le taux de croissance maximal, T_{\min} et T_{\max} sont respectivement les températures théoriquement minimale et maximale pour la croissance. Afin d'éliminer les problèmes résultant du maintien de l'erreur des données originales, on a proposé [9] de considérer μ_m comme variable indépendante. Le modèle se présente comme suit:

$$\mu_m = b^2 (T - T_{\min})^2 (1 - \exp[c(T - T_{\max})])^2 \quad (13)$$

A cela s'ajoutent certaines conditions y relatives:

i) si $T < T_{\min}$, alors $\mu_m = 0$

ii) si $T > T_{\max}$, alors $\mu_m = 0$.

L'équation 13 et les conditions susmentionnées définissent une fonction différenciée. Une étude de simulation a montré que le modèle amélioré (13) se comporte quasi-linéairement [9]. Le modèle amélioré (13) et le modèle initial (12) sont comparés dans la tab. 2. Les valeurs pour χ^2 et Q , résultant d'une adaptation pondérée, permettent de conclure que, dans l'exemple des *klebsiella pneumoniae* NCIB 418 cultivées en milieu glucosique, les écarts entre les points de mesures et le modèle peuvent être considérés comme fluctuations aléatoires dans le cas du modèle amélioré (13), mais non dans le cas du modèle initial (12). Il en découle que le modèle amélioré est nettement meilleur pour cette série statistique.

L'analyse régressive non-linéaire permet donc de déterminer l'adéquation de modèles concurrents.

4. LE MODÈLE DE MARCUS

La théorie de Marcus décrit la cinétique du transfert monoélectronique extra-atmosphérique [11]. Le modèle s'exprime comme suit (14):

$$k = \frac{k_d}{1 + \frac{k_d}{K_d Z} \exp \left[\frac{W + \frac{\lambda}{4} \left(1 + \frac{\Delta G^\circ}{\lambda} \right)^2}{RT} \right]} \quad (14)$$

Il représente une relation dérivée théoriquement entre la constante de vitesse pour le transfert des électrons, k , et l'enthalpie réactionnelle standard libre ΔG° . L'énergie de réorganisation, λ , est le seul paramètre à être ajusté au moyen de la régression. Tous les autres termes de l'équation 14 sont soit des constantes, soit des valeurs raisonnables.

Dans la représentation conventionnelle $\log k$ vs. ΔG° (fig. 4), le modèle marcusien décrit une courbe de type parabolique, ouverte vers le bas et légèrement aplatie vers son sommet. La forme complète de la courbe n'apparaît que quand les valeurs pour k et ΔG° couvrent un large échantillon. Or la plupart des séries de données expérimentales contiennent des valeurs sur un si petit échantillon qu'il convient d'assimiler les valeurs à une droite au demeurant tangente à la courbe marcusienne. Ce procédé est à la base des corrélations linéaires utilisées pour décrire la cinétique de certaines réactions redox dans des systèmes environnementaux modélisés [12, 13].

Si toutefois les données disponibles embrassent un large segment, le modèle général s'impose. L'équation 14 est non-linéaire et peut, comme décrit ci-dessus, être adaptée grâce à un algorithme itératif. Cette méthode a été appliquée dans le cas

de phenoxydations substitués, oxydés au peroxyde de chlore [14]. La fig. 4 montre les données et la courbe de régression avec $\lambda = 30,1$ kcal/mol.

Si l'on tient compte de ce que les valeurs pour k représentent sept ordres de grandeur, la concordance entre les données et le modèle peut être de visu considéré comme bonne. La valeur estimée pour λ correspond également aux valeurs provenant de sources indépendantes. Une courbe légèrement plus raide, décrivant encore mieux les données, s'obtient par le biais d'une version plus complexe du modèle marcusien [14].

Cet exemple illustre bien les difficultés résultant d'analyses statistiques appliquées post hoc à des séries statistiques réelles. Autant de constantes de vitesse, autant d'expériences. Dans de nombreux cas, on manque de valeurs estimées concernant l'incertitude de ces mesures; une telle estimation doit se baser sur plusieurs répétitions indépendantes, ce qui nécessite toutefois un travail expérimental considérable. Voilà pourquoi, dans le cas du modèle marcusien, aucune régression non-linéaire pondérée n'a été réalisée sur la base de l'équation 14, ce qui empêche également toute analyse statistique (test de χ^2 , comme décrit au chapitre 1.3). Il ne serait non plus pas utile d'attribuer une marge de fiabilité à la valeur estimée λ . Malgré tout, quand l'équation 14 est quasi-linéaire, la valeur obtenue pour λ correspond à l'espérance mathématique et peut être considérée comme la meilleure estimation disponible dans les circonstances définies.

5. CONCLUSIONS

Les estimations obtenues par le procédé LS pour les paramètres de modèles non-linéaires sont des estimations ML quand le modèle se comporte quasi-linéairement. La validité de l'ajustement et les marges de fiabilité peuvent être

Fluktuationen angesehen werden dürfen, nicht aber im Falle des ursprünglichen Modells (12). Daraus muss geschlossen werden, dass das verbesserte Modell in Bezug auf diesen Datensatz wirklich das bessere Modell ist.

Es zeigt sich somit, dass mittels einer nichtlinearen Regressionsanalyse Aussagen über die Qualitäten konkurrierender Modelle gemacht werden können [10].

4. DAS MARCUS MODELL

Die Marcus-Theorie beschreibt die Kinetik aussersphärischer Eielektronentransfers [11]. Das Modell (14) ist

$$k = \frac{k_d}{1 + \frac{k_d}{K_d Z} \exp \left[\frac{W + \frac{\lambda}{4} \left(1 + \frac{\Delta G^\circ}{\lambda} \right)^2}{RT} \right]} \quad (14)$$

eine theoretisch abgeleitete Beziehung zwischen der Geschwindigkeitskonstante für Elektronentransfers, k , und der freien Standardreaktionsenthalpie ΔG° . Die Reorganisationsenergie, λ ist der einzige Parameter, welcher durch die Regression angeglichen wird. Alle anderen Terme der Gleichung 14 werden auf vernünftige Werte festgelegt oder sind Konstanten.

In der konventionellen $\log k$ vs. ΔG° Darstellung (Fig. 4) beschreibt das Marcus-Modell eine nach unten geöffnete Parabel-ähnliche Kurve, welche oben leicht abgeflacht ist. Die vollständige Form der Kurve kann aber nur wahrgenommen werden, falls die Werte für k und ΔG° einen grossen Bereich umspannen. Die meisten experimentellen Datensätze beinhalten Werte über solch einen kleinen Bereich, dass es angemessen ist die Werte mittels einer Geraden, welche eigentlich einer Tangente an die Marcus Kurve entspricht, anzugleichen. Dieses Verfahren bildet die Grundlage der linearen Korrelationen, welche gebraucht wurden um die Kinetik einiger Redoxreaktionen in Umweltmodellssystemen zu beschreiben [12,13].

Falls die verfügbaren Daten jedoch einen grossen Wertebereich umfassen,

ist es nötig das allgemeine Modell zu gebrauchen. Gleichung 14 ist nichtlinear und kann, gemäss den Ausführungen weiter oben, durch einen iterativen Algorithmus angeglichen werden. Dies wurde durchgeführt für die Oxidation substituierter Phenoxidanionen durch Chlordioxid [14]. Fig. 4 zeigt die Daten und die Regressionskurve mit $\lambda = 30.1$ kcal/mol.

Wenn man berücksichtigt, dass die Werte für k sieben Grössenordnungen umfassen, ist die Übereinstimmung zwischen den Daten und dem Modell aufgrund optischer Inspektion als gut anzusehen. Der Schätzwert für λ ist in guter Übereinstimmung mit Werten aus unabhängigen Quellen. Eine leicht steilere Kurve, welche die Daten noch besser beschreibt, kann mit einer komplexeren Version des Marcus-Modells erhalten werden [14].

Dieses Beispiel illustriert auch die Schwierigkeiten, die entstehen können, falls man statistische Analysen an realen Datensätzen *post hoc* durchführt. Viele einzelne Experimente sind nötig um jeweils eine Geschwindigkeitskonstante zu erhalten. In vielen Fällen sind keine Schätzwerte für die Unsicherheit dieser Werte – basierend auf mehreren unabhängigen Wiederholun-

gen – vorhanden, da der experimentelle Aufwand dafür sehr gross ist. Im Falle des Marcus Modells konnte deshalb keine gewichtete nichtlineare Regression in Bezug auf Gleichung 14 durchgeführt werden. Aus diesem Grund kann auch keine statistische Analyse (χ^2 -Test, wie beschrieben in Abschnitt 1.3) durchgeführt werden und es wäre nicht sinnvoll ein Konfidenzintervall für den Schätzwert λ anzugeben. Trotzdem ist der erhaltene Wert für λ falls die Modellgleichung (14) "close-to-linear" ist, erwartungstreu und kann unter den gegebenen Umständen als der bestmögliche Schätzwert aufgefasst werden.

5. FOLGERUNGEN

Die durch LS-Verfahren gewonnenen Schätzwerte für die Parameter nichtlinearer Modelle sind, falls sich das Modell "close-to-linear" verhält, ML-Schätzwerte. Aussagen über die Güte der Anpassung können gemacht werden und Konfidenzintervalle können berechnet werden, falls Informationen über die stochastischen Fehlerterme der Daten vorhanden sind (theoretischer oder experimenteller Natur).

Falls möglich, ist eine Beschreibung nichtlinearer Daten mit einem nichtlinearen Modell einer Beschreibung transformierter Daten mit einer linearisierten Version desselben Modells vorzuziehen (siehe z.B. Michaelis-Menten Modell, Abschnitt 2).

Alle Regressionsparameter und alle statistischen Analysen in den obigen Beispielen wurden berechnet mit IGOR, einem Datenanalyseprogramm von WaveMetrics (Lake Oswego, OR, USA) für den Macintosh Computer. Es gibt aber viele geeignete Programme, auch für andere Computer. □

Tab. 2

Paramètres avec l'écart standard estimé, la température optimale, les valeurs pour χ^2 et ν (nombre de degrés de liberté) pour les versions initiale (12) et améliorée (13) du modèle de la racine carrée. Les données (fig. 3) sont celle d'une culture de *Klebsiella pneumoniae* NCIB 418 en milieu glucosique [9,10].

Modellparameter mit der geschätzten Standardabweichung s , Temperaturoptimum (T_{opt}), Werte für χ^2 und ν (Anzahl Freiheitsgrade) für das ursprüngliche (12) und das verbesserte (13) Quadratwurzelmodell. Daten (Fig. 3) stammen von auf Glukose gewachsenen *Klebsiella pneumoniae* NCIB 418 [9,10].

| | b K ⁻¹ t ^{-0.5} | c K ⁻¹ | T_{min} K | T_{max} K | T_{opt} K | χ^2 | ν | Q |
|---|--|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------|-------|---------------------|
| Ursprüngliches Modell (12) <i>Modèle initial</i> | s 0.0560 0.0074 | 0.1550 0.0269 | 283.48 1.78 | 318.88 0.28 | 308.6 | 32.65 | 6 | $1.2 \cdot 10^{-5}$ |
| Verbessertes Modell (13) <i>Modèle amélioré</i> | s 0.039 0.0038 | 0.3513 0.0534 | 278.08 2.25 | 317.05 0.23 | 310.0 | 15.82 | 7 | 0.027 |

calculées quand les facteurs d'erreur aléatoires sont connus, qu'ils soient de nature théorique ou expérimentale.

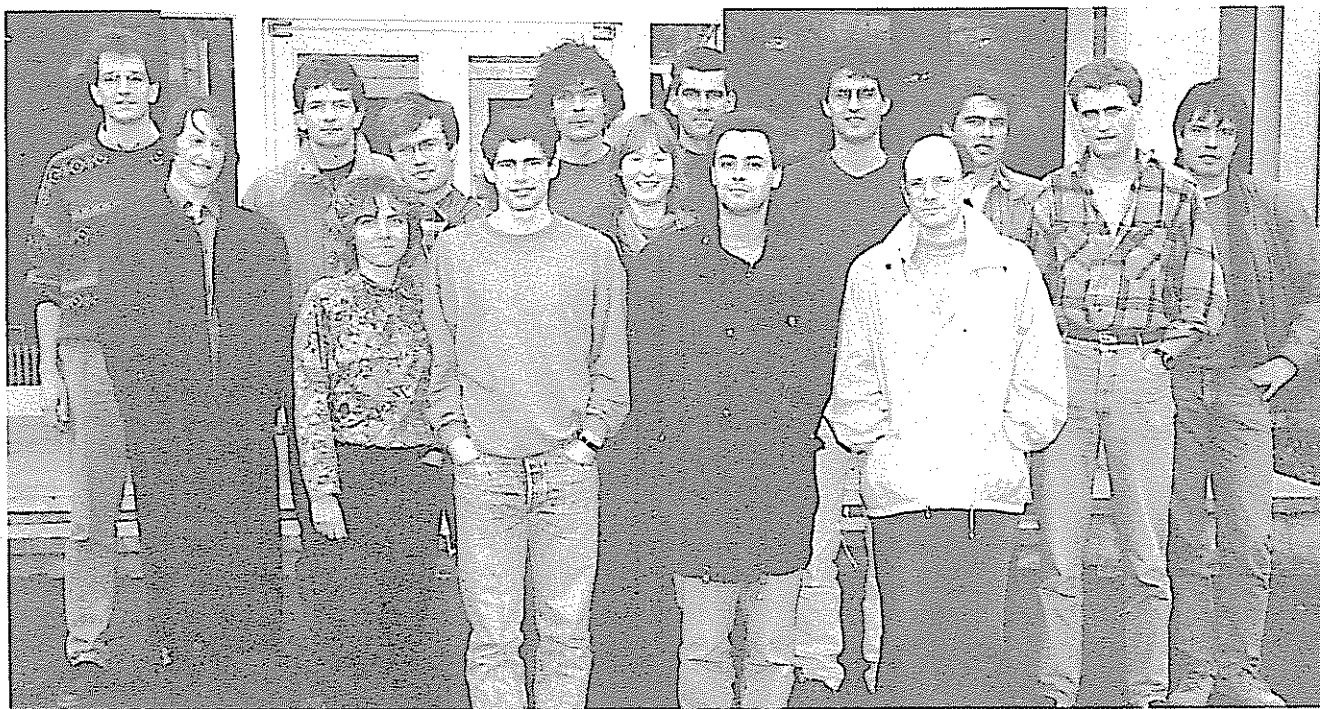
Autant que faire se peut, il faut décrire des données non-linéaires de préférence avec un modèle non-linéaire au lieu de vouloir décrire des données transformées avec une version linéarisée du même modèle (cf. par exemple le modèle de Michaelis-Menten, chapitre 2).

Tous les paramètres de régression et toutes les analyses statistiques présentées ci-dessus ont été calculées avec le programme d'analyse IGOR, de WaveMetrics (Lake Oswego, OR, USA) sur ordinateur Macintosh. Mais il existe bien d'autres programmes appropriés et compatibles avec d'autres ordinateurs.

- [1] Ratkowsky, D.A., (1983): Non-linear Regression Modeling, Marcel Dekker, Inc., Basel, p. 3.
- [2] Draper, N.R., Smith, H., (1981): Applied Regression Analysis, John Wiley & Sons, New York, p. 224.
- [3] Robinson, J.A., Characklis, W.G., (1984) Simultaneous estimation of V_{max} , K_M , and the rate of endogenous substrate production (R) from substrate depletion data. *Microb. Ecol.* 10: 165-178.
- [4] Ratkowsky, D.A., (1990): Handbook of nonlinear regression models, Marcel Dekker, Inc., Basel, p.20.
- [5] Press, W.A., Flannery, B.P., Teuklosky, S.A., Vetterling, W.T., (1984): Numerical Recipes, the art of scientific computing, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 498-546.
- [6] Stumm, W., Morgan, J.J., (1981): Aquatic Chemistry, John Wiley & Sons, New York, p. 608.
- [7] Ratkowsky, D.A., (1986): A suitable parameterization of the Michaelis-Menten enzyme reaction, *Biochem. J.* 240: 357-360.
- [8] Ratkowsky, D.A., Lowry, R.K., McMeekin, T.A., Stokes, A.N., Chandler, R.E., (1983): Model for bacterial culture growth rate throughout the entire biokinetic temperature range. *J. Bacteriol.*, 149: 1222-1226.
- [9] Kohler, H.-P.E., Heitzer, A., Hamer, G., (1991): Improved unstructured model describing temperature dependence of bacterial maximum specific growth rates, p. 511-514, in Verachert, H., Verstraete, W., (ed.) International Symposium on Environmental Biotechnology. Royal Flemish Society of Engineers, Ostend, Belgium.
- [10] Heitzer, A., Kohler, H.-P.E., Reichert, P., Hamer, G., (1991): Utility of phenomenological models for describing temperature dependence of bacterial growth. *Appl. Environ. Microbiol.*, 57: 2656-2665.
- [11] Ebersson, L., 1987, Electron Transfer Reactions in Organic Chemistry, Springer-Verlag, Berlin.
- [12] Schwarzenbach, R.P., Stierli, R., Lanz, K., Zeyer, J., 1990. Quinone and iron porphyrin mediated reduction of nitroaromatic compounds in homogenous solution. *Environ. Sci. Technol.*, 24: 1566-1574.
- [13] Tratnyek, P.G., Hoigné, J., Zeyer, J., Schwarzenbach, R., 1991, QSAR analyses of oxidation and reduction rates of environmental organic pollutants in model systems. *Sci. Total Environ.* 109/110, 337-341.
- [14] Tratnyek, P.G. Hoigné, J., submitted, Kinetics of reactions of chlorine dioxide (OCIO) in water. II. Quantitative structure-activity relationships for phenolic compounds. *Water Res.*
- [15] Hoigné, J., Bader, H., submitted, Kinetics of reaction of chlorine dioxide (OCIO) in water. I. Inorganic and organic compounds. *Water Research.*

**PARTICIPANT(E)S
AU 12^{ÈME} COURS DE 3^{ÈME} CYCLE
EN GÉNIE SANITAIRE ET PROTECTION DES EAUX**

**TEILNEHMER(INNEN) DES
12. NACHDIPLOMSTUDIUMS IN
SIEDLUNGSWASSERBAU UND GEWÄSSERSCHUTZ**



De gauche à droite/ Von links nach rechts:

Peter Merz, Karin Kovarova, Thomas Vitrar, Katja Knauer, André Lauber, Paul Rush, Martin Kühni, Susanne Danninger, Michael Kaspar, Artur Egger, Hans Balmer, Urs Schweizer, Alex Benz, Pius Neff, Andreas Hiltbold

"INTERNATIONAL WORKSHOP ON VARVED LAKE SEDIMENTS: INTER-COMPARISON OF HOLZMAAR, GOSCIAZ, AND SOPPENSEE"

Premier pas vers une collaboration internationale dans la recherche sur les varves.

Du 16 au 20 juin 1991, l'International Workshop on Varved Lake Sediments: Inter-comparison of Holzmaar, Gosciarz, and Soppensee s'est déroulé au laboratoire de recherche lacustre de l'EAWAG, à Kastanienbaum. Ce séminaire a été organisé par A.F. Lotter et M. Sturm (EAWAG) en collaboration avec ProClim. Venus d'Europe et d'Amérique, divers groupes de travail y ont participé (cf. photo). Les sédiments avec strates saisonnières, appelées varves, permettent une analyse chronologique très précise à l'échelle annuelle, voire même saisonnière, indépendante des méthodes de datation physiques (^{14}C , ^{210}Pb , ^{137}Cs). Ces dernières années, les varves ont joué un rôle toujours plus important dans la recherche des archives proxy. A l'heure actuelle, les chercheurs ne sont pas seulement préoccupés par les varves de formation récente, mais surtout par les problèmes de datation concernant la transition pleistocène - holocène, ie. à la fin de la dernière glaciation il y a environ 10'000 ans. Ces problèmes sont liés aux questions de dynamique environnementale et climatologique. Jusqu'à présent, on ne dispose que de quelques rares séquences sédimentaires reflétant de manière ininterrompue l'évolution saisonnière sur une longue période, et permettant d'établir une chronologie des varves. C'est le cas par exemple des maars de l'Eifel (D), du lac de Gosciarz en Pologne et du Soppensee (canton de Lucerne). Au moyen de cette chronologie des varves, on tente de prolonger la courbe de calibration au ^{14}C , par ailleurs étalonnée d'après les cernes d'arbres subfossilisés, à des périodes glaciaires caractérisées par l'absence de tout boisement. Durant la première partie du séminaire, les divers groupes invités ont dressé un bilan sur l'état actuel des recherches dans le domaine de la chronologie des varves. La seconde partie du séminaire s'est déroulée sous forme de séance et avait pour finalité une standardisation méthodologique facilitant la comparaison des résultats obtenus à partir des diverses chronologies de varves. De plus, les participants ont discuté des méthodes appliquées en laboratoire ou sur le terrain, et ont dressé une liste de recommandations sur la manière de mener les recherches dans ce domaine. On obtiendra une copie de ce document en s'adressant à A.F. Lotter.

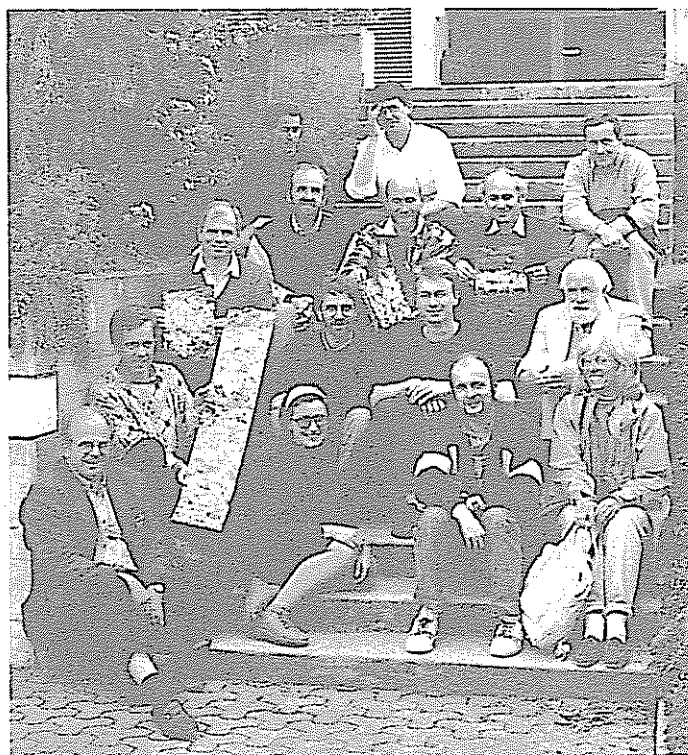
Ce séminaire a été un premier pas vers une collaboration internationale dans le domaine de la recherche sur les varves.

Erster Schritt zu einer internationalen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Varvenforschung

Vom 16.-20 Juni 1991 fand im Seenforschungslabor der EAWAG in Kastanienbaum der International Workshop on Varved Lake Sediments: Inter-comparison of Holzmaar, Gosciarz, and Soppensee statt. Dieser workshop wurde von A.F. Lotter und M. Sturm (EAWAG) in Zusammenarbeit mit ProClim organisiert. Verschiedene Arbeitsgruppen aus Europa und Amerika haben daran teilgenommen (siehe Foto). Sedimente mit jahreszeitlicher Schichtung, sogenannte Varven, erlauben eine extrem hohe zeitliche Auflösung (einzelne Jahre, resp. Jahreszeiten) und eine von physikalischen Datierungsmethoden (^{14}C , ^{210}Pb , ^{137}Cs) unabhängige Zeitkontrolle. Die Bedeutung von Varven bei der Untersuchung von Proxy-Archiven hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen. Im Vordergrund der heutigen Forschung stehen neben Untersuchungen zur rezenten Varvenbildung vor allem Datierungsfragen am Übergang Pleistozän-Holozän, also am Ende der letzten Eiszeit vor rund 10'000 Jahren, und die damit verbundenen Probleme der Klima- und Umweltdynamik. Bis heute sind nur wenige lange und kontinuierliche Sequenzen von solchen jahreszeitlich geschichteten Seeablagerungen (Varvenchronologien) bekannt, u.a. von den Maarseen der Eifel (D), dem See Gosciarz in Polen und dem Soppensee (Kt. LU). Anhand der Varvenchronologien dieser Seen wird versucht, die Radiokarbon-Kalibrationskurve, welche an subfossilen Baumringen geeicht wird, in Zeiträume zu verlängern, welche aufgrund des eiszeitlichen Klimas keine Bewaldung zuließen. Der erste Teil des workshops bestand aus Seminarvorträgen. Über den *state of the art* der Varvenforschung der einzelnen eingeladenen Arbeitsgruppen. Der zweite Teil bestand aus einer Klausurtagung, deren Ziel es war, Untersuchungsmethoden zu standardisieren, um die Vergleichbarkeit der Resultate der verschiedenen Varvenchronologien zu erleichtern. Ferner diskutierten die Teilnehmer Feld- und Laboruntersuchungsmethoden, und stellten Empfehlungen für die Durchführung von solchen Untersuchungen zusammen; Kopien davon sind auf Anfrage bei Dr. A.F. Lotter erhältlich.

Teilnehmer von unten links nach rechts/ Participants de gauche à droite, à partir d'en bas:

Dr. Josef Merkt, Dr. Bernd Zolitschka, Irena Hajdas, Dr. Tomasz Goslar, Prof. Brigitta Ammann, Prof. Matti Saarnisto, Dr. André Lotter, Gerry Lemcke, Prof. Herb Wright, Dr. Ingemar Renberg, Dr. Michael Sturm, Dr. Jürg Beer, Dr. Adam Walanus, Andrzej Fischer, Detlef Poth.



WaBoLu: BILAN ET PERSPECTIVES

MICHAEL OCHS

WaBoLu I (d'après l'allemand: Wasser-Boden-Luft), tel est le nom d'un projet de l'EPFZ, lancé en 1985 par le Professeur Werner Stumm. Ce projet avait pour but de conjuguer les travaux des différents instituts de l'EPFZ intéressés au domaine ainsi défini, et de favoriser la bonne compréhension interdisciplinaire. Mais dans la phase initiale du projet, l'élaboration de méthodes expérimentales et analytiques occupa une place considérable, au préjudice de la collaboration directe.

Cette situation a été déterminante pour les objectifs du projet WaBoLu II (1988-1991). Il s'agissait maintenant de faire converger, à la faveur d'un projet de travail commun, l'application des diverses recherches et méthodes élaborées au niveau des instituts. De plus, la problématique a été étendue au domaine de la forêt, et les questions concernant les mycorhizes ont été intégrées dans la pro-

blématique du sol.

On ne saurait discuter la nécessité des recherches interdisciplinaires quand il s'agit de résoudre des problèmes écologiques. Mais personne n'ignore que l'interdisciplinarité représente souvent un grave problème dans le monde universitaire de la recherche ultra-spécialisée. Voilà pourquoi un but explicite de WaBoLu II a été d'enseigner et de tester des

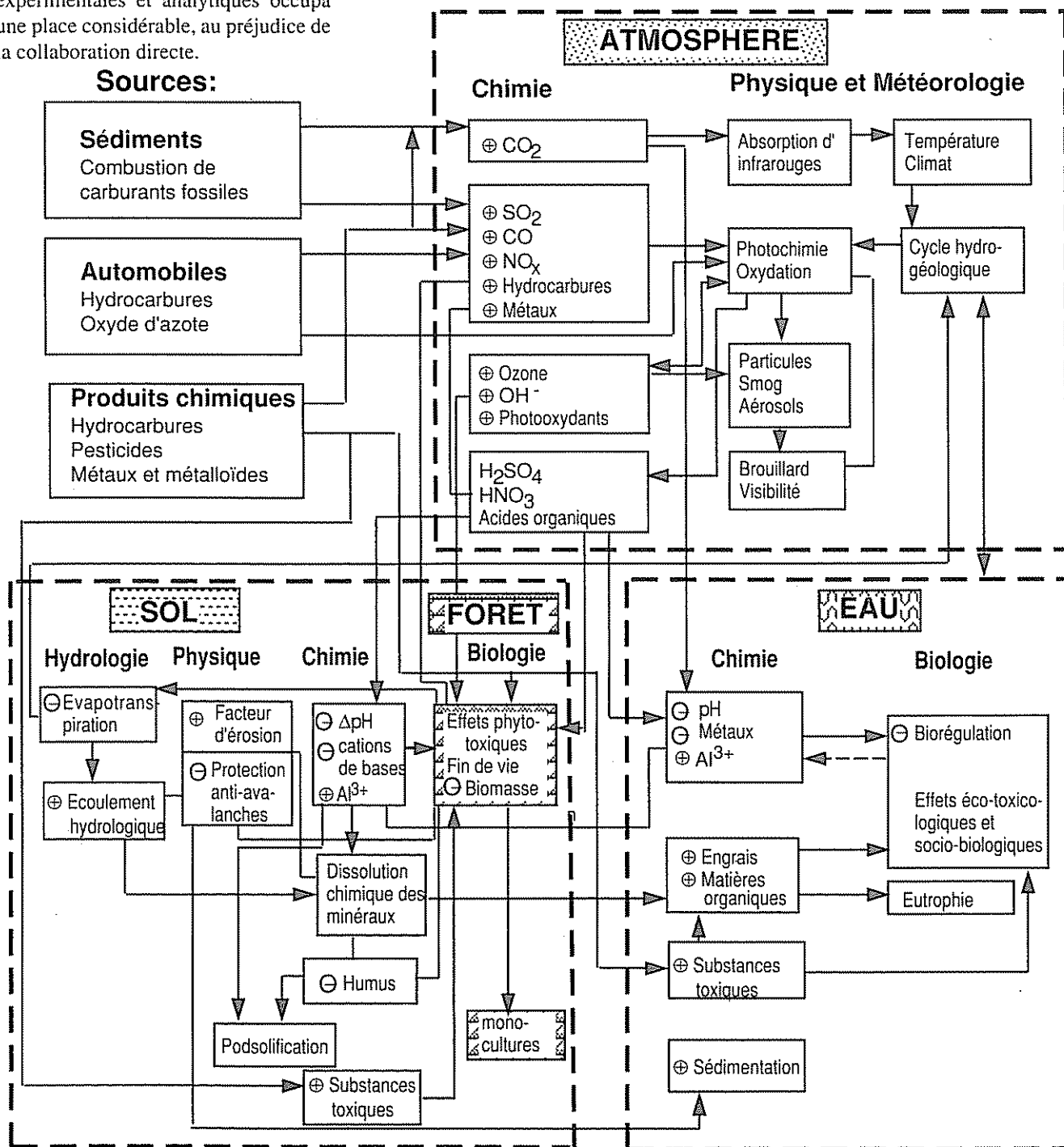


Fig. 1
ETH-Projekt WaBoLu- konzeptuelle Anlage...
WaBoLu, projet de l'EPFZ: de l'organisation conceptuelle ...

WaBoLu - RÜCK- UND AUSBLICK

MICHAEL OCHS

Das ETH-Projekt WaBoLu I (Wasser - Boden - Luft) wurde 1985 durch Prof. Werner Stumm initiiert. Es wurde in diesem Projekt versucht, die Arbeit verschiedener Institute der ETH Zürich in dem umrissenen Themenkreis zusammenzuführen und eine disziplinübergreifende Verständigung zu suchen. Ein erheblicher Anteil dieser Projektphase musste jedoch zur Erarbeitung experimenteller und analytischer Methoden verwendet werden und ging somit der

unmittelbaren Zusammenarbeit verloren.

Dementsprechend war die Zielsetzung des Projektes WaBoLu II (1988 - 1991). Hier sollten nun die von den einzelnen Instituten gestarteten Teilprojekte und ausgearbeiteten Methoden in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben zur Anwendung und auch zu einer Konvergenz kommen. Ferner wurde in dieser Projektphase der Bereich "Wald"

zusätzlich in das Projekt aufgenommen. Des weiteren wurde der Bereich "Boden" um den Teilbereich "Mykorrhizen" erweitert.

Es ist eigentlich offensichtlich, dass zur Beantwortung ökologischer Fragestellungen ein interdisziplinäres Vorgehen notwendig ist. Offensichtlich ist allerdings auch, dass interdisziplinäre Arbeit für die stark spezialisierte Hochschulforschung oft ein sehr ernstzunehmendes

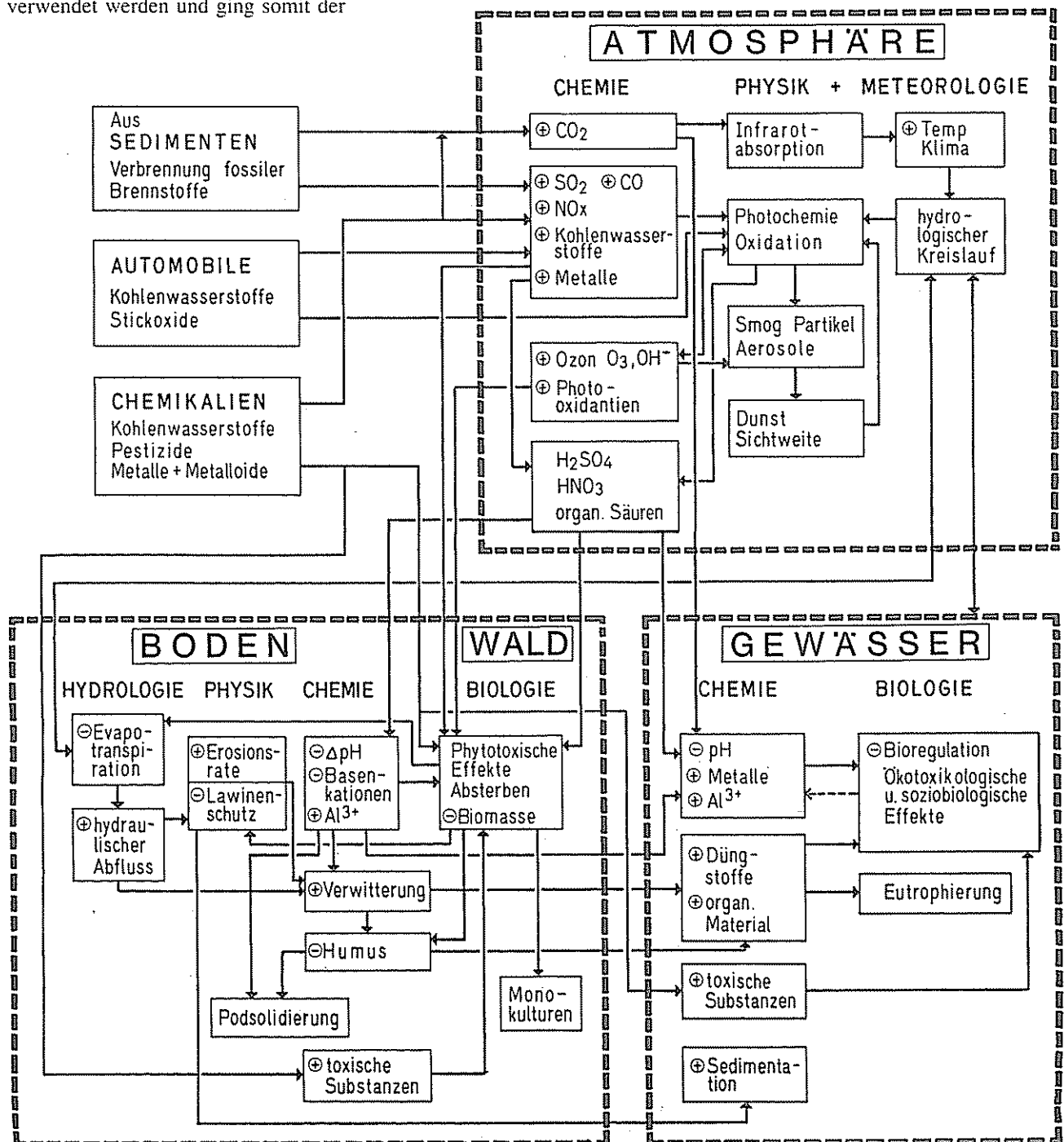


Fig. 1
ETH-Projekt WaBoLu- konzeptuelle Anlage

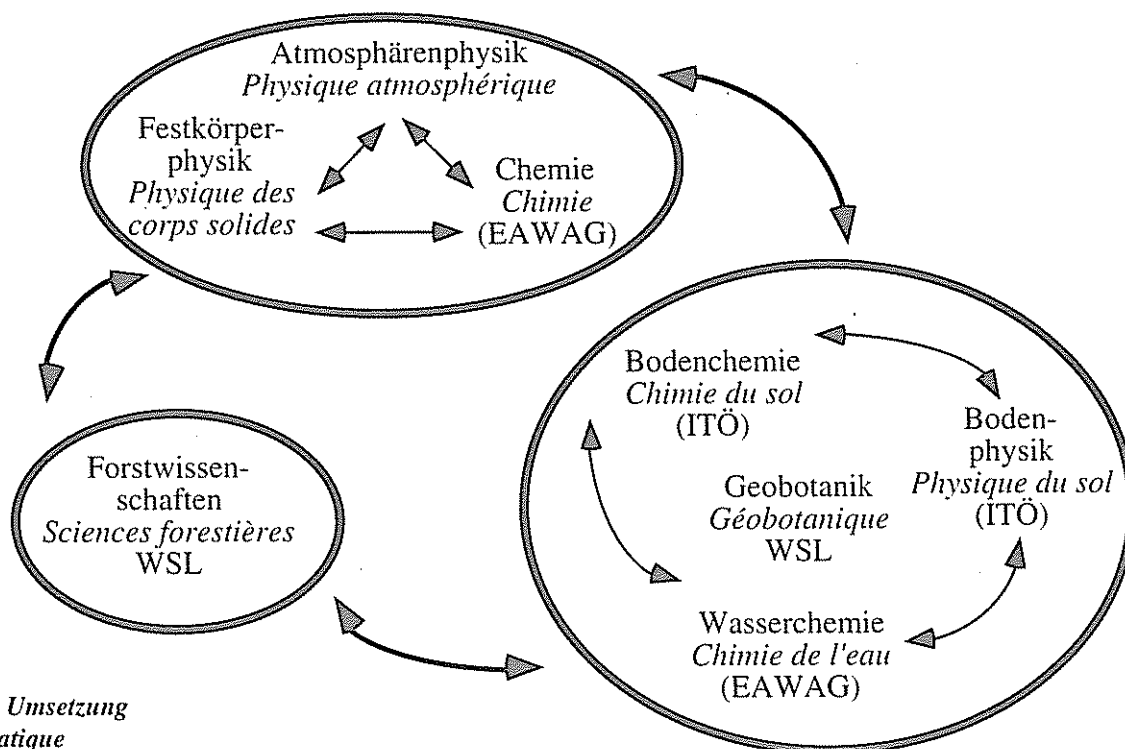


Fig. 2
 ... und praktische Umsetzung
 ... à la mise en pratique

stratégies permettant de surmonter ces problèmes.

La fig. 1 représente la configuration théorique de WaBoLu telle qu'elle a été définie au début de la deuxième phase. Dans la fig. 2, j'ai essayé, dans la mesure de mes connaissances, d'adapter cette structure à la réalité quotidienne de WaBoLu. Comme on peut le constater, les eaux de surface constituent moins un sujet en soi qu'un aspect implicite relevant d'autres domaines. D'ailleurs, la forêt a empiété sur une bonne partie du domaine du sol durant la deuxième phase de WaBoLu.

La collaboration directe a donc eu lieu avant tout au sein des domaines (ie. au sein des ensembles représentés en fig. 2), malgré les spécialisations très poussées des instituts regroupés dans chacun d'eux. Quant à la collaboration entre les différents domaines, elle a eu lieu de manière indirecte, à la faveur de séances de travail communes où ont été échangés à la fois résultats et expériences, etc.

Dans le domaine de l'atmosphère et des émissions ont surtout eu lieu des expériences sur le terrain concernant les rapports entre les paramètres physico-météorologiques et l'élimination des polluants organiques et inorganiques (quelques résultats ont déjà été publiés dans le numéro spécial "Rigi", *Mitteil. Naturforsch. Ges. Luzern*, tome 30,

1988). Simultanément, les spécialistes ont cherché à caractériser et à répertorier les particules et les substances nocives de type organique présentes dans la troposphère et dans les émissions.

Dans le domaine du sol, un terrain artificiel, non saturé et planté avec des épicéas mycorhizés a servi à des expériences de laboratoire concernant

- (i) les processus de transport dans des substrats poreux et structurés,
- (ii) l'absorption et la mobilisation des métaux lourds, de l'aluminium et des acides organiques,
- (iii) la dissolution chimique des minéraux et
- (iv) l'influence du substrat sur les mycorhizes eux-mêmes.

La biologie, située d'abord en marge, a très vite occupé le milieu de la scène. A cause de certaines difficultés matérielles, ces travaux ont finalement été parachevés sur des systèmes semblables, mais tout de même séparés.

En matière forestière, on a réussi de simuler par ordinateur la manière dont des facteurs biotiques et anthropogènes tels que climat, caractéristiques du sol et exploitation, influent sur les forêts de l'Europe centrale. De plus, on a essayé d'améliorer la simulation par ordinateur permettant de pronostiquer la régénération des forêts.

WaBoLu a permis en somme de re-

cueillir des résultats de genres très différents, révélant un aspect à mon avis important: pour se comprendre dans le cadre d'un projet commun, il a fallu apprendre la langue "étrangère" des diverses spécialisations, allant de la mycologie à la physique des corps solides. Ainsi, les planifications détaillées et les travaux communs ont rendu nécessaire l'échange d'expériences et de connaissances. Enfin, j'ajouterai, dans le même ordre d'idée, que les scientifiques ont dû "s'exposer" sur une assez longue période à des branches scientifiques étrangères à leurs préoccupations.

Quant aux résultats scientifiques, je ne veux pas les présenter dans le détail, mais esquisser les perspectives qui en découlent. Il a été prévu de publier tous les travaux nés à la faveur du projet WaBoLu dans un numéro du journal "Water, Air and Soil Pollution", sous le titre "WaBoLu - Special Issue" (voir la liste des rapports, sans garantie, bien sûr).

Pour ma part, WaBoLu a été une période d'assistantat riche et variée (que les participants en soient remerciés!). Grâce à l'ouverture interdisciplinaire, j'ai même été gratifié d'une initiation extrêmement profitable au monde de l'hôtellerie.



Liste des exposés prévus dans un numéro du journal "Water, Air and Soil Pollution"

Liste der vorgesehenen Beiträge für die Zeitschrift "Water, Air and Soil Pollution"

- Scientific goals and performed experiments of the project "winter precipitation at the Mount Rigi": an overview (J.Staehelin et al.)
- Ice crystal observations and the extent of riming in winter precipitation (L.Mosimann et al.)
- Contributions of cloud processes to precipitation chemistry (J.L.Collett et al.)
- Below- cloud scavenging of important trace gases and aerosols (B.Oberholzer et al.)
- A critical review of below-cloud aerosol scavenging results on Mt. Rigi (M.Volken & T.Schumann)
- Aerosol Photoemission, a tool for in situ analysis of particulate combustion emissions (H.Burtscher & H.C.Siegmann)
- Coating of carbon and combustion particles with perylene, a model experiment (D.Steiner et al.)
- Adsorption and desorption processes from particles, monitored by temperature dependent measurement of size, mass, and photoemission (D.Steiner & H.Burtscher)
- Aging of combustion particles in the atmosphere, results from a field study in Zürich (H.Burtscher et al.)
- Analysis of combustion products using time-of-flight mass spectrometry (M.Loepfe et al.)
- Phenols and nitrophenols as tropospheric pollutants: emissions from automobile exhausts and phase transfer in the atmosphere (J.Tremp & W.Giger)
- The correlation between insitu, real time aerosol photoemission intensity and particulate polycyclic aromatic hydrocarbon concentration in combustion aerosols (K.M.Hart et al.)
- The occurrence and fate of organic pollutants in the atmosphere (K.M.Hart et al.)
- Transport of conservative tracers in aggregated media (S.Koch & H.Flühler)
- Influence of anion background on transport of calcium and magnesium (B.Buchter et al.)
- Ligand effect on the adsorption of heavy metals on oxide surfaces. The sulfate/cadmium/goethite case (U.Hoins & H.Sticher)
- Effect of acid deposition on the displacement of Al(III) in soils (D.Raab & W.Stumm)
- Effects of root exudates and humic substances on weathering kinetics (M.Ochs et al.)
- Picea abies- Hebeloma crustuliniforme ectomycorrhizae: effects of various synthesis techniques on the morphology (I.Brunner)
- Modelling forest dynamics as influenced by a changing environment (N.Kräuchi).

men Workshops usw.).

Im Bereich "Atmosphäre/Emissionen" wurden, in erster Linie anhand von Feldexperimenten, Zusammenhänge zwischen physikalisch-meteorologischen Parametern und der Entfernung anorganischer und organischer Schadstoffe aus der Atmosphäre untersucht (einige Ergebnisse dieses Feldexperimentes wurden bereits im Sonderband "Rigi", *Mitteil. Naturforsch. Ges. Luzern*, Bd. 30, 1988 veröffentlicht). Gleichzeitig wurde an der chemischen und physikalischen Charakterisierung und Erfassung von organischen Schadstoffen und Partikeln in der Troposphäre und in Emissionen gearbeitet.

In Laborexperimenten wurde im Bereich "Boden" versucht, in einem künstlichen, ungesättigten und mit mykorrhizierten Fichten bepflanzten Bodensystem

- (i) Transportvorgänge in porösen aggregierten Medien,
- (ii) Adsorption/ Mobilisierung von Schwermetallen, Aluminium und organischen Säuren,
- (iii) Verwitterungsvorgänge und
- (iv) der Einfluss dieses Mediums auf die Mykorrhizen selbst zu untersuchen.

Die Biologie, anfangs vielleicht ein wenig am Rande angesiedelt, rückte dabei bald ins Zentrum des Geschehens. Aufgrund von Materialschwierigkeiten wurden diese Arbeiten schliesslich an ähnlichen, aber letztlich doch getrennten Systemen durchgeführt.

Im Bereich "Forstwissenschaft" wurde mittels eines Computermodells der Einfluss biotischer und anthropogener Faktoren - Klima, Bodeneigenschaften, Management - auf die Wälder Mitteleuropas simuliert. Ausserdem wurde versucht, die Prognostizierbarkeit von Waldsukzessionen in Computermodellen zu verbessern.

Vorzuweisen hat WaBoLu schliesslich Ergebnisse ganz unterschiedlicher Art. Das Erlernen der verschiedenen "Fremdsprachen", die zur Verständigung innerhalb eines Projektes nötig sind, dessen fachliche Bandbreite von Mykologie bis Festkörperphysik reicht, stellt meines Erachtens einen wichtigen Teil dieser Ergebnisse dar. Der für das detaillierte Planen und Durchführen gemeinsamer Arbeiten notwendige Erfahrungs- und Wissensaustausch gehört ebenfalls hierher. Als letzten Punkt in diesem Zusam-

mendes Problem darstellt. Ein explizit formuliertes Ziel von WaBoLu II war denn auch ("schlicht und einfach"?) das Erlernen und Testen von Strategien zur Bewältigung solcher Probleme.

Der theoretische Überbau von WaBoLu - wie formuliert beim Übergang von Phase I zu II - ist in Fig. 1 wiedergegeben. In Fig. 2 habe ich versucht (nach bestem Wissen und Gewissen) dieses Bild dem täglichen WaBoLu-Leben anzupassen. Es ist erkennbar, dass Wasser nicht so sehr in Form von Oberflächen-gewässern untersucht wurde, sondern

vielmehr implizit in allen anderen Bereichen enthalten war. Auch wurde ein wichtiger Teil des "Wa" in WaBoLu während Phase II vom Wald besiedelt.

Die direkte Zusammenarbeit fand also vor allem innerhalb der jeweiligen Bereiche (d.h. innerhalb der Kreise in Fig. 2) statt, obschon auch innerhalb der jeweiligen Bereiche Institute recht unterschiedlicher Fachrichtungen angesiedelt waren. Die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Bereichen war eher indirekter Natur (Austausch von Ergebnissen und Erfahrungen auf gemeinsa-

menhang möchte ich die zeitlich ausgedehnte "Zwangsexponierung" fachfremden Wissenschaftszweigen gegenüber nennen.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse möchte ich nicht im Detail, sondern in Form des im Titel angekündigten Ausblicks präsentieren (siehe vorangehen-

de Seite). Es ist vorgesehen, alle Arbeiten, die innerhalb des WaBoLu-Projektes entstanden sind, in einem "WaBoLu - special issue" des Journals "Water, Air, and Soil Pollution" zu veröffentlichen. Nachfolgend aufgeführt (ohne Gewähr, natürlich) sind die Titel der entsprechenden Beiträge.

Für mich ganz persönlich war WaBoLu auch mit einer vielfältigen und angenehmen (allen Beteiligten sei's herzlich gedankt!) Assistenztätigkeit verbunden, die mir im Sinne der interdisziplinären Horizonterweiterung bisweilen auch recht erspriessliche Einblicke in die Welt des Hotelgewerbes bescherten. □

AQUATIC CHEMISTRY

SYMPOSIUM EN L'HONNEUR DE

WERNER STUMM

SYMPOSIUM ZU EHREN VON

Innerhalb des Meetings der American Chemical Society ACS vom 5.-10. April 1992 in San Francisco (USA) findet ein Symposium über Aquatische Chemie zu Ehren von Werner Stumm statt.

Die ReferentInnen aus den Bereichen Oberflächen-, Redox- und Photochemie, Erdwissenschaften, Biologie, Ingenieurwesen, die sich an diesem Symposium am 8. und 9. April beteiligen, sind die folgenden:

Werner Stumm: The Inner-Sphere Surface Complex; A Key to Understanding Surface Reactivity

Garrison Sposito: Adsorption as a Problem in Coordination Chemistry: The Concept of the Surface Complex

Robert A. Berner: A Model for Atmospheric CO₂ Over the Past 570 Million Years

Perry L. McCarty: Redox Reactions in Microbial Systems

Michael R. Hoffmann: The Chemical Effects of Collapsing Cavitation Bubbles

Charles O'Melia: From Algae to Aquifers: Solid-Liquid Separation

in Aquatic Systems

David A. Dzombak and R.J.M Hudson: Ion exchange: The Contributions of Electrostatic Sorption and Surface Complexation

Bernhard Wehrli, G. Friedl, A. Manceau: The Role of Surface Reactions in Manganese Cycling at the Sediment-Water Interface

James O. Leckie: Coordination Chemistry in the Mineral/Solution Interphase Region

François Morel, J.Y. Le Corre: Phytoplankton and Global Warming

Mary E. Lidstrom: Metals and Microbiology: The Influence of Copper on Methane Oxidation

G. A. Jackson: Coagulation of Marine Algae

Paul Roberts, W.P. Ball, C. Munz: Equilibrium and Rate of Physical Transport Processes: Interactions, Complementary Roles, and Relation to Chemical Conditions

Richard G. Luthy, D.A. Edwards, S. Laha, Z. Liu: Solubilization and Biodegradation of Hydrophobic Organic

Compounds in Soil/ Aqueous Systems with Nonionic Surfactants

Walter J. Weber jr: Distributed Soil-Solute Reactivity: Implications for Subsurface Contaminant Transport

George W. Luther III: Redox Chemistry of Iodine in Seawater Revisited: Frontier Molecular Orbital Theory Considerations

Richard G. Zepp: Effects of Solar Radiation on Sinks and Sources of Halocarbons in Aquatic Environments

Barbara Sulzberger: pH-Dependence of Photochemical Reductive Dissolution of Oxide Minerals

James W. Murray: Anoxic Environments: The Suboxic Zone in the Black Sea

Laura Sigg, A. Kuhn, H. Xue, E. Kiefer: Cycles of Trace Elements in an Eutrophic Lake: Role of Speciation and Sedimentation

Janet G. Hering: The Effects of Organic-Surface Interactions on Geochemical Processes at the Mineral-Water Interface

Publications de l'EAWAG

Nos publications peuvent être commandées par écrit, jusqu'à épuisement du stock, auprès de la bibliothèque de l'EAWAG.

Publikationen der EAWAG

Solange Vorrat sind Separata auf schriftliche Anfrage bei der Bibliothek der EAWAG erhältlich.

1579

Strauss, M.: Human Waste Use: Health Protection Practices and Scheme Monitoring. *Water Sci. Technol.* 24, 67-79 (1991)

1580

Schuler, C., Wieland, E., Santschi, P. H., Sturm, M., Lueck, A., Bollhalder, S., Beer, J., Bonani, G., Hofmann, H. J., Suter, M., Wolfli, W.: A Multitracer Study of Radionuclides in Lake Zurich, Switzerland. 1. Comparison of

Atmospheric and Sedimentary Fluxes of ⁷Be, ¹⁰Be, ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po, and ¹³⁷Cs. *J. Geophys. Res.* 96, 17051-17065 (1991)

1581

Wieland, E., Santschi, P. H., Beer, J.: A Multitracer Study of Radionuclides in Lake Zurich, Switzerland. 2. Residence Times, Removal Processes, and Sediment Focusing. *J. Geophys. Res.* 96, 17067-17080 (1991)

1582

Krejci, V.: Genereller Entwässerungsplan (GEP) - Grundsätze der Bearbeitung. *Gas-Wasser-Abwasser* 70, 472-477 (1990)

1583

Hering, Janet G., Stumm, W.: Fluorescence Spectroscopic Evidence for Surface Complex Formation at the Mineral-Water Interface: Elucidation of the Mechanism of Ligand-Promoted Dissolution. *Langmuir* 7, 1567-1570 (1991)

- 1584
 Tratnyek, P. G., Hoigné, J.: Oxidation of Substituted Phenols in the Environment: A QSAR Analysis of Rate Constants for Reaction with Singlet Oxygen. *Environ. Sci. Technol.* 25, 1596-1604 (1991)
- 1585
 Reichert, P., Wanner, O.: Enhanced One-Dimensional Modeling of Transport in Rivers. *J. Hydr. Engng.* 117, 1165-1183 (1991)
- 1586
 Heitzer, A., Kohler H-P. E., Reichert, P., Hamer, G.: Utility of Phenomenological Models for Describing Temperature Dependence of Bacterial Growth. *Appl. Environ. Microbiol.* 57, 2656-2665 (1991)
- 1587
 Hürlimann, J., Schanz, F., Uehlinger, U.: Use of Algae for Monitoring Rivers in Switzerland. In: "Use of Algae for Monitoring Rivers". B A Whitton, E. Rott., G Friedrich, (Eds.) Inst.f. Botanik AG Hydrobotanik., Innsbruck 1991; 169-172.
- 1588
 Uehlinger, U., Brock, J. T.: The Assessment of River Periphyton Metabolism: A Method and Some Problems. In: "Use of Algae for Monitoring Rivers". B A Whitton, E. Rott., G Friedrich, (Eds.) Inst.f. Botanik AG Hydrobotanik, Innsbruck 1991; 175-181.
- 1589
 Fent, K., Stegeman, J. J.: Effects of Tributyltin Chloride in Vitro on the Hepatic Microsomal Monooxygenase System in the Fish *Stenotomus chrysops*. *Aquatic Toxicology* 20, 159-168 (1991)
- 1590
 Siffert, C., Sulzberger, Barbara: Light-Induced Dissolution of Hematite in the Presence of Oxalate: A Case Study. *Langmuir* 7, 1627-1634 (1991)
- 1592
 Xue, Hanbin, Gonçalves, Maria de Lurdes, S, Reutlinger, M, Sigg, Laura, Stumm, W.: Copper(I) in Fogwater: Determination and Interactions with Sulfite. *Environ. Sci. Technol.* 25, 1716-1722 (1991)
- 1594
 Ventling-Schwank, Andrea, Müller, R.: Survival of Coregonid (*Coregonus* sp.) Eggs in Lake Sempach, Switzerland. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 24, 2451-2454 (1991)
- 1595
 Giger, W.: Polychlorierte Biphenyle: 25 Jahre "klassische" Umweltchemikalien. *Gaia* 1, 50-53 (1992)
- 1596
 Wegelin, M., Schertenleib, R. Boller, M.: The Decade of Roughing Filters -Development of a Rural Wwater-treatment Process for Developing Countries, *Aqua*, 40, 304-316 (1991)
- 1597
 Johnson, C. Annette, Xyla, Aglaia G.: The Oxidation of Chromium(III) to Chromium(VI) on the Surface of Manganite(g -MnOOH). *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, 2861-2866 (1991)
- 1598
 Jenal-Wanner, Ursula: Anaerobic Degradation of Nitrotriacetate in a Denitrifying Bacterium: Purification and Characterization of the Nitrotriacetate Dehydrogenase /Nitrate Reductase Enzyme Complex; Diss. ETH Nr. 9531, Zürich, 1991.
- 1599
 Baccini, P., Belevi, H., Lichtensteiger, T.: Die Deponie in einer ökologisch orientierten Volkswirtschaft. *Gaia* 1, 34-49 (1992)
- 1600
 Kipfer, R.: Primordiale Edelgase als Tracer für Fluide aus dem Erdmantel; Diss. ETH Nr. 9463, Zürich, 1991.
- 1601
 Stumm, W.: The Solid-Electrolyte Interface as Exemplified by Hydrous Oxides; Surface Chemistry and Surface Reactivity. In: "Electrified Interfaces in Physics, Chemistry and Biology". R. Guidelli (Ed.) Kluwer Academic Publ., Dordrecht 1992; 443-472.
- 1602
 Schocher, R.J., Seyfried, Birgit, Vazquez, F., Zeyer J.: Anaerobic Degradation of Toluene by Pure Cultures of Denitrifying Bacteria. *Arch. Microbiol.* 157, 7-12 (1991)
- 1603
 Uehlinger, U.: Spatial and Temporal Variability of the Periphyton Biomass in a Prealpine River (Necker, Switzerland). *Arch. Hydrobiol.* 123, 219-237 (1991)
- 1604
 Pahl-Wostl, Claudia: Patterns in Space and Time - a New Method for Their Characterization. *Ecological Modelling* 58, 141-157 (1991)
- 1605
 Tratnyek, P. G., Hoigné, J., Zeyer, J., Schwarzenbach, R. P.: QSAR Analyses of Oxidation and Reduction Rates of Environmental Organic Pollutants in Model Systems. *Sci. Total Environ.* 109/110, 327-341 (1991)
- 1606
 Fent, K., Hunn, Judith, Renggli, Dea, Siegrist, H.-R.: Fate of Tributyltin in Sewage Sludge Treatment. *Marine Environ. Res.* 32, 223-231 (1991)
- 1607
 Heitzer, A., Mason, C. A., Hamer, G.: Heat Shock Gene Expression in Continuous Cultures of *Escherichia coli*. *J. Biotechnol.* 22, 153-170 (1992)
- 1608
 Egli, T.: On Multiple-Nutrient-Limited Growth of Microorganisms, with Special Reference to Dual Limitation by Carbon and Nitrogen Substrates. *Antonie van Leeuwenhoek* 60, 225-234 (1991)
- 1609
 Schilling, W.: Rainfall Data for Urban Hydrology: What do we Need?. *Atmospheric Res.* 27, 5-21 (1991)
- 1610
 Sigg, Laura, Johnson C. Annette, Kuhn, Annette: Redox Conditions and Alkalinity Generation in a Seasonally Anoxic Lake (Lake Greifen). *Marine Chemistry* 36, 9-26 (1991)
- 1611
 Lotter, A. F., Ammann, Brigitta, Sturm, M.: Rates of Change and Chronological Problems During the Late-Glacial Period. *Climate Dynamics* 6, 233-239 (1992)
- 1612
 Ulrich, M.: Modeling of Chemicals in Lakes - Development and Application of User-Friendly Simulation Software (MASA & CHEM-SEE) on Personal Computers; Diss. ETH No. 9632, Zürich, 1991.
- 1613
 Wanner, O., Kappeler, J., Gujer, W.: Calibration of an Activated Sludge Model Based on Human Expertise and on a Mathematical Optimization Technique - a Comparison. *Water Sci. Technol.*, (1992)
- 1614
 Debus, O., Wanner, O.: Degradation of Xylene by a Biofilm Growing on a Gas-Permeable Membrane. *Water Sci. Technol.*, (1992)

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| Sciences naturelle et génie civil vs sciences humaines et sociales: vraiment aux antipodes? <i>Eva Buff Keller</i> | 1 |
| Les microbes, fossoyeurs de l'environnement: survie des bactéries et maintien de leur activité dans les programmes d'assainissement environnementaux, <i>C. Anthony Mason, Patrick Stelzer et Geoffrey Hamer</i> | 11 |
| Analyse des données au moyen de modèles de régression non-linéaires, <i>Hans-Peter E. Kohler et Paul Tiratnyk</i> | 21 |
| NDS 12 | 28 |
| International Workshop on varved Lake Sediments: inter-comparison of Hozmaar, Goseitz, and Soppensee- Premier pas vers une collaboration internationale dans la recherche sur les varves, <i>André F. Lotter</i> | 29 |
| WaBoLu: bilan et perspectives, <i>Michael Oels</i> | 30 |
| Symposium en l'honneur de Werner Stumm | 34 |
| Publications n° 1579-1614 | 34 |

INHALT

| | |
|---|----|
| Natur-/Ingenieurwissenschaften und Sozial-/Geisteswissenschaften - Wie Feuer und Wasser? <i>Eva Buff Keller</i> | 1 |
| Mikroben als Umweltsanierer: Über das Überleben und die Erhaltung der Aktivität von Bakterien im Rahmen von Reinigungsprogrammen für die Umwelt, <i>C. Anthony Mason, Patrick Stelzer und Geoffrey Hamer</i> | 11 |
| Datenanalyse mittels nichtlinearen Regressionsmodellen, <i>Hans-Peter E. Kohler und Paul Tiratnyk</i> | 21 |
| NDS 12 | 28 |
| International Workshop on varved Lake Sediments: inter-comparison of Hozmaar, Goseitz, and Soppensee- Erster Schritt zu einer internationalen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Varvenforschung, <i>André F. Lotter</i> | 29 |
| WaBoLu: Rück- und Ausblick, <i>Michael Oels</i> | 31 |
| Symposium zu Ehren von Werner Stumm | 34 |
| Publikationen Nr. 1579-1614 | 34 |

IMPRESSUM:

Les Nouvelles de l'EAWAG sont le bulletin d'information de l'EAWAG. Edition, diffusion et © by EAWAG, CH- 8600 Dübendorf (1992);
 Rédaction : Diana Hornung
 Copyright: La reproduction d'articles ou d'extraits est autorisée à condition de mentionner expressément "Tiré des Nouvelles de l'EAWAG 33 (1992)", et d'en informer à l'avance la rédaction et les auteurs concernés.
 Imprimé: sur du papier recyclé original 100 % (fabriqué sans pollution des eaux, sans blanchiment et sans coloration).

BULLETIN D'INSCRIPTION:

Les nouveaux abonné(e)s sont les bienvenu(e)s! Les Nouvelles de l'EAWAG paraissent deux fois par année en français et en allemand, et une fois par année en anglais.

IMPRESSUM:

Die Mitteilungen der EAWAG sind das Informationsbulletin der EAWAG.
 Herausgeberin, Vertrieb und © by: EAWAG, CH- 8600 Dübendorf
 Redaktion: Diana Hornung
 Copyright: Abdruck, auch auszugsweise, ist unter Benachrichtigung der Herausgeberin und der Autoren und mit Quellenangabe "Abdruck aus den Mitt. der EAWAG, 33 (1992)" gestattet.
 Gedruckt: auf Original-Umweltschutzpapier (Widmer-Walty AG, 4655 Oftringen)

ANMELDETALEN FÜR EIN ABONNEMENT:

Neuabonnent(inn)en willkommen! Zweimal jährlich erscheinen die Mitteilungen der EAWAG in deutsch und französisch und einmal jährlich in englisch.

AN DIE BIBLIOTHEK, EAWAG, CH - 8600 DÜBENDORF

- Adressänderung
 Changement d'adresse
 Bitte senden Sie mir die Mitteilungen der EAWAG an folgende Adresse.
 Veuillez m'envoyer régulièrement les Nouvelles de l'EAWAG à l'adresse suivante.
 Bitte schicken Sie mir folgende Publikationen:
 Veuillez m'envoyer les publications suivantes:

Datum und Unterschrift/ Date et signature:

Adresse:

Bevorzugte Ausgabe/Edition préférée:

- deutsch/français english