

<b>Zeitschrift:</b>	Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)
<b>Band:</b>	90 (1992)
<b>Heft:</b>	8
<b>Artikel:</b>	Stofftransport in strukturierten Böden
<b>Autor:</b>	Flühler, H. / Roth, K. / Flury, M.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-234856">https://doi.org/10.5169/seals-234856</a>

### Nutzungsbedingungen

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

### Conditions d'utilisation

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

### Terms of use

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

**Download PDF:** 08.01.2026

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

# Partie rédactionnelle

## Stofftransport in strukturierten Böden

H. Flühler, K. Roth, M. Flury, A. Papritz, B. Buchter, Th. Gimmi, S. Koch

Natürliche Böden weisen fast immer Grobstrukturen auf. Die räumlichen Dimensionen solcher Heterogenitäten sind sehr verschieden. Es kann sich dabei um eine Aggregierung kleinster Partikel mit charakteristischen Längen im Bereich von Zehntelsmillimetern oder auch um Bodenprofilstrukturen im Dezimeter- bis Meterbereich handeln. Poren biogener Natur, zum Beispiel Gänge von Kleinstlebewesen, Kanäle von Regenwürmern oder von Wurzeln bilden ein Netzwerk kommunizierender Holträume. Trocknungs- oder frostbedingtes Schwinden führt zu Rissen, welche je nach Bodentyp eine charakteristische Verteilung aufweisen. Obwohl der Volumenanteil der groben Strukturelemente verschwindend klein ist, beeinflussen sie die Filterwirkung des Bodens beim Transport gelöster Substanzen in hohem Masse. Die mittlere Fliessgeschwindigkeit ist nicht das einzige wesentliche Kriterium, wenn es darum geht, den Stofftransport durch einen Boden in Richtung Grundwasser zu beschreiben. Entscheidend ist die räumliche und zeitliche Verteilung der lokalen Fliessgeschwindigkeiten. Wenn neun Zehntel des Dungers oder anderer Hilfsstoffe im Boden zurückgehalten und nur langsam ausgewaschen werden, ein Zehntel jedoch den Boden sehr schnell durchsickert und dabei die sorbiende Matrix gleichsam umgeht, dann sind die Ankunftszeiten der gelösten Stoffe im Grundwasser bimodal verteilt. Die Verlagerung des langsamen Pulses durch die Matrix kann mit den heute verfügbaren Modellen recht gut beschrieben werden. Die schnellen Sickervorgänge durch die präferentiellen Fliesspfade sind nicht oder nur unbefriedigend quantifizierbar. Im vergangenen Jahr haben wir dieses Problem des Transportes von Nitrat, Schwermetallen und Pflanzenschutzmitteln in Feldböden in folgenden sieben, sich gegenseitig ergänzenden Projekten bearbeitet.

*Les terrains naturels présentent généralement une structure grossière. Les dimensions des hétérogénéités dans le profil du sol sont très différentes. On y trouve aussi bien des particules de quelques dixièmes de millimètres que des structures du sol dans les dimensions d'un décimètre à un mètre. Les pores de nature biogénétique, à savoir les couloirs des micro-organismes, des lombrics et des racines, forment un réseau de cavités communicantes. Suivant la texture du sol, des crevasses d'une répartition typique peuvent alors se former sous l'influence de la sécheresse et du gel. Malgré le faible volume de ces structures grossières, ces dernières ont une influence énorme sur le filtrage dans le sol lors du transport de matière en suspension. La vitesse moyenne de l'écoulement n'est pas le seul critère important lorsqu'il s'agit de décrire le transport de ces substances dans le sol vers une nappe phréatique. Ce sont plutôt les différentes vitesses locales de l'écoulement (au point de vue espace et temps) qui sont déterminantes. Supposons que les neuf dixièmes des substances fertilisantes et autres additifs sont retenus dans le sol et lessivés ensuite très lentement, et que le dixième de ces substances est absorbé fort rapidement – en contournant en quelque sorte les couches filtrantes – alors les temps d'arrivée respectifs de ces matières solubles dans la nappe phréatique ne seront pas les mêmes. Les conditions d'infiltration lente dans la structure sont aujourd'hui bien connues. Par contre, il est plus difficile de calculer l'écoulement rapide, facilitée par les cavités existantes. Les sept projets ci-après sont complémentaires et montrent de quelle manière nous avons traité le problème du transport des nitrates, des métaux lourds et des produits phytosanitaires dans les sols cultivés.*

### Nitrateaustausch unter Gemüseanbau

(Forschungsanstalt Wädenswil, Bodenphysik ETHZ, Migrosgenossenschaft)

Ein substantieller Anteil des Nitrates wird vor allem während den Winterniederschlägen entlang von präferentiellen Fliesswegen in kurzen, schnellen Pulsen in den Untergrund verlagert. Weil Nitrat und Chlorid im Boden praktisch gleich mobil sind, ist

Chlorid ein idealer Tracer für die Untersuchung des Nitrattransports. Eine Felduntersuchung in einer Gemüsekultur zeigt, dass eine Infiltration von nur 31 mm Wasser einen auf die Oberfläche aufgebrachten Chloridpuls innerhalb weniger Tage in eine Tiefe von 2.4 m, also außerhalb der Reichweite der Wurzeln verlagert hat (Abb. 1). Das bei diesem Fliessvorgang zusammen mit dem Chlorid mitverlagerte Nitrat wird deshalb unvermeidlicherweise

ins Grundwasser gelangen. Dieser Vorgang wurde mit einer räumlich dichten Instrumentierung, ausgehend von einem 12 m langen unterirdischen Tunnel unter einem Gemüsefeld, experimentell erfasst und dokumentiert (Abb. 1 und 3).

### Transport von Farbtracer und Pflanzenschutzmitteln in Ackerböden

(Bodenphysik ETHZ, University of California Riverside, Ciba Geigy AG)

Die Zulassung von Pflanzenschutzmitteln stützt sich unter anderem auf Mobilitätsuntersuchungen an standardisierten Bodensäulen im Laboratorium. Die Retention in solchen Standardversuchen definiert eine relative Mobilität der betreffenden Substanzen. Unter Feldbedingungen wurde in vielen Fällen beobachtet, dass an sich relativ wenig mobile Pflanzenschutzmittel ins Grundwasser gelangen können. Schnelle Transportvorgänge durch präferentielle Fliesspfade sind eine mögliche Erklärung. In einer ersten experimentellen Phase führen wir auf einer grösseren Anzahl von Ackerstandorten einen Tracerinfiltrationstest durch, mit welchem wir die Voraussetzungen für schnelle Transportvorgänge kategorisieren wollen. Zu diesem Zwecke wurden Farb- und Salztracer unter verschiedenen Anfangs- und Randbedingungen infiltriert und das entstehende Infiltrationsmuster analysiert (Abb. 2 und 4). Das Ziel dieser Untersuchungen liegt darin, herauszufinden, welche Eigenschaften einen Boden für eine übermässige Mobilität von Pflanzenschutzmitteln prädisponieren beziehungsweise ob mit gewissen Bearbeitungsstrategien dieses Phänomen minimiert werden könnte.

### Schnelle Infiltration von kontaminiertem Stammabflusswasser

(Nationales Forschungsprogramm 14+)

Ein erheblicher Teil des Niederschlags kann in Laubholzbeständen dem Baumstamm entlang abfließen. Dieses Stammabflusswasser ist in immissionsbeeinflussten Lagen stärker kontaminiert als der Freilandniederschlag und das Kronenlaufwasser. Im Wurzelraum einer grossen Buche auf der Versuchsfläche Zindelen (Lägern) wurden Geräte zur Messung des Druckes im Bodenwasser (Tensiometer) in räumlich dichter Anordnung eingebaut. Mit dieser Instrumentierung wollten wir untersuchen, ob kontaminiertes Stammabflusswasser in den Makroporen schnell durch den Boden perkoliert. Da sich der grössere Teil des Feinwurzelsystems in Makroporen befindet, wäre es denkbar, dass die Feinwurzeln kurzfristig sehr grossen Mengeänderungen ausgesetzt sind, weil das

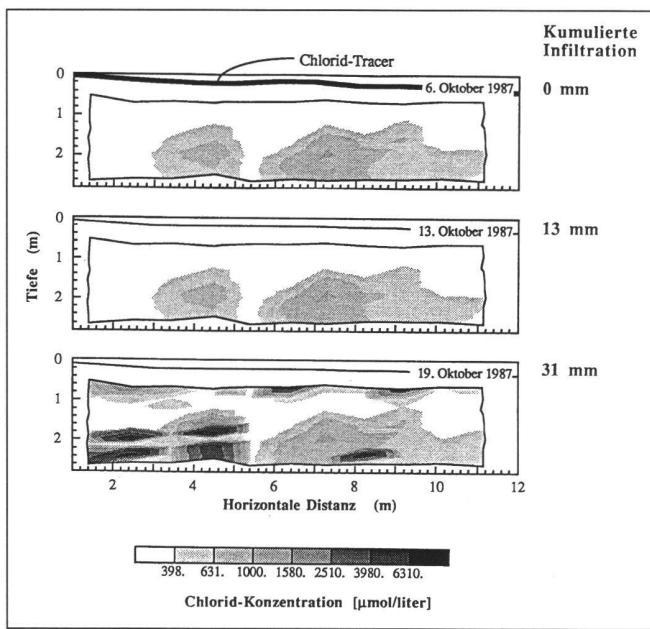


Abb. 1: Verteilung der Chloridkonzentration unterhalb der Wurzelzone einer Gemüsekultur zu drei verschiedenen Zeiten nach der oberflächlichen Applikation von  $0.2 \text{ kg Cl m}^{-2}$ . Die Infiltrationsraten waren durchschnittlich nur  $2.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ .

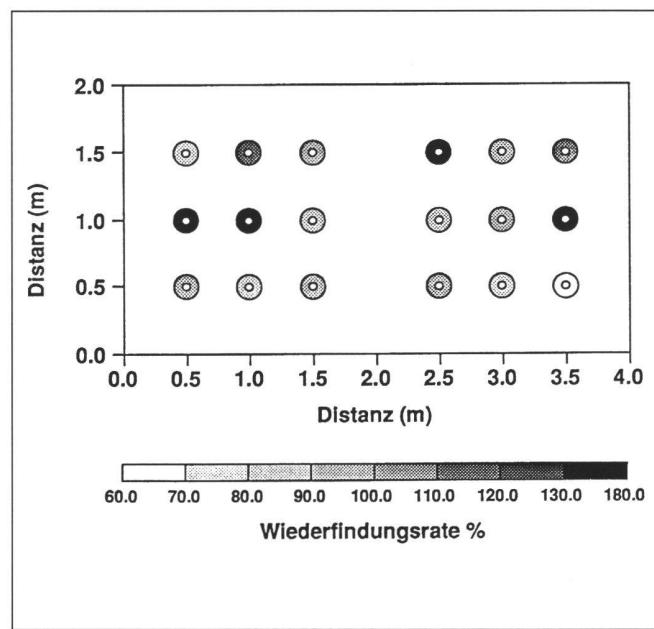


Abb. 2: Prozentuale Wiederfindungsrate von Bromid in Bohrkernen. An den bezeichneten Stellen wurden von der Bodenoberfläche Bohrkerne bis 1.5 m Tiefe entnommen und auf einen Bromidtracer untersucht. Die Aufsicht auf die beprobede Fläche zeigt die hohe räumliche Variabilität der Bromidwiederfindungsrate und die laterale Umverteilung des Bromids.

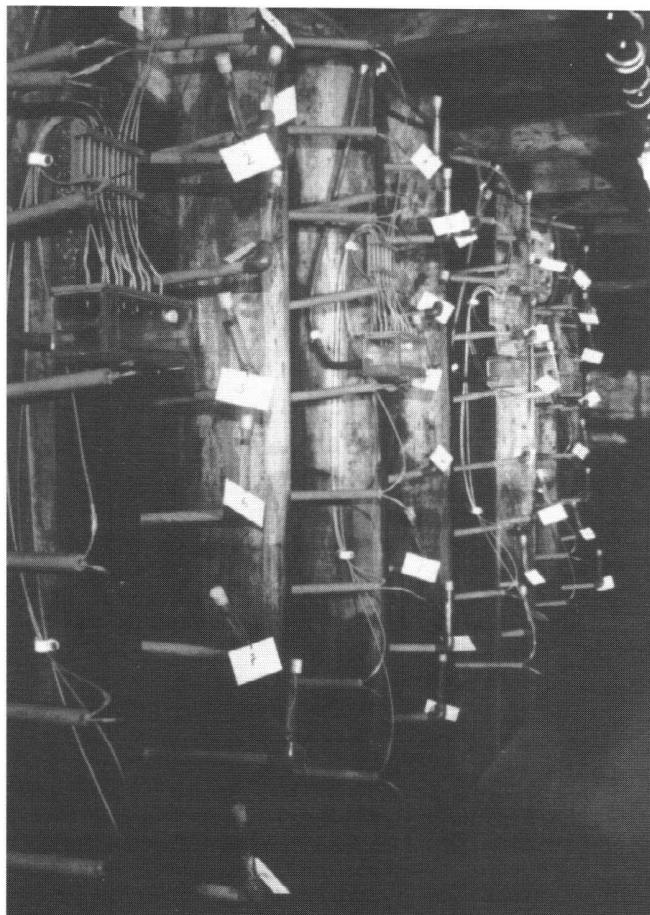


Abb. 3: Messtunnel unter der Gemüsekultur. Die Instrumente zum Absaugen von Bodenlösung wurden seitlich von der Tunnelwand aus 1 m tief in den Boden eingebaut.

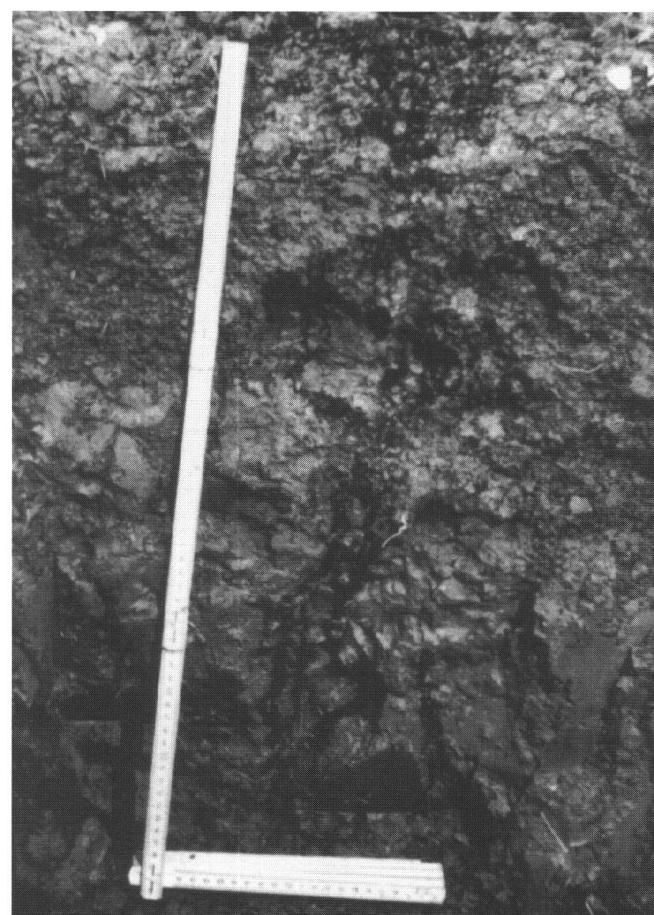
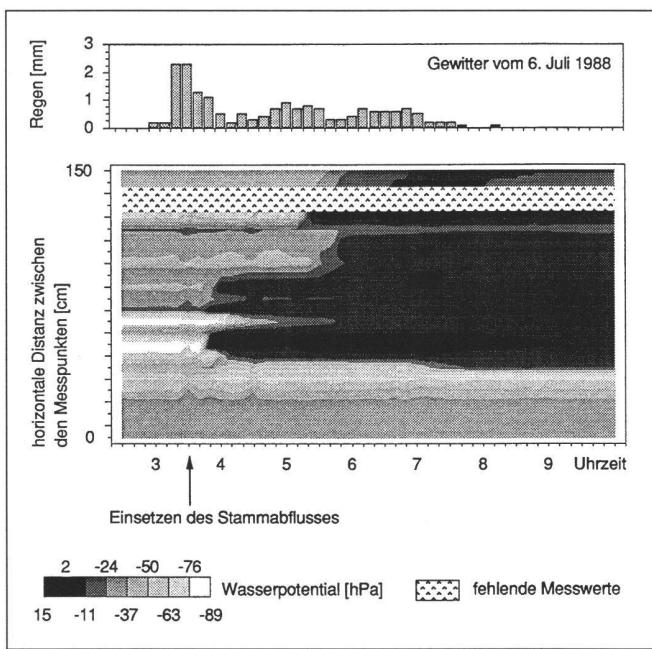


Abb. 4: Infiltrationsmuster eines im Wasser gelösten Farbstoffes in einem tonigen Boden. Das Wasser wurde mit einem Tensionsinfiltrometer unter Unterdruckbedingungen an der Bodenoberfläche infiltriert. Deutlich ersichtlich ist das ungleichförmige Muster der Wasserbewegung.

# Partie rédactionnelle



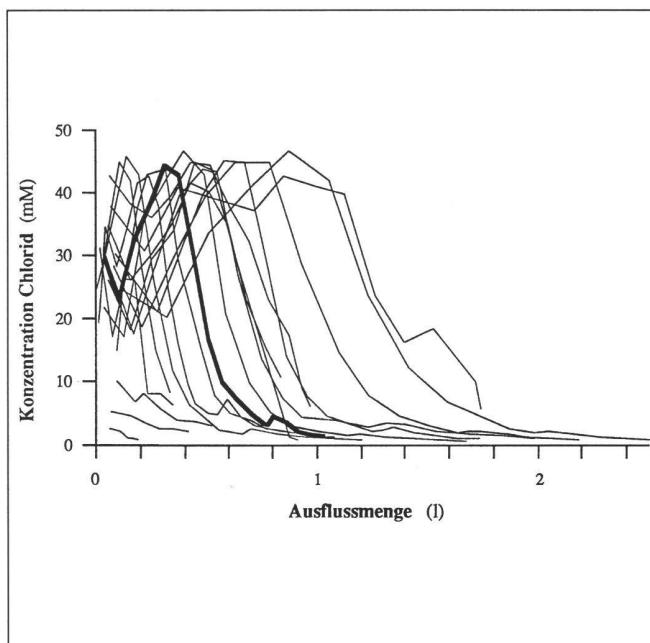
**Abb. 5:** Zeitliche Veränderung der horizontalen Verteilung des Drucks im Bodenwasser (Wasserpotential) in 30 cm Tiefe in einem Abstand von 1 m talabwärts vom Stamm. Etwa 10 Minuten nach Beginn des Stammabflusses erreicht die Nassfront an einigen Stellen bereits die Messinstrumente.

Stammabflusswasser nicht durch die sorbierte Bodenmatrix infiltriert und gepuffert wird. Innerhalb 10–30 Minuten nach Beginn des Niederschlags infiltriert das Stammabflusswasser über Strecken von mehr als 1 m (Abb. 5). Derartige Infiltrationsgeschwindigkeiten bestätigen, dass das Stammabflusswasser entlang präferentieller Fliesspfade in den Wurzelraum eindringt. Ein Infiltrationsexperiment mit einer Farblösung zeigte, dass sich die infiltrierende Lösung bevorzugt entlang von Wurzeln ausbreitet (Abb. 7).

## Transport von Kadmium im kiesigen Untergrund

(Nationalfonds)

Kadmium ist im Vergleich zu anderen Schwermetallen verhältnismässig mobil, da es vom Boden, insbesondere von Tonoberflächen weniger stark adsorbiert wird. Der Transport von Kadmium durch den verwitterten und durchwurzelten Oberboden ist langsamer als jener durch den heterogenen, kiesig-sandigen Untergrund. Eine Säule von 30 cm Durchmesser und 75 cm Länge eines kiesigen Unterbodens wurde in natürlicher Lagerung herauspräpariert und im Labor unter kontrollierten Bedingungen mit verschiedenen Kadmiumlösungen durchsickert, welche entweder  $\text{Cl}^-$  oder  $\text{ClO}_4^-$  als anionischen Hintergrund enthielten. Im Gegensatz zu  $\text{Cl}^-$  bildet  $\text{ClO}_4^-$  praktisch keine Komplexe mit Cd. Mit dieser experimentellen Anordnung soll überprüft werden, ob die Komplikation der ionischen Spezierung, also der Bildung



**Abb. 6:** Chlorid-Konzentration als Funktion der aus der Bodensäule ausgeflossenen Menge Bodenwasser. Die feinen Linien stellen die Werte für die 19 Einzelausgänge dar, die fette Linie die gemittelte Kurve.

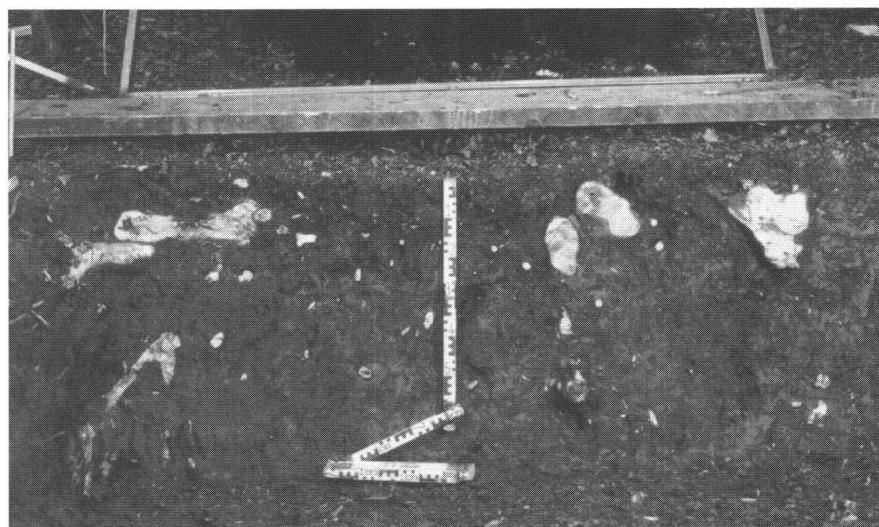
verschiedener Komplexe, im Vergleich zur Heterogenität dieses Materials für die Simulation des Stofftransports im Untergrund berücksichtigt werden muss. Zusätzlich wurde mit Hilfe des mobilen  $\text{Cl}^-$  untersucht, wie stark die lokalen Geschwindigkeiten variieren (Abb. 6).

## Sorption von $\text{SO}_2$ im Boden

(WaBoLu-Projekt ETHZ)

Die Diffusion von Gasen durch die luftgefüllten Grobporen der obersten Bodenschichten ist schnell. Durch das Bodenwasser diffundieren Gasmoleküle etwa

10 000 mal langsamer. Die Aufnahmekapazität der flüssigen Phase ist für hydrolysierbare Gase wie  $\text{SO}_2$  sehr gross. Das Gleichgewicht zwischen den verschiedenen Reaktionsprodukten liegt bei den anionischen Komplexen und zwar umso mehr, je basischer das Milleu ist. In einem kalkgepufferten Boden bei pH 7 ist die Aufnahmekapazität für  $\text{SO}_2$  beispielsweise etwa  $10^5$  mal grösser als in einem sauren Rohhumus eines Gebirgsfichtenwaldes. Mit einem Modell kann das Eindringen reaktiver Gase in strukturierte Böden quantifiziert werden (Abb. 8). Aufgrund dieses Modells dringt  $\text{SO}_2$  nur wenige mm bis cm in den Boden ein und reichert sich im



**Abb. 7:** Das Stammabflusswasser wurde mit Farbstoff markiert. An der Profilwand (Blick bergaufwärts) wurden die präferentiellen Fliesswege durch die infiltrierende Farbe sichtbar gemacht.

Bodenwasser an. Selbst geringe Niederschläge verdrängen dieses mit S-Oxiden angereicherte Bodenwasser und regenerieren damit diese oberflächliche Gassorptionsschicht. Aufgrund der Modellrechnungen und der Verifikationsexperimente kamen wir zum Schluss, dass die Gassorption im nur teilweise mit Wasser gesättigten Boden ganz erheblich sein kann (Abb. 9).

## Bestimmung von Mobilitätsparametern in strukturierten Medien

(WaBoLu-Projekt ETHZ)

Weit aus die meisten Modelle, welche den Stofftransport durch Böden beschreiben, wurden anhand von Perkolationsversuchen an Bodensäulen getestet. Dabei wird der infiltrierenden Lösung ein Stoffpuls zugegeben. Das Messignal ist der Konzentrationsverlauf dieser Stoffkomponente im Ausfluss (Abb. 10). Anhand dieser chromatographischen Durchbruchskurve werden die Modellparameter der Durchmischung und der Sorption an der Matrix bestimmt. Sogenannte 2-Regionenmodelle beschreiben den konvektiven Transport durch den Grobporenraum und den diffusiven Transport hinein in die feinporösen Nischen mit immobilem Bodenwasser. Die simultane Bestimmung verschiedener Parameter in ein- und demselben Versuch führt dazu, dass diese optimierten Parameter häufig physikalisch nicht sinnvoll sind und von Datenset zu Datenset variieren, da sie miteinander korreliert sind. In einem künstlich hergestellten Medium aus porösen Glasperlen versuchen wir, die

Möglichkeiten und Grenzen dieser Art von Parameterbestimmung auszuloten. An diesen porösen Glasperlen können verschiedene Parameter, im besonderen der Massentransferkoeffizient zwischen der Umgebungslösung und dem Inneren der porösen Glasperlen unabhängig bestimmt werden.

## «Field Scale Water and Solute Flux in Soils» Erster Workshop im Centro Stefano Franscini auf dem Monte Verità

(25.–28. September 1989)

Die Beiträge dieses internationalen Workshops wurden in einem Reviewprozess ausgelesen und editiert. Dieser erste Band der Monte-Verità-Reihe ist eine Analyse des gegenwärtigen Kenntnisstandes auf dem Gebiet des Wasser- und Stofftransports in Feldböden (Roth et al. 1990 [1]).

Ein Gastprofessor und ein Mitarbeiter haben im gleichen Jahr ein Lehrbuch geschrieben und herausgegeben, welches den Einstieg in die Modellierung von Transportvorgängen in Feldböden ermöglichen soll (Jury and Roth 1990 [2]). Drin wird gezeigt, wie stochastisch verteilte Fließzeiten mit Transferfunktionen beschrieben werden können.

### Literatur:

- [1] Roth, K., H. Flühler, W. A. Jury, and J. C. Parker (Eds.). 1990. Field scale water and solute flux in soils. Proc. Centro Stefano Franscini, Birkhäuser Verlag, Basel.

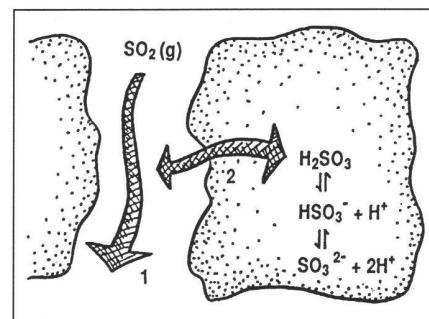


Abb. 8: Modellvorstellung für die Verlagerung von Gasen im Boden. Pfeil 1 stellt konvektiven und diffusiven Transport in gasgefüllten Grobporen dar, Pfeil 2 Phasenaustausch sowie Diffusion und Sorption der verschiedenen Spezies in der wassergesättigten Matrix. Für  $\text{SO}_2$  sind die letzteren Prozesse im Hinblick auf die Verlagerung in die Tiefe dominierend.

- [2] Jury, W. A., and K. Roth. 1990. Transfer functions and solute movement through soil. Birkhäuser Verlag, Basel.

### Adresse der Verfasser:

Prof. Dr. Hannes Flühler

Dr. Kurt Roth

Dr. Markus Flury

Andreas Papritz

Bernhard Buchter

Thomas Gimmi

Sabine Koch

Institut für terrestrische Ökologie

ETH Zürich

Grabenstrasse 3

CH-8952 Schlieren

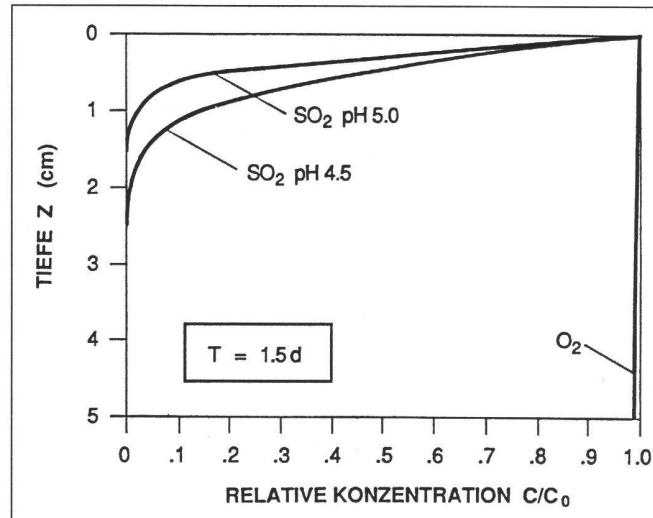


Abb. 9: Modellrechnungen für die Verlagerung von  $\text{SO}_2$  und  $\text{O}_2$  in einem Mineralboden. Dargestellt sind Konzentrationsprofile in der Gasphase nach anderthalb Tagen bei unterschiedlichem pH der Bodenlösung. Es wurde angenommen, dass der Boden zu Beginn kein  $\text{SO}_2$  bzw.  $\text{O}_2$  enthält. Sauerstoff ist lediglich als Beispiel für ein schlecht lösliches, nicht hydrolysierbares Gas aufgeführt, dessen Verlängerung pH-unabhängig erfolgt.

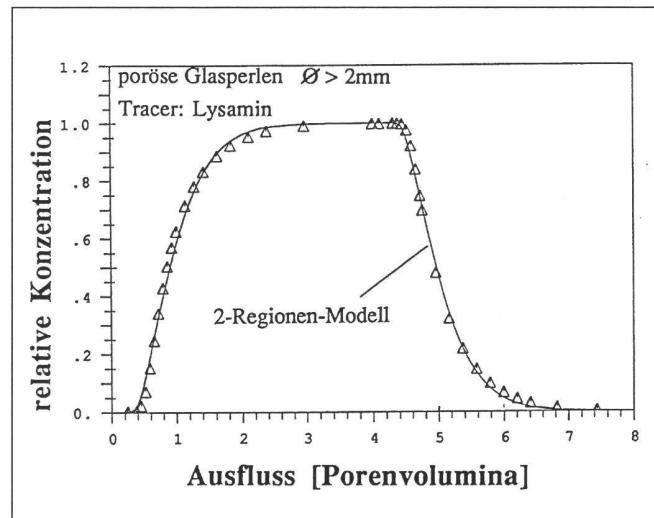


Abb. 10: Durchbruchskurve für einen nicht adsorbierenden Tracer in einem Säulenversuch mit porösen Glasperlen. Für die Modellrechnung wurden verschiedene Parameter unabhängig bestimmt. Der Transferkoeffizient  $\omega$  wurde optimiert.