

Autobahn oder Sackgasse?

WIE SCHNELL FLIEßEN STOFFE DURCH DEN BODEN INS GRUNDWASSER?

Sauberes Grundwasser ist für die Trinkwasserversorgung entscheidend.

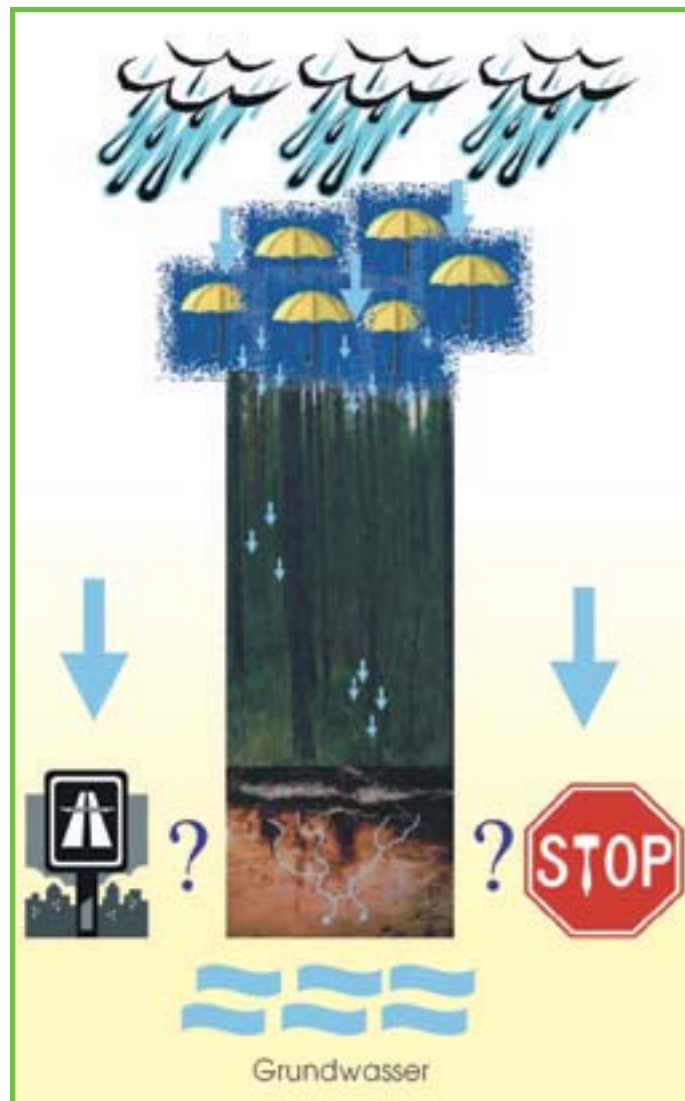
Bevor aber Schadstoffe das Grundwasser belasten können, müssen sie den Boden passieren.

Wie schnell Stoffe durch den Boden fließen, hängt von vielen Faktoren ab, deren Einflüsse und komplexes Zusammenspiel noch weitgehend unklar sind.

In einem gemeinsamen Projekt haben Wissenschaftler des Instituts für Bodenkunde und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Hannover,

die Prozesse

an einem Waldstandort untersucht und modelliert.



Einleitung

Schadstoffe wie zum Beispiel Nitrat und Pestizide aus der Landwirtschaft, Schwermetalle aus Klärschlämmen oder Säuren aus Wäldern wandern auf ihrem Weg ins Grundwas-

ser durch den Boden. Wie gut und wie lange können Böden diese Stoffe zurückhalten oder mindestens ihren Eintrag ins Grundwasser verzögern? Eine Verzögerung bedeutet zum Beispiel mehr Zeit für Pflanzen, Nitrat über die Wurzeln

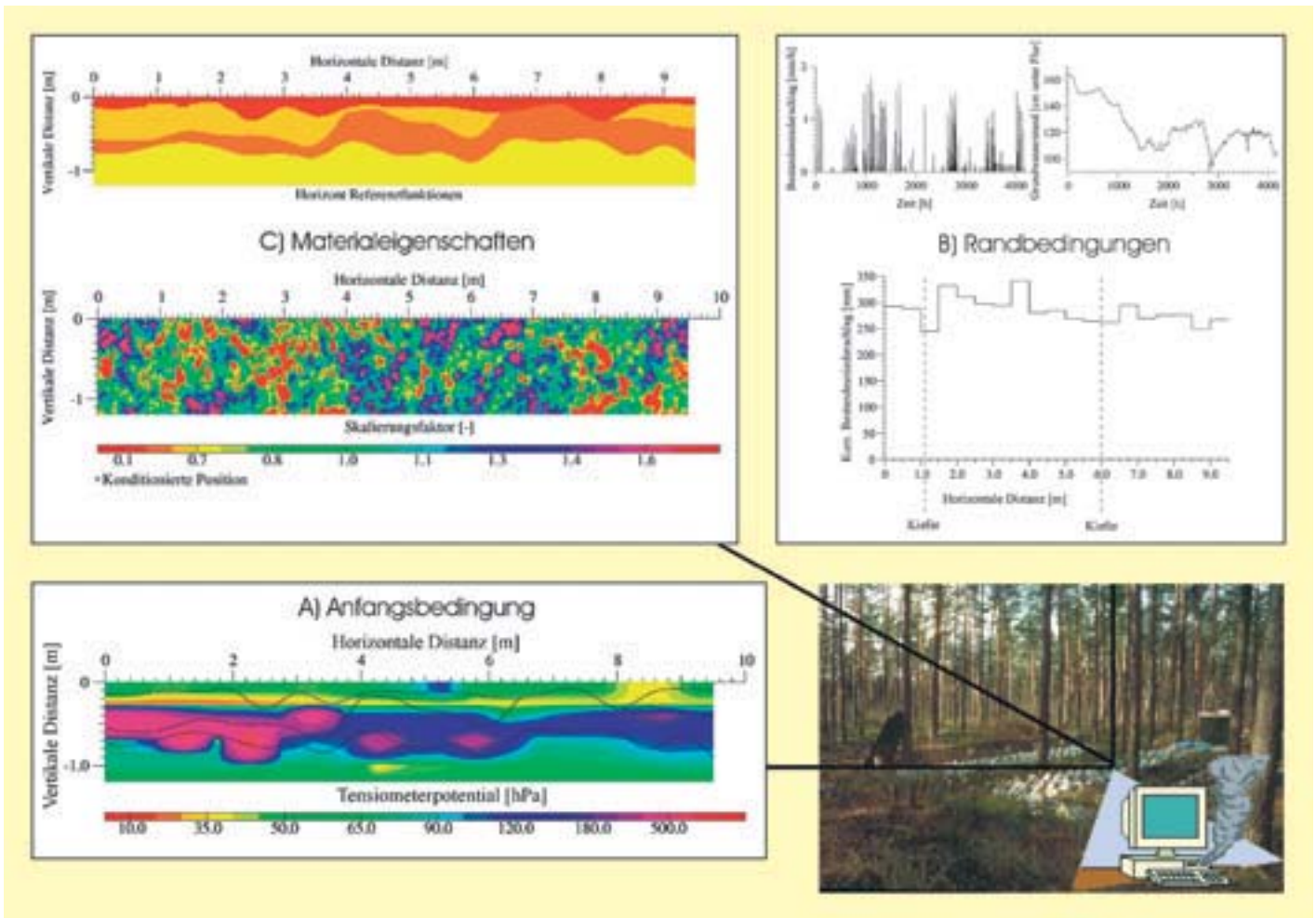
aufzunehmen, für Bodenmikroorganismen, Pestizide abzubauen oder für Wälder, Säuren zu puffern.

Um derartige Fragen zu beantworten, müssen eine Vielzahl von Faktoren und ihre Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Verschiedenste Bodeneigenschaften, aber auch das Klima, spielen hier eine wichtige Rolle. Soweit wir sie verstehen, formulieren wir diese komplexen Zusammenhänge als mathematisches Modell. Zur Weiterentwicklung unseres Verständnisses vergleichen wir dann Modellrechnungen mit der Wirklichkeit in der Form umfangreicher Geländemessungen.

Über die Verlagerung von Wasser und Stoffen in komplexen Ökosystemen, wie zum Beispiel in Wäldern, ist bisher wenig bekannt (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1
Der Fluss von Wasser und Stoffen in einem Waldökosystem: Die Baumkronen verteilen die Stoffe mit dem Wasser unregelmäßig auf die darunter liegende Bodenoberfläche. Anschließend wandern sie auf einem Netz von Fließwegen durch den Boden ins Grundwasser.

Diese Prozesse spielen aber bei den Auswirkungen globaler Klimaveränderungen oder beim Trinkwasserschutz eine Schlüsselrolle.



Problemstellung

Die Stadt Hannover bezieht ihr Grundwasser (18 Millionen m³ jährlich) hauptsächlich aus dem Fuhrberger Feld, 40 Kilometer nordöstlich von Hannover. Der Grundwasserstand schwankt dort in weiten Teilen saisonal zwischen ein bis zwei Metern unter der Geländeoberfläche, ein Großteil des Gebietes ist bewaldet (Böttcher et al., 1999). Diese Bereiche sind, auf Grund der kurzen Strecke zwischen Bodenoberfläche und Grundwasser, besonders sensibel gegenüber der Verunreinigung durch Schadstoffe.

Im Rahmen eines DFG-Projektes in Zusammenarbeit der Universität Hannover mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover erfassten wir dort die Verlagerung von Stoffen

für einen Waldstandort und entwickelten ein Modellierungskonzept.

Ziel war es, die theoretischen Vorstellungen des Wasser- und Stofftransportes durch den heterogenen Waldboden anhand von Messergebnissen zu überprüfen.

Exemplarisch betrachteten wir die Prozesse an einem zehn Meter langen Transekt, das an zwei Bäumen entlang verläuft. Wir konzentrierten uns für einen Vergleich von gemessenem und simuliertem Stofftransport auf die Zeit vom 10. November 1997 bis zum 4. Mai 1998. Dies entsprach der Periode der Winterniederschläge, in der die Grundwasserneubildung hauptsächlich ablief.

Welche Standortfaktoren bestimmen die Stoffverlagerung?

Welche Faktoren spielen beim Transport von Stoffen im Boden eines Waldstandortes eine Rolle? Ein deterministisches Modell, wie wir es benutzten, benötigt eine Vielzahl von Eingangsinformationen (siehe Abbildung 2).

Ein zentrales Element sind die Bodeneigenschaften (siehe Abbildung 2C).

Als konzeptionelle Vorstellung kann man sich den Boden als Straßennetz vorstellen.

Die Poren, das heißt die Hohlräume zwischen den festen Bodenpartikeln, entsprechen Strassen. Bei der Infiltration und Versickerung von Wasser werden zuerst Poren kleiner Durchmesser aufgefüllt, dann solche mit größeren. Die Geschwindigkeit, mit

Abbildung 2
Eingangsgrößen zur Simulation der Stoffverlagerung am Transekt

A) Die Anfangsbedingung: Räumliche Verteilung der Tensimeterpotentiale am 10.11.1997

B) Die Randbedingungen: Niederschlagsraten und deren räumliche Verteilung als obere Randbedingung. Der Grundwasserstand als untere Randbedingung.

C) Materialeigenschaften: Superposition mittlerer Eigenschaften der Horizonte und lokaler Variabilität (Skalierungsfaktoren)

der Stoffe in die Tiefe wandern, ist im Allgemeinen proportional dem Porenradius, allerdings spielt auch die Konnektivität der Poren eine Rolle, das heißt, setzt sich die entsprechende Pore fort oder endet sie irgendwo als Sackgasse.

Um das Spektrum der Porengrößen des Bodens am Untersuchungsstandort kennenzulernen, analysierten wir in der Nähe des Transektes an drei Bodenprofilen (wie in Abbildung 1) in hoher räumlicher Auflösung die Porengrößenverteilung.

Aus dem Muster konnten wir ableiten, dass Bereiche ähnlicher Porengrößenverteilung nur etwa eine Ausdehnung von 0,15 Metern haben (Deurer et al., 2000). Auf Ackerböden sind entsprechende Bereiche oft um das Zehnfache größer. Dies zeigt eindrucksvoll, dass Waldböden zum Beispiel wegen der intensiveren Durchwurzelung wesentlich heterogenere Eigenschaften haben als Ackerböden.

Außerdem konnten wir mittlere Porengrößenverteilungen und hydraulische Leitfähigkeiten für einzelne Horizonte ableiten. Bestimmte Tiefenbereiche, die sich hinsichtlich ihrer Bodeneigenschaften als eigene Klasse unterteilen lassen, nennt man Horizonte. Sie sind das Resultat langfristiger Bodenentwicklung.

Die Muster der Porengrößenverteilung sind nicht nur räumlich variabel, sondern auch zeitlich dynamisch. Im Modell bilden wir sie als Kombination mittlerer Horizonteigenschaften und einer zusätzlichen Variabilitätskomponente, sogenannten Skalierungsfaktoren, ab (siehe Abbildung 2C).

Der Wert eines Skalierungsfaktors beschreibt, wie stark eine Größe lokal von dem Mittelwert des jeweiligen Horizontes abweicht. Der lokale Wert 1,5 als Skalierungsfaktor der hydraulischen Leitfähig-

keit bedeutet zum Beispiel, dass an diesem Punkt die Stoffe um den Faktor 1,5 schneller fließen als im Horizontmittel.

Die räumliche Verteilung der Skalierungsfaktoren sind das Ergebnis kurz- bis mittelfristiger Bodenentwicklungsprozesse.

Die Ergebnisse, die wir aus den drei Bodenprofilen ableiteten, übertrugen wir auf das Transekt. Falls an einzelnen Stellen am Transekt selbst schon Messungen derselben Größe vorlagen, setzten wir diese direkt ein (konditionierte Position, siehe Abbildung 2C).

Neben diesen Materialeigenschaften müssen auch die für Wasser- und Stoffflüsse relevanten Bedingungen am oberen und unteren Rand des betrachteten Problemgebietes bekannt sein (siehe Abbildung 2B).

Die Baumkronen in einem Wald wirken teilweise wie Regenschirme und verteilen den Niederschlag als obere Randbedingung unregelmäßig auf die darunter liegende Fläche.

So variierten im betrachteten Zeitraum die Niederschläge entlang des Transektes zwischen 250 und 350 Millimetern (siehe Abbildung 2B). Der Grundwasserstand als untere Randbedingung schwankte in der selben Zeit zwischen etwa 1,6 bis 0,9 Meter unter der Geländeoberfläche (siehe Abbildung 2B).

Wir berechnen den Stofftransport numerisch, ausgehend von einem bestimmten Zustand des Systems, der Anfangsbedingung.

Am Transekt waren an mehreren Stellen und Tiefen Sonden eingebaut, die den Wassergehalt und die lokale Bindungsfestigkeit (Energiezustand) des Wassers im Boden kontinuierlich erfassten.

Diese Bindungsfestigkeit wird Tensiometerpotential genannt. Dessen Wert steigt an, wenn der Boden austrocknet. Zum Ausgleich strömt dann Wasser von Bereichen niedri-

ger zu Bereichen hoher Tensiometerpotentiale. Die Abbildung 2A zeigt die Verteilung der Tensiometerpotentiale am Transekt am 10. November 1997. Besonders hohe Werte signalisieren einen ausgeprägten Wasserentzug durch Wurzeln im vergangenen Sommer.

Messung vs. Simulation der Stoffverlagerung

Viele Stoffe, wie zum Beispiel die Anionen Nitrat, Chlorid oder auch Bromid, werden in den meisten Böden sehr leicht mit dem Sickerwasser verlagert, da sie weder durch Sorption noch durch andere Prozesse im Boden zurückgehalten werden. Für den Grundwasserschutz ist dies sehr ungünstig.

Aber speziell Bromid, das unter natürlichen Umständen nicht in Böden vorkommt, eignet sich wegen dieser Eigenschaften gut als Tracer, mit dem der Stofftransport durch den Boden verfolgt werden kann.

Wir haben einen solchen Tracerversuch mit Bromid durchgeführt. Dazu haben wir gelöstes Bromid auf dem Transekt ausgebracht und seine Verlagerung in dem Waldboden mit den natürlichen Winterniederschlägen gemessen (siehe Abbildung 3A und 3B).

Um eine gleichmäßige Ausbringung zu gewährleisten, konstruierten wir eine ferngesteuerte Seilbahn, die einen Kasten über das Transekt langsam hin- und herbewegte.

Aus dem Kasten tropfte ähnlich natürlichem Regen die Bromidlösung mit einer Rate von vier Millimetern pro Stunde. Insgesamt brachten wir etwa fünf Millimeter aus.

Die anschließende Wanderung des Bromids mit dem natürlichen Niederschlag durch den Boden in Richtung Grundwasser hielten wir mit Hilfe von Messgeräten, so genannten Saugsonden fest, die an mehreren Positionen und Tiefen am Transekt eingebaut

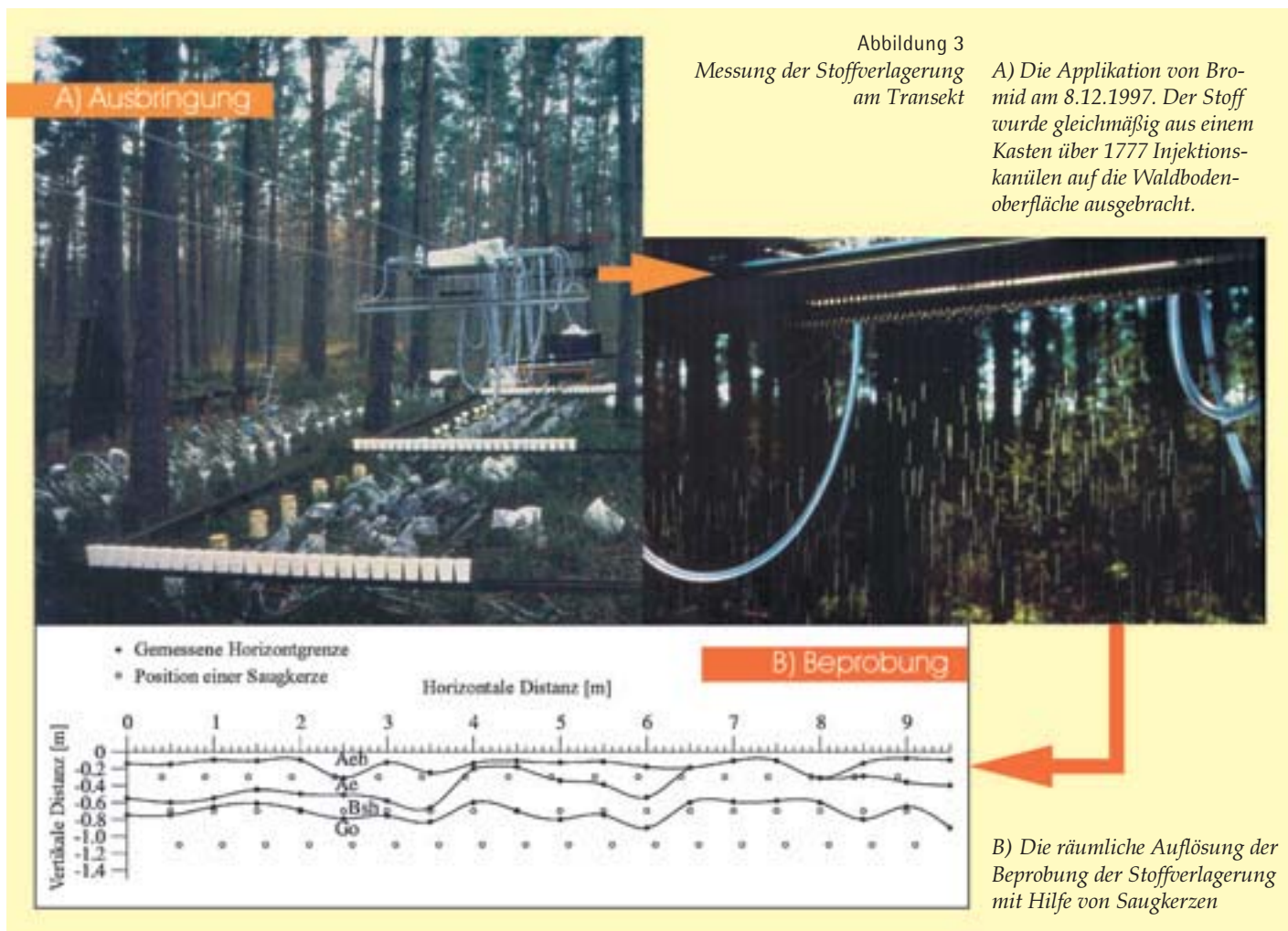


Abbildung 3
Messung der Stoffverlagerung
am Transekt

A) Die Applikation von Bromid am 8.12.1997. Der Stoff wurde gleichmäßig aus einem Kasten über 1777 Injektionskanülen auf die Waldbodenoberfläche ausgebracht.

B) Die räumliche Auflösung der Beprobung der Stoffverlagerung mit Hilfe von Saugkerzen

waren (siehe Abbildung 3B).

Saugsonden sind Röhren, die mit einem porösen keramischen Extraktionskörper enden. Legt man Unterdruck an diese Sonden, kann Bodenlösung aus der Umgebung des Extraktionskörpers abgesaugt werden. Abbildung 4A zeigt die Konzentrationen nach 20 und nach 244 Millimetern Niederschlag (Transektmittel).

Ein Teil des Bromids erreichte schon nach nur etwa 20 Millimetern Niederschlag die Grundwasseroberfläche. Dies wäre nach den üblichen theoretischen Vorstellungen erst nach 70 bis 100 Millimetern Niederschlag zu erwarten gewesen. An anderen Stellen war das Bromid selbst nach etwa 244 Millimetern immer noch nicht aus dem Boden ausgewaschen (siehe Abbildung 4A).

Die Stoffverteilung zu beiden Zeitpunkten, nach 20 Millimetern und nach 244 Millimetern zeigt, dass die Verlagerung räumlich extrem variiert.

Auf der Basis der geschilderten Anfangs- und Randbedingungen haben wir die Bromidverlagerung modelliert.

Das Simulationsmodell berücksichtigt die allgemein für Stofftransport in Böden angewendete »Konvektions-Dispersions Theorie« und die Heterogenität der Bodeneigenschaften am Messtransekt.

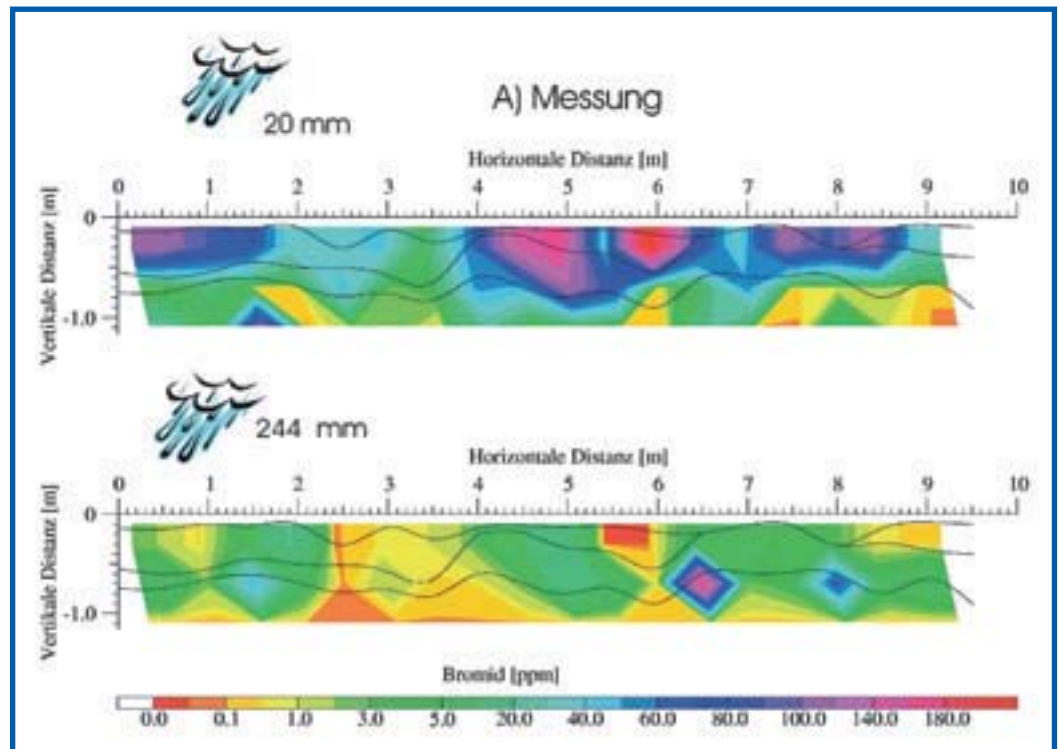
Der simulierte Stofftransport (siehe Abbildung 4B) zeigt ebenfalls räumlich starke Unterschiede, aber vor allem die Stofffront bewegte sich zu einheitlich und zu langsam nach unten (Deurer et al., 2001). In Wirklichkeit nahm ein Teil des Porenbereiches

überhaupt nicht am Transport teil. Das heißt, ein Teil der Bodenporen wirkte als »Autobahn«, andere Poren waren als Straßen für das Bromid nicht befahrbar. Die Messergebnisse zeigten außerdem eine Be-

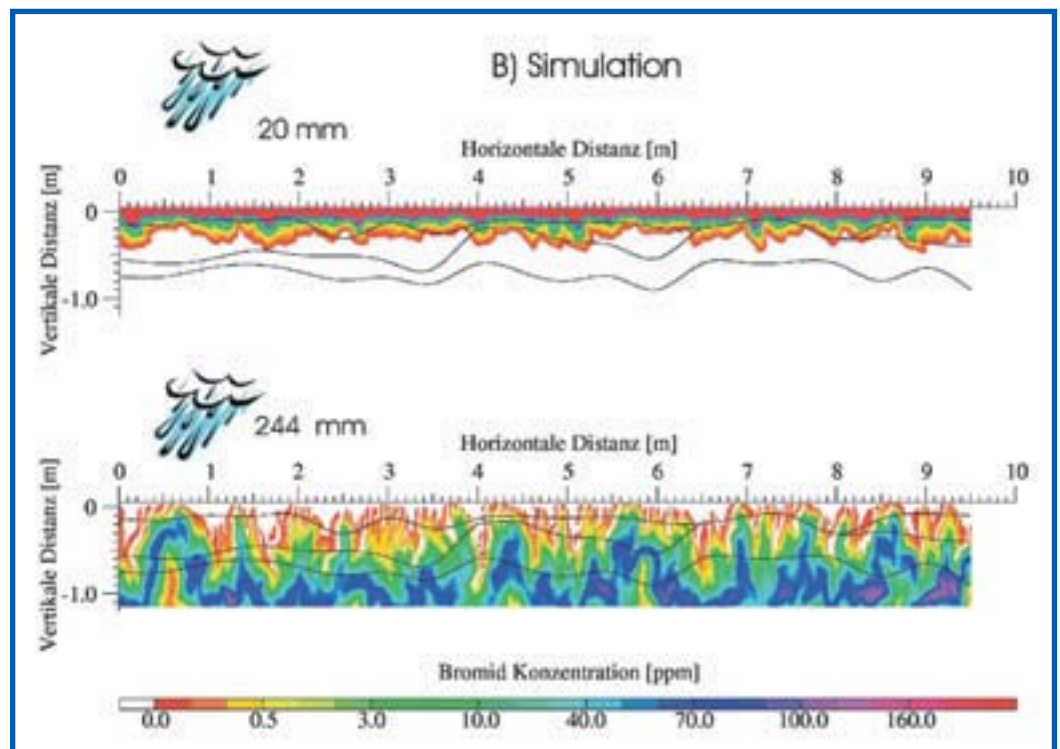
schleunigung der Verlagerung mit der Tiefe.

Das theoretische Modellkonzept erwies sich also als ungeeignet, die tatsächlich wirksamen Prozesse der Stoffverlagerung zu beschreiben.

Abbildung 4
Vergleich gemessener und simulierter Stoffverlagerung



A) Die räumliche Verteilung der gemessenen Bromidkonzentrationen am Transekt nach 20 mm und nach 244 mm mittleren Bestandsniederschlags



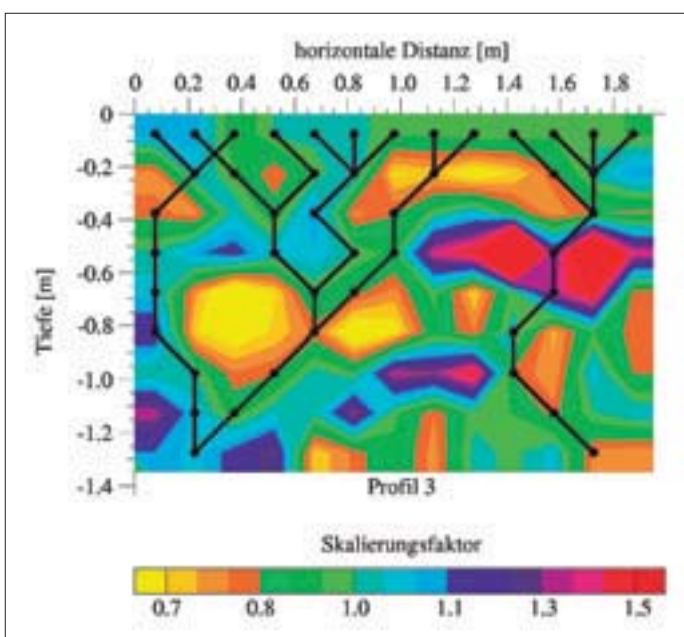
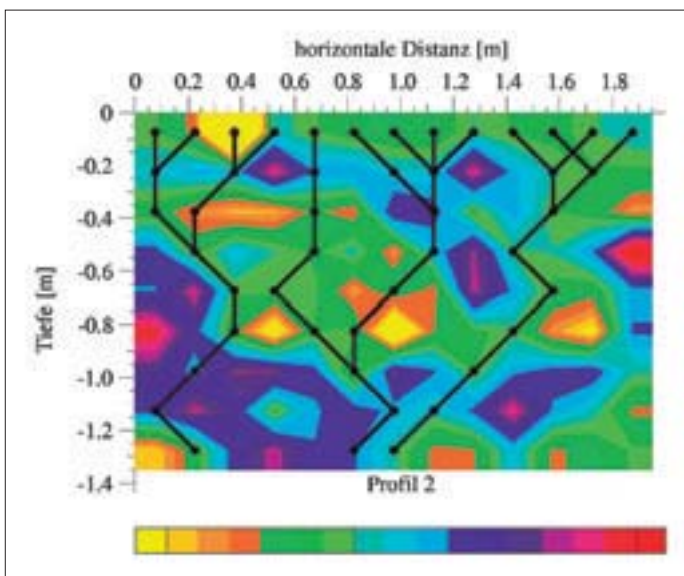
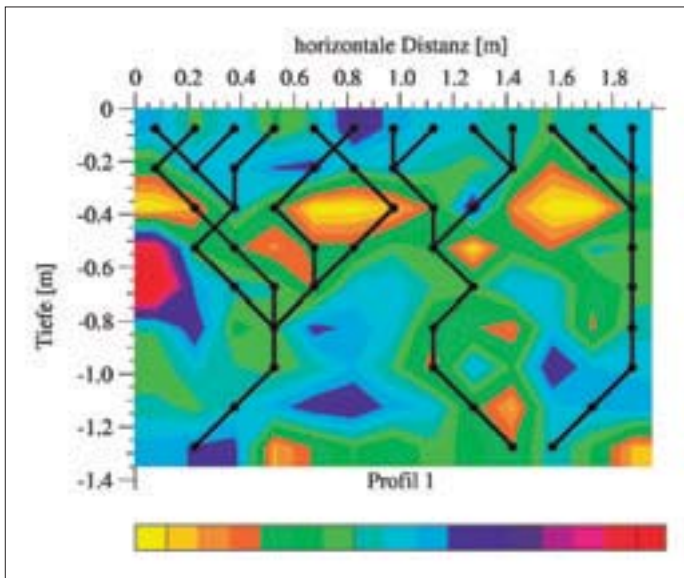
B) Die räumliche Verteilung der simulierten Bromidkonzentrationen am Transekt nach 20 mm und nach 244 mm mittleren Bestandsniederschlags

Neue Entwicklungen

Wir hatten bei der Modellierung zwar die räumliche Heterogenität von Materialeigenschaften berücksichtigt, uns aber weniger um deren tiefenabhängige Verknüpfung gekümmert.

Versucht man die Materialeigenschaften (also etwa die Skalierungsfaktoren) nach ihrer transportrelevanten Verknüpfung von der Bodenoberfläche nach unten zu verbinden, ergeben sich Netze, die an Flussysteme erinnern (siehe Abbildung 5). Diese Netze

miteinander verbundener Materialeigenschaften wirken dann als Drainage-Netzwerke für den Transport von Wasser und Stoffen. Da der Querschnitt dieser Netze mit der Tiefe abnimmt, die transportierte Wasser- und Stoffmenge aber gleich bleibt, nimmt auto-



matisch auch die Transportgeschwindigkeit zu.

Es gelingt uns also, mit dem neu entwickelten Ansatz den Schwerpunkt der Tiefenverlagerung des Bromid-Tracers im Einklang mit den Messergebnissen vorherzusagen.

Derzeit arbeiten wir den Netzwerk-Ansatz noch weiter aus.

Wir wollen nicht nur den Schwerpunkt der Stoffverlagerung, sondern auch die Spreizung der Stofffront mathematisch-numerisch simulieren.

Von diesen Arbeiten, bei denen der Erkenntnisfortschritt aus der Kombination von intensiven Geländemessungen und der Anwendung und Weiterentwicklung von Simulationsmodellen resultiert, erwarten wir wesentlich verbesserte Prognosemöglichkeiten für Risiken der Boden- und Grundwassergefährdung durch die Auswaschung gefährlicher Stoffe.

Ausgewählte Literatur

- Böttcher, J., G. Springob und W. H. M. Duijnsveld (1999): Sandige Böden und deren Wasser- und Stoffhaushalt unter Acker und Nadelwald im Fuhrberger Feld. Mittlg. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 90, 405–424.
- Deurer, M., W. H. M. Duijnsveld und J. Böttcher (2000): Spatial analysis of water characteristic functions in a sandy podzol under pine forest. Water Resour. Res., 36(10), 2925–2935.
- Deurer, M., W.H.M. Duijnsveld, J. Böttcher und G. Klump (2001): Heterogeneous solute flow in a sandy soil under a pine forest: evaluation of a modeling concept. J. Plant Nutr. Soil Sci., 164(6), 601–610.

Abbildung 5
Netzartige Verknüpfung von Materialeigenschaften am Beispiel der Skalierungsfaktoren der Porengrößenverteilung von drei Bodenprofilen in der Nähe des Transekts



Dr. Markus Deurer

Jahrgang 1967, wissenschaftlicher Assistent am Institut für Bodenkunde, Abteilung Bodenökologie



Prof. Dr. Jürgen Böttcher

Jahrgang 1955, Professor für Bodenkunde und Leiter der Abteilung Bodenökologie



Dr. Wilhelmus Duijnsveld

Jahrgang 1950, Referatsleiter des Fachgebietes Wasserhaushalt/Stoffhaushalt an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover