

Neuere Erkenntnisse aus der Grundwasserforschung – Eintrag und Transport von Stoffen

Prof. Dr.-Ing. H. Kobus, Stuttgart

1 Einleitung: Das weite Feld der Grundwasserforschung

Den Beitrag der Forschung zum Grundwasserschutz zu umreißen ist angesichts der vielen Aktivitäten in den unterschiedlichsten Fachdisziplinen eine schier unlösbare Aufgabe. Bekanntlich wirft jede neue Erkenntnis eine Reihe weiterführender Fragen auf, und so hätte mein Vortrag vielleicht zutreffender titulierte werden können mit „neuere Fragen aus der Grundwasserforschung“. Ich will dennoch versuchen, in der gebotenen Kürze die wesentlichen Aspekte, Zielrichtung und Stand der Grundwasserforschung zu skizzieren.

Nach einem einführenden Überblick will ich zu den Fragen des Stoffeintrags und des Stofftransports etwas im Hinblick auf Präventivmaßnahmen und Wasserschutzgebiete sagen. Im weiteren möchte ich die Rolle der numerischen Modelle als Prognoseinstrument für die Praxis beleuchten und schließlich auch kurz die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Sanierungstechnologie ansprechen.

Grundwasser ist eine wesentliche Komponente des Naturhaushalts und gleichzeitig unsere wichtigste Trinkwasserressource, die es zu schützen und langfristig zu erhalten gilt. Die Prinzipskizze in *Bild 1* macht deutlich, daß Grundwassersysteme grundsätzlich offene Systeme sind, über deren Ränder vielfältige Austauschprozesse stattfinden, die sowohl auf geogenen Ursachen als auch auf anthropogenen Einflüssen beruhen können [3].

Ein umfassendes Grundwassermanagement muß die Bewirtschaftung der Grundwasservorräte und den präventiven Grundwasserschutz in Abgleich mit allen Siedlungs- und Flächennutzungsaktivitäten beinhalten und dabei die spezifischen Aspekte der Trinkwasserversorgung sowie auch die Erfordernis von Reparaturmaßnahmen mit ein-



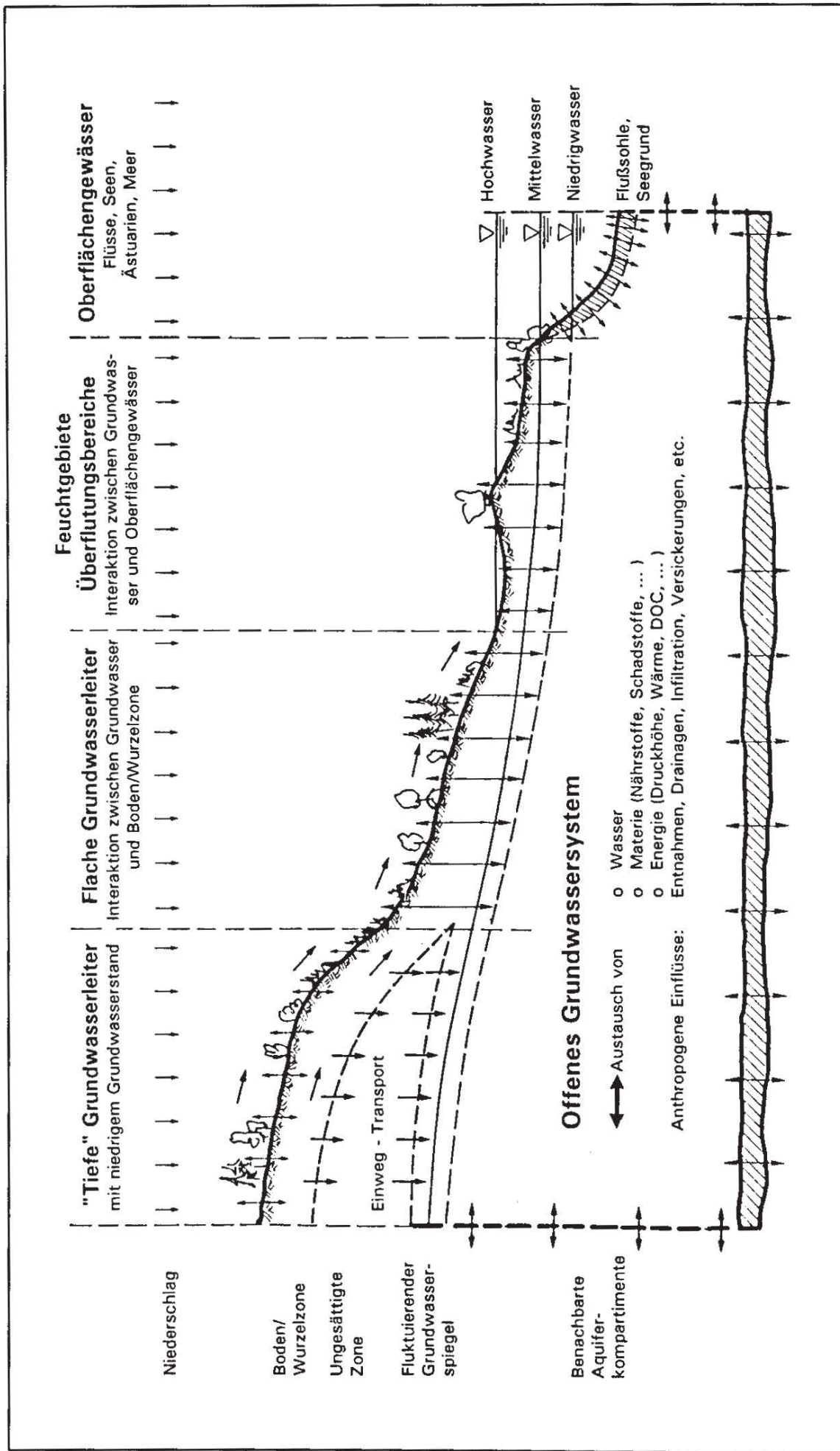


Bild 1: Grundwasservorkommen als offenes System

beziehen. Hieraus lassen sich die Aufgabenstellungen und Zielsetzungen für Forschung und Praxis ableiten.

Am Anfang steht eine Erfassung und Bewertung der natürlichen, geogen bedingten Grundwasserbeschaffenheit im unbelasteten Zustand, welche vom durchströmten Grundwasserleiter geprägt wird und somit nicht notwendigerweise der einst der DIN 2000 zugrunde gelegten Idealvorstellung entspricht, wonach natürliche Grundwasserbeschaffenheit und Trinkwasserqualität stets synonym wären. Erst die Kenntnis des natürlichen „backgrounds“ als Bezugsbasis ermöglicht uns eine realistische Einschätzung und Bewertung anthropogener Belastungen.

Zentrale Bedeutung kommt dem präventiven Grundwasserschutz zu, der ausgerichtet ist auf die Vermeidung von Grundwasserkontaminationen und auf Schutzmaßnahmen an allen potentiellen Schadstoffquellen.

Grundwasserschutz schließt notwendigerweise auch die Aufgaben der Grundwassersanierung ein. Ziel von Sanierungsmaßnahmen ist die Wiederherstellung eines ökologisch einwandfreien Zustands natürlicher Grundwasserleiter, unter anderem auch zur Sicherung der Trinkwassergewinnung. Diese Aufgabe ist in dichtbesiedelten und hochindustrialisierten Ländern wie die Bundesrepublik von eminenter Bedeutung.

Die Beurteilung der Wirksamkeit von Grundwasserschutzkonzepten, die Prognose der Auswirkungen von Grundwasserkontaminationen und die Planung wirksamer und kostengerechter Sanierungsmaßnahmen setzt voraus, daß die Gesetzmäßigkeiten des Eintrags, des Transports und der Umsetzung von Schadstoffen im natürlichen Untergrund hinreichend quantifiziert werden können [2].

Schließlich muß sich auch die Wasserforschung den weiter gefaßten Herausforderungen stellen, die mit dem Begriff „sustainable development“ umrissen werden. Der Begriff „nachhaltig“ oder auch „dauerhaft und umweltgerecht“ beschreibt dabei konkret die Entwicklung einer bedarfsgerechten Wasserversorgung auf der Grundlage einer rationelleren Wasserverwendung und -bewirtschaftung. Das Anliegen einer nachhaltigen Entwicklung, „die die Bedürfnisse der Gegenwart einlöst, ohne die Fähigkeit der künftigen Generationen, ihre eigenen Bedürfnisse zu erfüllen, zu beeinträchtigen“, ist uns nicht fremd, da

Grundwasser

Schwerpunktprogramme (SPP) und Forschergruppen (FG)

- 1974-80 SPP Geochemie umweltrelevanter Spurenstoffe
- 1982-90 SPP Hydrogeochemische Vorgänge im Wasserkreislauf der ungesättigten und gesättigten Zone
- 1982-88 FG Wasser- und Stoffhaushalt landwirtschaftlich genutzter Gebiete
- 1984-92 FG Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser
- 1986-92 SPP Schadstoffe im Grundwasser
- seit 1992 SPP Regionalisierung in der Wasserwirtschaft
- seit 1994 SPP Refraktäre organische Säuren in Gewässern
- o Festgesteinsaquifere (Kluft- und Karstgrundwasserleiter)
 - o Lateraler und azendierender Transport in der ungesättigten Zone
 - o Geochemische Steuerprozesse in anthropogen beeinflussten Systemen-Reaktionen, Stofftransport, Bilanzen (Geokommission)

Bild 2: Förderaktivitäten der DFG im Grundwasserbereich

wir als Wasserwirtschaftler und Wasserversorger in längerfristigen Zeiträumen zu denken gelernt haben.

Damit ist die enorme Breite des Forschungsfelds umrissen, das eine Herausforderung für viele unterschiedliche Bereiche der Wissenschaft darstellt.

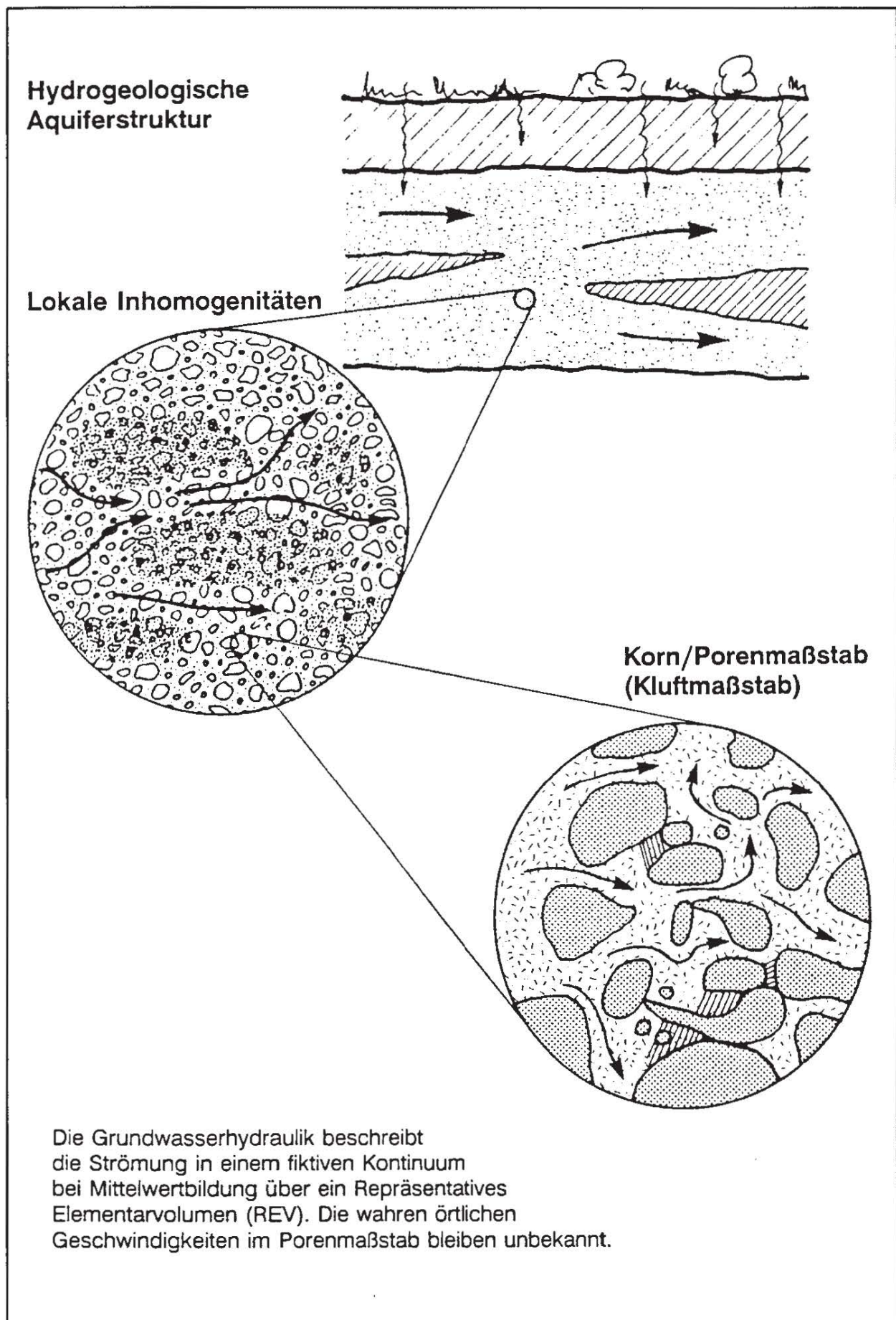


Bild 3: Skalenbereiche für Grundwasserströmungs- und Transportvorgänge

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) hat sich schon früh den fachübergreifenden Fragen der Wasserforschung zugewandt und bereits im Jahr 1956 eine interdisziplinär zusammengesetzte Senatskommission für Wasserforschung ins Leben gerufen, der vorzusitzen ich seit einigen Jahren die Ehre habe. Schon lange bevor die öffentliche Diskussion zum Thema Grundwasser und Grundwasserschutz einsetzte, hat die DFG-Kommission hierzu relevante Grundlagenthemen definiert, gefördert und gezielt auch Forschungspotential aufgebaut. Dies zeigt eine Übersicht über die Entwicklung der größeren Förderaktivitäten im Grundwasserbereich (*Bild 2*). Über diese Liste hinaus gibt es natürlich ein breites Spektrum von mehr anwendungsorientierten Forschungsprogrammen anderer Förderinstitutionen wie BMFT, PWAB, europäische und internationale Programme, etc. Es würde allerdings zu weit führen, hierauf im Einzelnen einzugehen.

Wichtig erscheint mir die gegenseitige Ergänzung und der Dialog zwischen Forschung und Praxis. Für die Praxis ist es notwendig, technische Regeln festzulegen und Handlungsanweisungen zu erarbeiten, auch bei nicht vorhandener bzw. nur unvollständiger Kenntnis der zugrundeliegenden Prozesse. Aufgabe der Forschung ist es, ein breiteres, fundiertes Grundlagenwissen zur Untermauerung des Verwaltungshandelns beizusteuern und zur Überprüfung und Fortschreibung der technischen Regeln beizutragen.

Im Grundwasserbereich sind damit stets interdisziplinäre Fragestellungen verbunden. Je nach Betrachtungsebene werden hierbei gleichzeitig extrem unterschiedliche Skalenbereiche angesprochen, die vom regionalen Maßstab eines Einzugsgebiets über die geologische Struktur des Untergrunds und den Porenraum bis zum molekularen Maßstab der mikrobiologischen Prozesse reichen (*Bild 3*). Dadurch wird eine integrierte Gesamtbetrachtung sehr erschwert.

2 Stoffeintrag und Stofftransport: Neuere Erkenntnisse im Hinblick auf Präventivmaßnahmen

Stoffeinträge ins Grundwasser können sowohl lokal konzentriert als auch großflächig-diffus erfolgen. Einträge aus Oberflächengewässern können ebenfalls bedeutsam sein, sollen hier jedoch nicht angesprochen werden.

Stoffeintrag - Deckschichten und ungesättigte Zone

Erkenntnisse aus dem BMFT-Verbundvorhaben

"Pflanzenschutzmitteleintrag", 1994

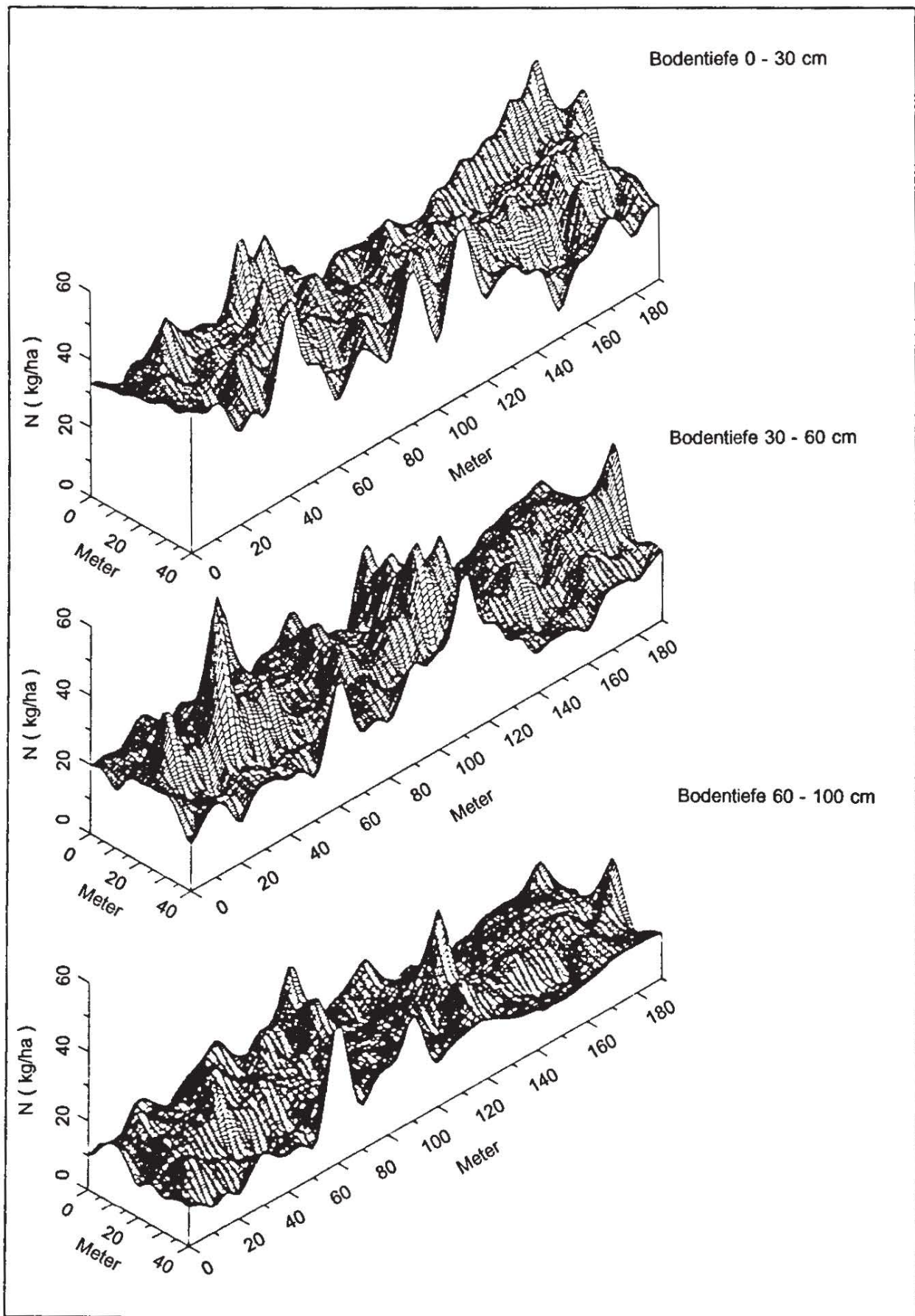
Reinigungswirkung des Untergrunds (belebter Boden/ungesättigte Zone):

- o wirkstoffspezifisch und abhängig von Hydrogeologie, Geochemie und Mikrobiologie

Reinigungswirkung	klein	→	groß
Flurabstand	klein	→	groß
Durchlässigkeit	groß	→	klein
Korngrößenklasse	sandig	→	feinkörnig/bindig
Humusgehalt	gering	→	groß
Wasserlöslichkeit	groß	→	klein
Sorptionsneigung	gering	→	groß

Bild 4: Stoffeintrag-Deckschichten und ungesättigte Zone

Die durchwurzelte Bodenzone und die ungesättigte Zone bis hin zum Kapillarsaum und dem je nach hydrologischem Zustand zeitweise gesättigten und zeitweise ungesättigten Wechselbereich stellt ein System dar, das durch intensive Stoffumsetzungen, Abbauprozesse und Eliminationsvorgänge charakterisiert ist und somit eine erhebliche



N_{\min} -Werte in den Bodentiefen 0 bis 30 cm, 30 bis 60 cm und 60 bis 100 cm.
 (U. Schmidhalter et al., 1991)

Bild 5: Variabilität gemessener N_{\min} -Daten in einem homogenen Feld [11]

Reinigungswirkung und Schutzfunktion für das Grundwasser entfaltet. Allerdings sind die maßgebenden Prozesse und ihre komplexen Wechselwirkungen bislang nur zu einem kleinen Teil erfaßt und quantifizierbar. Deshalb ist man hier nach wie vor auf empirische Beobachtungen mit all ihren zugehörigen Fragezeichen angewiesen.

Wie komplex eine Bewertung der Reinigungswirkung von Deckschichten und ungesättigter Zone tatsächlich ist, zeigen die Erkenntnisse aus einem BMFT-Verbundvorhaben zum Pflanzenschutzmitteleintrag (*Bild 4*). Die Reinigungswirkung ist nicht nur wirkstoffspezifisch, sondern auch von den Parametern des Wassertransports, der Geochemie und der Mikrobiologie abhängig. Einer Auflistung von Professor Matheß folgend sind in der Tabelle die wichtigsten Einflußgrößen und deren Tendenzen im Hinblick auf die Reinigungswirkung dargestellt. Offen bleibt die Frage nach den Metaboliten.

Offen bleibt auch das Problem, daß die maßgeblichen Strömungs- und Transporteigenschaften räumlich schon über kurze Entfernungen stark variieren können. Dies stellt für die Quantifizierung der Schutzwirkung von Deckschichten eine entscheidende Erschwernis dar. So zeigt zum Beispiel *Bild 5* eine Momentaufnahme von N_{\min} -Meßdaten, welche die starke Streuung der Ausgangswerte in einem an sich „homogenen“ Feld deutlich machen. Bei der Ermittlung der Auswaschung in das Grundwasser wird dies mit der entsprechenden räumlichen und zeitlichen Variabilität der Sickerwassermengen überlagert, was wegen der Nichtlinearität der Prozesse zu großen Unsicherheiten bei der Abschätzung der Einträge führt. Das bedeutet auch, daß lokale Stoffeinträge in das Grundwasser um Größenordnungen von den geschätzten Mittelwerten abweichen können.

Das Anliegen, die Schutz- und Reinigungswirkung der ungesättigten Zone bei der Bemessung von Schutzzonen mit zu berücksichtigen, ist an sich zweifellos berechtigt und im Prinzip zu begrüßen, wenngleich auch eine praktikable Handlungsanweisung für eine adäquate Dimensionierung derzeit noch problematisch erscheint.

In das Grundwasser eingetragene gelöste Stoffe werden im Grundwasser mit der Strömung konvektiv mittransportiert und darüber hinaus einer Vielzahl von Prozessen ausgesetzt (*Bild 6*), deren jeweilige Bedeutung stoff- und untergrundspezifisch gesehen werden muß. Hierbei lassen sich fließstreckenabhängige Prozesse wie Diffusion und Dispersion, Adsorption und Filtration und zeitabhängige Prozes-

Stofftransport im Grundwasser

Physikalische, chemische, mikrobiologische Prozesse

→ **Konvektion (strömungsbedingter Transport)**

Fließstreckenabhängige Prozesse:

- Diffusion und Dispersion (molekulare, korngerüstbedingte und inhomogenitätsbedingte Vermischung)
- Adsorption/Desorption (stoff- und aquiferspezifische Verzögerung, insbesondere abhängig vom Gehalt an organischem Kohlenstoff)
- Kolloidtransport/Filtervorgänge

Zeitabhängige Prozesse:

- Chemische Reaktionen wechselwirkender Substanzen
- Lösungs- und Fällungserscheinungen
- Mikrobiologische Abbauprozesse

Bild 6: Stofftransport im Grundwasser

se wie chemische Reaktionen, Lösungs- und Fällungserscheinungen oder mikrobiologische Abbauprozesse gedanklich unterscheiden. Weil jedoch Fließstrecke und Zeit über die Strömung miteinander verknüpft sind, ist eine unabhängige Quantifizierung der Einzelgrößen nur selten möglich. Dies geht nur simultan in einem Strömungs- und Transportmodell unter Einbeziehung aller Prozesse.

Mit Bezug auf die Auslegung der engeren Schutzzone (*Bild 7*) haben Untersuchungen zur Lebensdauer von Bakterien und Viren schon 1985 gezeigt, daß die Absterberaten von Mikroorganismen große Unterschiede aufweisen, und daß die Reinigungswirkung von Porengrundwasserleitern auf dem Zusammenwirken von zeit- und von fließstrek-

Die Zone II soll den Schutz vor Verunreinigungen durch pathogene Mikroorganismen sowie vor sonstigen Beeinträchtigungen gewährleisten

- o **Knorr 1937:**
 - Absterberate Escherichia coli:
Aufenthaltszeit kleiner als 50 Tage

- o **UBA-Studie: "Lebensdauer von Bakterien und Viren im Grundwasser" (Mattheß et al., 1985)**
 - Absterberaten stark unterschiedlich (z.T. viele Monate)
 - Reinigungswirkung von Porengrundwasserleitern beruht auf Zusammenwirken von
 - o zeitabhängigen Absterbe- und Inaktivierungsvorgängen,
 - o fließstreckenabhängigen Transport-, Adsorptions- und Filtervorgängen,
 - Engere Schutzzone bezogen auf pathogene Mikroorganismen zeit- **und** fließstreckenabhängig zu dimensionieren

Bild 7: Engere Schutzzone (Zone II)

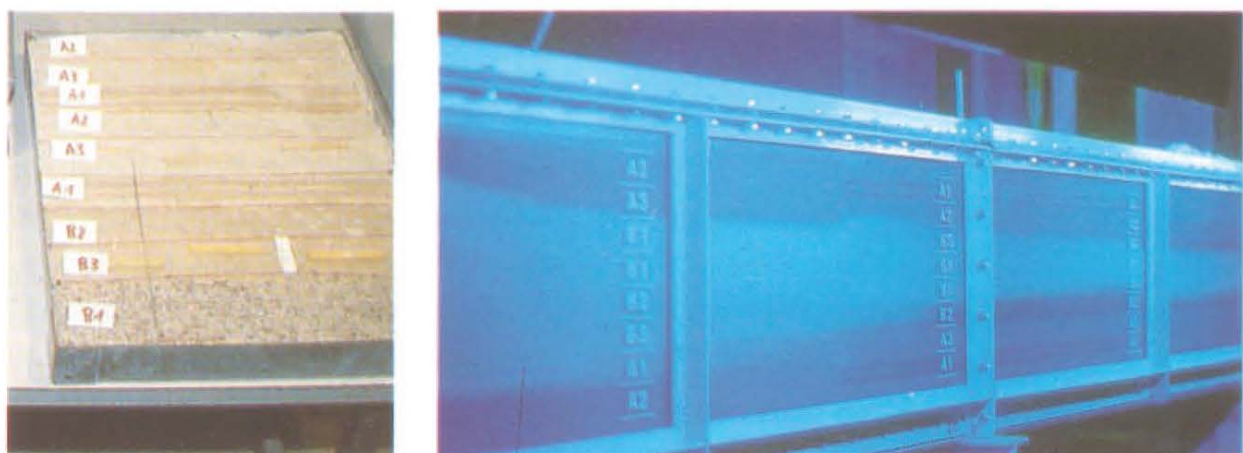


Bild 8: Dispersion einer Tracerfront in einem geschichteten Modell-aquifer mit Inhomogenitäten [4]

kenabhängigen Vorgängen beruht, so daß beide Aspekte bei der Schutzzonendimensionierung Berücksichtigung finden müssen [9].

Zufolge der Heterogenität des Untergrunds spielen auch Dispersionsprozesse eine wichtige Rolle für den Stofftransport. *Bild 8* zeigt beispielhaft einen Modellaquifer, der aus Schichten und Einlagerungen unterschiedlicher Durchlässigkeit aufgebaut ist, in den am Einlauf über die gesamte Höhe ein Farbtracer eingegeben wurde. Man erkennt deutlich, wie der Tracer in den gut durchlässigen Schichten weit vorseilt. Zur Erfassung dieser Vermischungseffekte hat die Forschung im letzten Jahrzehnt wesentliche Fortschritte erzielt, so daß eine hinreichende Eingrenzung für praktische Anwendungen heute durchaus möglich ist.

Traditionell wird die engere Schutzzone ohne Berücksichtigung der Dispersion bemessen. Damit wird aber bewußt in Kauf genommen, daß mindestens die Hälfte (in der Regel mehr) des unter Umständen schadstoffbelasteten Wassers die engere Schutzzone in weniger als 50 Tagen durchläuft, wobei die Abweichungen je nach Geologie erheblich sein können.

3 Prognoseinstrumente als Entscheidungshilfe für Grundwasserbewirtschaftungs- und Sanierungskonzepte

Zum Thema Prognoseinstrumente für die wasserwirtschaftliche Planung hat – neben vielen anderen – eine DFG-Forschergruppe an den Universitäten Stuttgart, Hohenheim und Karlsruhe sich die Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser zur Aufgabe gemacht. Ziel der Arbeiten war die anwendungsorientierte Entwicklung datenkompatibler Modelle, in denen die erforderlichen Modelleingabedaten an der Art der verfügbaren Naturdaten orientiert werden. Es wurden Berechnungsgrundlagen, meßtechnische Konzeptionen und Erkundungstechniken für Strömungs- und Trans-

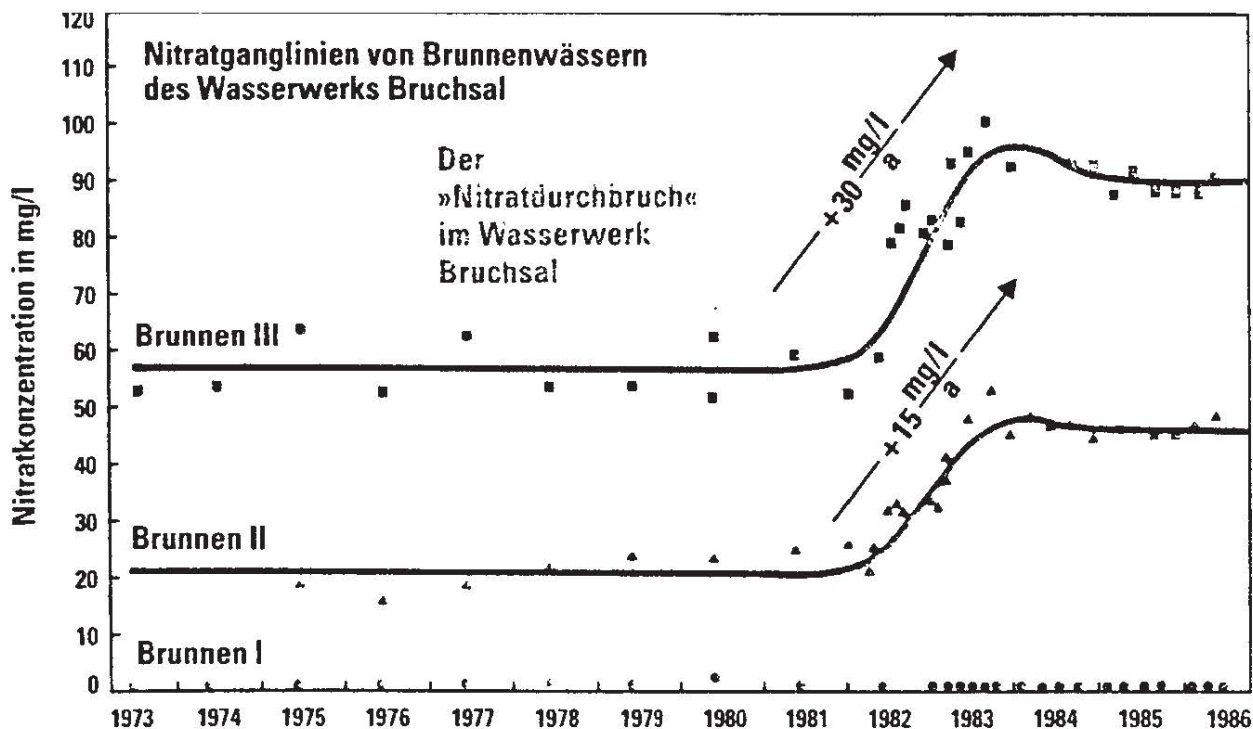


Bild 9: Fallstudie Bruchsal-Karlsdorf: Zeitliche Entwicklung der Nitratkonzentrationen im entnommenen Rohwasser

portvorgänge in Grundwasserleitern erarbeitet und an Felduntersuchungen für die Anwendungsbereiche Wärme, leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe und Nitrat erprobt. Die Ergebnisse liefern Aussagen zur Einsatzfähigkeit von Transportmodellen als Entscheidungshilfe für Grundwasserbewirtschaftungs- und Sanierungskonzepte. Sie sind in einem DFG-Berichtsband 1992 veröffentlicht worden [4].

Ein wesentliches Element des Forschungsprogramms war die parallele Inangriffnahme und zeitgleiche Durchführung von Feldstudien an verschiedenen Standorten. Beispielhaft sei hier die Fallstudie Bruchsal-Karlsdorf zur Modellierung des regionalen Transports von Nitrat und zur Nitratbilanzierung erwähnt. *Bild 9* zeigt die beobachtete Entwicklung der Nitratkonzentrationen im geförderten Rohwasser verschiedener Brunnen, die seinerzeit Anlaß zu dieser Fallstudie gab.

In mehrjährigen Untersuchungen wurden von den beteiligten Institutionen – neben den drei Universitäten auch die LUFA Augustenberg – detaillierte Feldmessungen und Erhebungen durchgeführt, um über einen längeren Zeitraum die Entwicklungen von Nitratreinträgen, Trans-

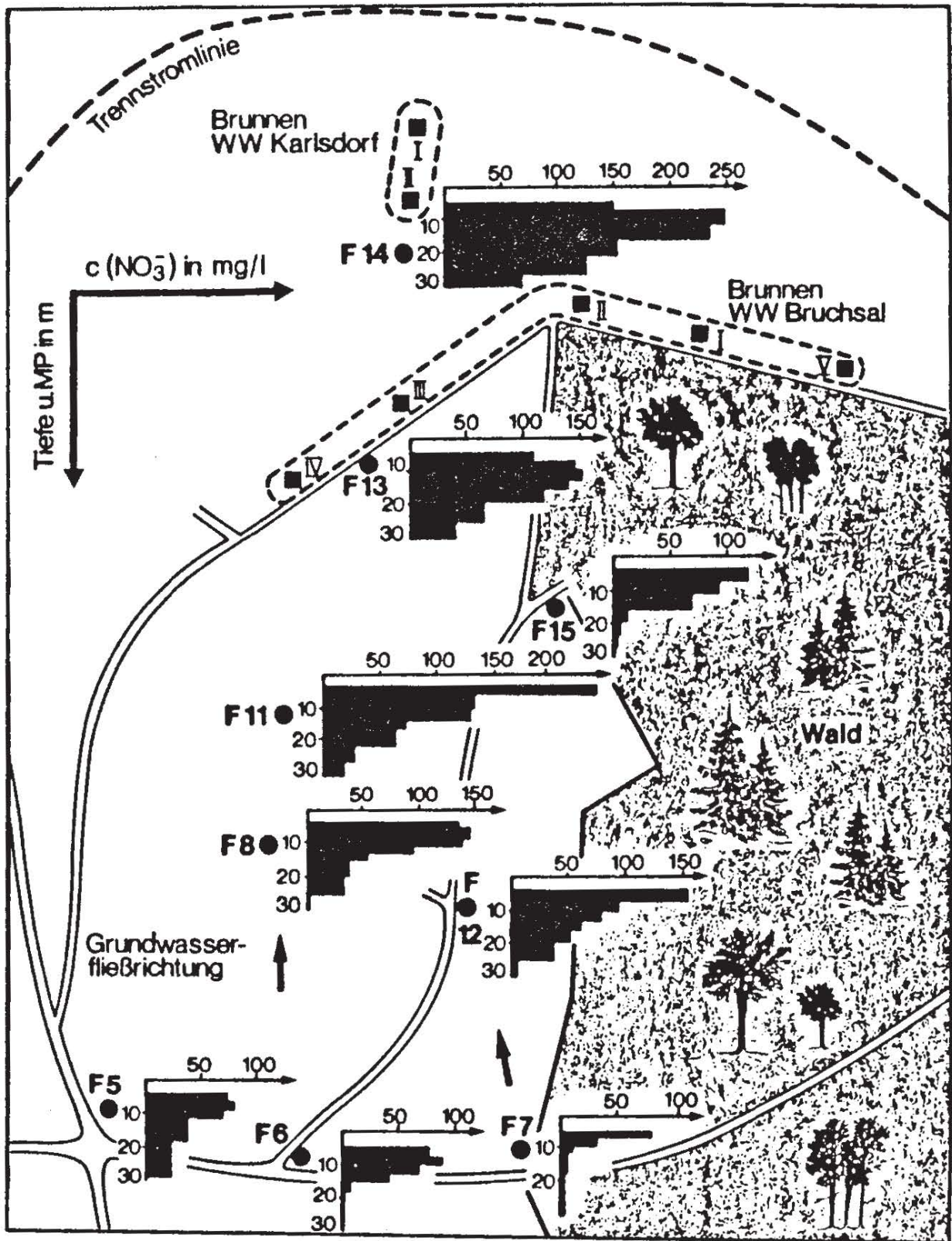
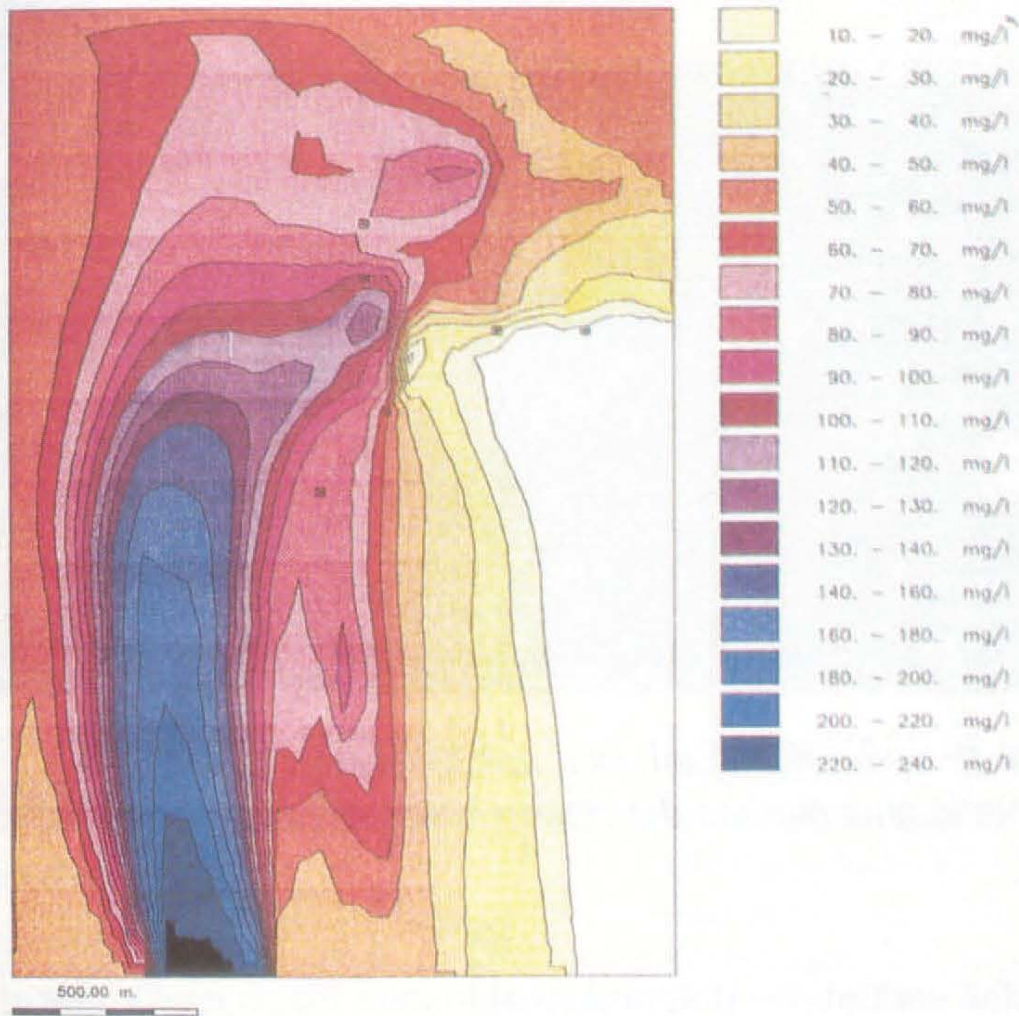


Bild 10: Fallstudie Bruchsal-Karlsdorf: Gemessene Nitratbelastung im Untersuchungsgebiet

port und Umsetzungen sowie Nitratkonzentrationen im entnommenen Rohwasser zu erfassen und mit Hilfe eines numerischen Modells Nitratbilanzen aufzustellen. Bild 10 zeigt beispielhaft gemessene Nitrat-



KONZENTRATIONSVERTEILUNG

ZEIT : 2281.10 d
 POROSITÄT : 0.15
 ALPHA LONG. : 35.00 m
 ALPHA TRAN. : 5.00 m
 DIFFUSION : 0.10E-08 m²/d
 CHEM. ABBAU : 0.00E+00 /d

Simulierte Nitratkonzentrationsverteilung im Grundwasser:
 April 1976

Bild 11: Fallstudie Bruchsal-Karlsdorf: Simulierte räumliche Nitratverteilungen im Untersuchungsgebiet, April 1976

profile an verschiedenen Beobachtungspegeln, und *Bild 11* zeigt eine berechnete Konzentrationsverteilung im Einzugsgebiet zu einem Zeitpunkt. Mit Hilfe des entsprechend geeichten Modells läßt sich dann die zeitliche Entwicklung der Nitratkonzentrationen im Feld und an den Brunnen nachvollziehen und prognostizieren [4].

Dieses Fallbeispiel und auch die anderen Erfahrungen der Forschergruppe haben uns deutlich vor Augen geführt, daß das im Anwen-



Bild 12: Entwicklung neuer Meß- und Erkundungstechniken: Felduntersuchungen auf der Horkheimer Insel [1, 8]

dungsfall verfügbare Datenmaterial in aller Regel weit hinter den Erfordernissen an die Modelleingabedaten zurückbleibt. Es zeigt sich stets eine große Diskrepanz zwischen den Erfordernissen an die Modelleingabedaten und dem verfügbaren Naturdatenmaterial. Dies betrifft die Erfassung des Strömungsfelds, der anfänglichen Konzentrationsverteilung, des Schadstoffeintrags, sowie die Quantifizierung der Dispersions-, Adsorptions- und Reaktionsparameter und ganz allgemein die Interpretation von Felddaten. Für etliche dieser Größen können nur Schätzwerte angenommen werden. Dies bedeutet zum einen, daß die Modellanpassung auf den Anwendungsfall (Modelleichung und Validierung) für Transportmodelle erheblich schwieriger ist als für eine reine Strömungsberechnung, und zum anderen wird die Notwendigkeit deutlich, die Meß- und Erkundungstechnik zu verbessern. Die Entwicklung datenkompatibler Transportmodelle erfordert komplementäre Entwicklungen der Meß- und Erkundungstechnik (Bohrlochhydraulik und Probenahmetechnik). Dies hat den Anstoß für entsprechende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gegeben (siehe *Bild 12*), auf die heute jedoch nicht weiter eingegangen werden kann [1, 8].

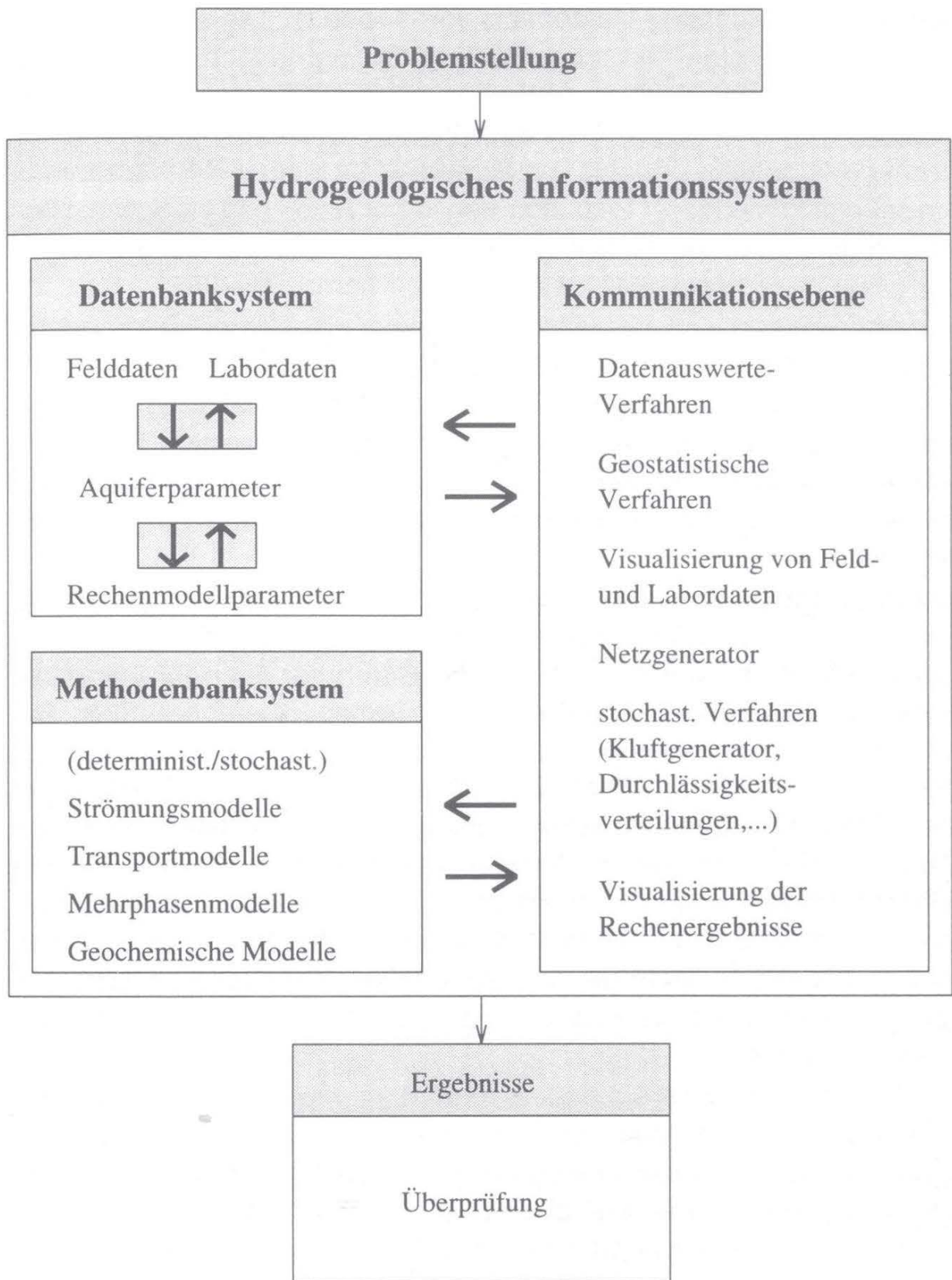


Bild 13: Hydrogeologisches Informationssystem

Als Fazit läßt sich zur Anwendung von Transportmodellen festhalten, daß das numerische Modellinstrumentarium für großräumige Transportprozesse in Porengrundwasserleitern erfolversprechend ist, so-

fern eine hinreichende Datenbasis vorhanden ist. Die entscheidende Limitierung für die praktische Anwendung liegt jedoch in der Ermittlung der effektiven (im Untersuchungs-/Diskretisierungsmaßstab wirksamen) Transport- und Reaktionsparameter [7]. Eine Validierung von Transportmodellen anhand von Felddaten ist wegen der Vielzahl nur unzulänglich meßbarer Einflußgrößen in der Regel nicht möglich. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, kontrollierte Laborexperimente durchzuführen und zur Modellvalidierung heranzuziehen.

Aufgrund dieser Limitierungen wird die Anwendbarkeit stark beschränkt, und dementsprechend besitzen wasserwirtschaftliche Transportmodelle oft nur geringe Prognosefähigkeit. Schließlich ist noch anzumerken, daß die vorgenannten Aussagen nur für großräumige Transportvorgänge gelten – die komplexen Transportprozesse im Nahbereich lokaler Schadstoffquellen können derzeit nur unzureichend modelliert werden.

Erschwerend für den praktischen Einsatz von Transportmodellen wirkt sich aus, daß die maßgeblichen Parameter eine starke räumliche Variabilität aufweisen. Natürlich erlaubt der Computer auch für komplexe Parameterverteilungen entsprechende Transportberechnungen. Die Verfahren der Geostatistik und der stochastischen Simulation bieten hier neue weiterführende Möglichkeiten [10], und die Entwicklungen der Computergraphik erlauben anschauliche Visualisierungen von Ausbreitungsvorgängen in flächiger oder räumlicher Darstellung. Ob all der schönen neuen Welt der bunten Computergraphik sollten wir jedoch nicht vergessen, immer kritisch zu hinterfragen, auf welchen real gemessenen Daten die Aussagen fußen, denn letztlich bestimmt dieses meist schwächste Glied in der Kette die Qualität und Aussagekraft der Modelle.

Die Entwicklung des Prognoseinstrumentariums geht heute hin zu umfassenden hydrogeologischen Informationssystemen (*Bild 13*). Solche Systeme müssen dabei in vergleichbarer Qualität die Methoden und die Meßdaten in einer logischen und nachvollziehbaren Weise verknüpfen und in einer benutzerfreundlichen Form darbieten.

4 Forschung und Entwicklung effizienter Sanierungstechnologien

Die überdimensionalen Aufgaben der Altlastensanierung stellen eine Herausforderung für die Grundwasserforschung dar. Angesichts oft-

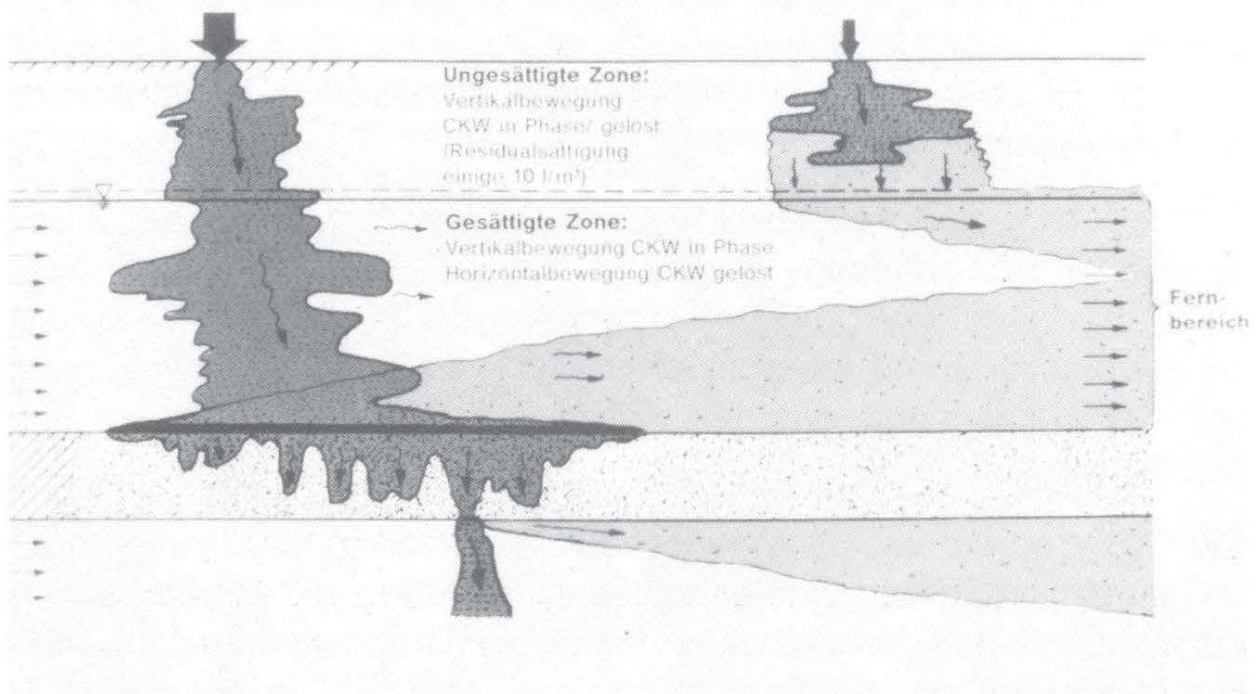


Bild 14: Versickerung und Ausbreitung chlorierter Kohlenwasserstoffe im Untergrund im Nahbereich des Schadensherdes [5]

mals unrealistischer und technisch garnicht erreichbarer Forderungen nach Sanierungszielen und angesichts der volkswirtschaftlichen Dimensionen (Schätzungen in der Größenordnung von 150 Milliarden DM) erscheint es dringend notwendig, technisch-wissenschaftlich begründete Ansätze für Sanierungsprioritäten und Sanierungsziele zu formulieren und Sanierungsverfahren zu überprüfen.

Bei lokalen Grundwasserschadensfällen kann grundsätzlich unterschieden werden (*Bild 14*) zwischen Schadensherd und Schadstofffahne (Nahfeld und Fernfeld). Schadstoffe versickern zunächst meist in Phase und sind dann nach relativ kurzer Zeit weitgehend immobil. Der Schadensherd bildet somit im Untergrund eine andauernde Quelle, von der aus Schadstoffe an das vorbeiströmende Sickerwasser und Grundwasser oder auch an die Bodenluft abgegeben werden. Das Fernfeld der Schadstofffahne kann sich im Abstrom über große Distanzen (Kilometer) erstrecken.

Hydraulische Sanierungsverfahren erfassen üblicherweise die Schadstofffahne, die einer entsprechenden Reinigung unterzogen werden kann. Entsprechendes gilt auch für die Verfahren der Bodenluftabsaugung bei leichtflüchtigen Substanzen. Auf diese Weise wird zwar

eine weitere Ausbreitung der Schadstoffe verhindert, aber solche Maßnahmen müssen oft über sehr viele Jahre aufrecht erhalten bleiben, da vom Schadensherd langfristig eine kontinuierliche Nachlieferung an Schadstoffen erfolgt.

Eine effektive und zeitgerechte Sanierung muß deshalb auch den Schadensherd erfassen. Hierbei ist das Ziel, entweder die Schadstoffe aus dem Untergrund zu entfernen oder aber durch geeignete Sicherungsverfahren so zu fixieren, daß eine weitere Auswaschung und Ausbreitung unterbunden wird. Dies sind sehr komplexe und schwierige Aufgaben.

Die Optimierung und die Weiterentwicklung von in-situ Sanierungsverfahren und Erkundungstechniken ist das Ziel einer neuen anwendungsorientierten „Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung“ VEGAS, die derzeit an der Universität Stuttgart entsteht [6]. Diese Versuchseinrichtung bietet die Möglichkeit, großmaßstäbliche Kontaminations- und Sanierungsexperimente im halbtechnischen Maßstab unter naturnahen Bedingungen durchzuführen und somit auch unter naturähnlichen Bedingungen die Wirkungsweise und die Effizienz verschiedener Sanierungstechnologien zu testen und zu quantifizieren. Sie besteht aus einer Versuchshalle mit mehreren großdimensionalen Versuchsständen für Ausbreitungs- und Sanierungsexperimente mit Schadstoffen in Modellaquiferen (Nahfeld) mit folgenden Zielen:

- Bestimmung von Transportparametern/Entwicklung von Meß- und Erkundungstechniken
- Validierung von numerischen Transportmodellen
- Bewertung und Optimierung von in-situ-Sanierungsverfahren
- Begleitung aktueller Schadensfälle (Untersuchungen an Originalmaterialien)

Die Versuchseinrichtung VEGAS, die allen Interessenten aus dem Bundesgebiet zur Durchführung von Experimenten zur Verfügung stehen wird, kann zum Brückenschlag zwischen dem kleinmaßstäblichen Laborexperiment einerseits und der komplexen Feldsituation andererseits beitragen und so eine bedeutende Forschungslücke schließen.

Die Versuchshalle VEGAS wird gemeinsam vom BMFT und vom Land Baden-Württemberg finanziert und befindet sich derzeit im Aufbau

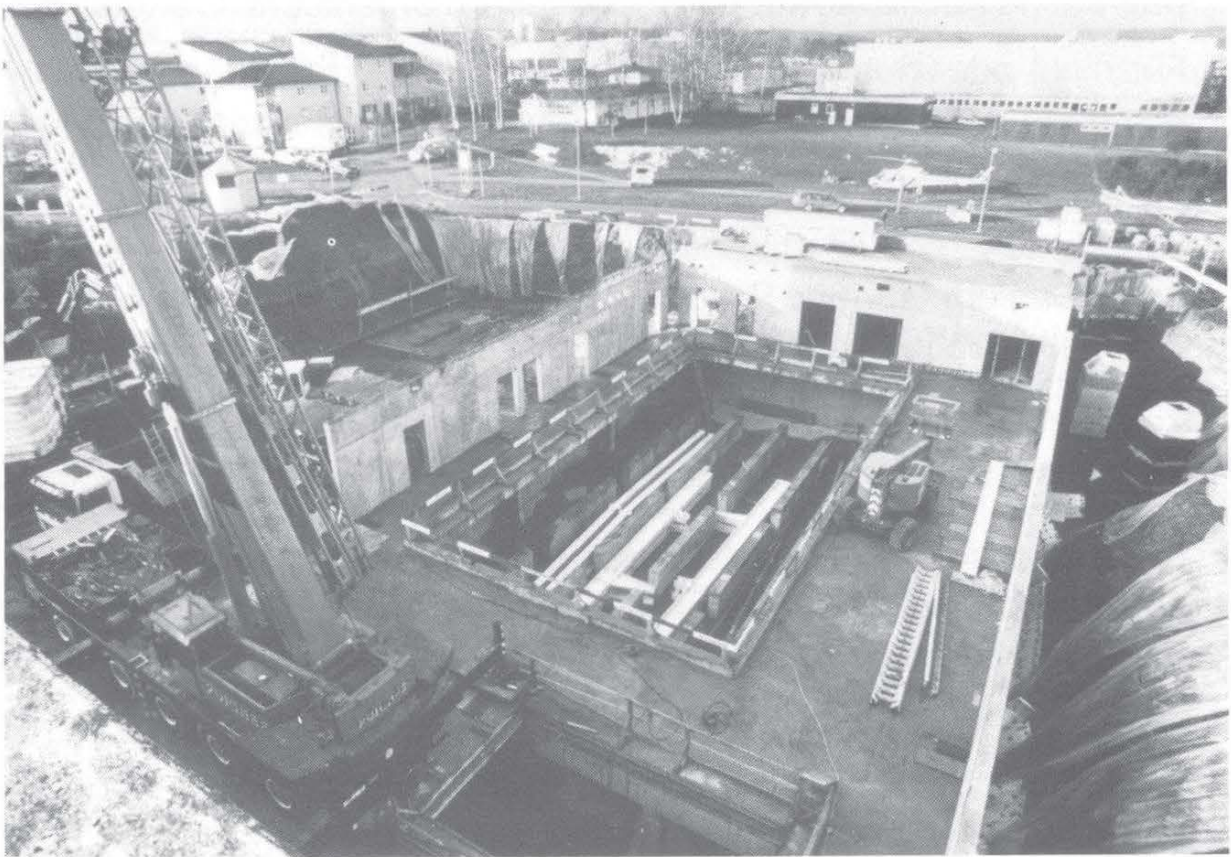
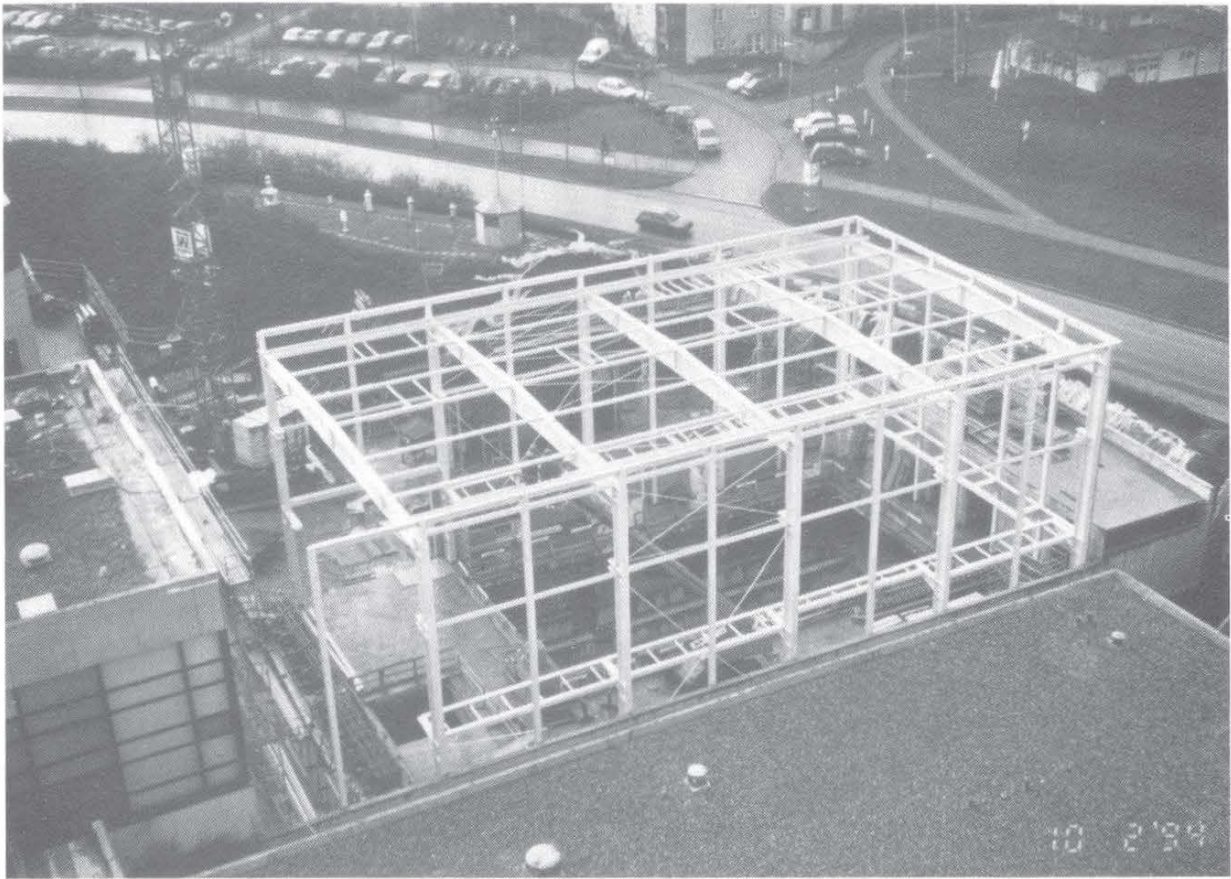


Bild 15: VEGAS-Versuchshalle im Bau (März 1994)

(Bild 15). Der Versuchsbetrieb soll im Frühjahr 1995 aufgenommen werden.

5 Schlußfolgerungen

Die wesentlichen Punkte dieser Tour d'Horizon können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Deckschichten und ungesättigte Zone spielen eine wesentliche Rolle bei der Schadstoffelimination. Die Berücksichtigung der Grundwasserüberdeckung bei der Schutzzonenbemessung erscheint aufgrund der großen räumlichen und zeitlichen Variabilität der maßgeblichen Einflußgrößen problematisch.
- Im Bereich des Grundwassers sind sowohl fließstreckenabhängige Prozesse als auch zeitabhängige Vorgänge für die Reinigungswirkung von Bedeutung, die bei der Schutzzonenbemessung berücksichtigt werden müssen.
- Das Konzept der engeren Schutzzone gilt für Bakterien, Viren und pathogene Keime, sowie leicht abbaubare organische Fremdstoffe.
- Für nicht oder nur schwer abbaubare Substanzen kann eine umfassende Schutzwirkung nur für das gesamte Einzugsgebiet erreicht werden.
- Grundwasserschutz muß neben dem Präventivbereich auch adäquate Sanierungs- und Rehabilitationsmaßnahmen für anthropogen belastete Grundwasserleiter einschließen.
- Ziel der Grundwasserbewirtschaftung ist eine dauerhafte und umweltgerechte Entwicklung (sustainable development).
- Die wissenschaftlichen Methoden und Konzepte für großräumige Transportprozesse in Porengrundwasserleitern sind hochentwickelt (Numerische Modelle für Strömung, Transport und Chemie, Geostatistik und Stochastik, Geoinformationssysteme, etc.).
- Die praktische Nutzung von Grundlagenwissen – zum Beispiel zur Prognose des Untergrundverhaltens einer Kontamination mit Hilfe von Transportmodellen – ist aufgrund der meist fehlenden Daten nur in Ausnahmefällen möglich.

- Mit der Weiterentwicklung der Methoden und Prognoseinstrumente geht ein entsprechend erhöhter Anspruch an Qualität und Quantität der Naturmeßdaten Hand in Hand.
- Eine Verbesserung der Umsetzung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse und Methoden in die Praxis erfordert
 - benutzerfreundliche Modellwerkzeuge,
 - Schaffung einer verbesserten Datenbasis,
 - flexiblere Handhabung in der Praxis (technische Regelwerke).

Literatur

- [1] Hofmann, B.; Kobus, H.; Ptak, T.; Schad, H.; Teutsch, G.: „Schadstofftransport im Untergrund, Erkundungs- und Überwachungsmethoden“, Abschlußbericht, 1. Projektphase, KFK-PWAB 9, Karlsruhe, 1991, 128 S.
- [2] Kobus, H.: „Grundwasserbelastungen, Sanierungsbeispiele und Schutzmaßnahmen“, Die Geowissenschaften, 6. Jahrgang, Nov. 1988, S. 330 – 336
- [3] Kobus, H.: contributions to „Hydraulics and the Environment, Partnership in Sustainable Development“. IAHR Workshop on 'Matching hydraulics and ecology in water systems', Utrecht, 14 – 16 March 1991, IAHR-Journal, extra issue, Vol. 29, 1991, S. 8 – 14 und S. 49 – 58
- [4] Kobus, H. (Hrsg.): „Schadstoffe im Grundwasser I: Wärme- und Schadstofftransport im Grundwasser“, DFG-Forschungsbericht, VCH-Verlag, Weinheim, 1992
- [5] Kobus, H.: „Schadstoffbelastung des Grundwassers und Schutzmaßnahmen für die Wasserversorgung“, Wechselwirkungen, Jahrbuch 1991 aus Forschung und Lehre der Universität Stuttgart, 11/92, S. 44 – 55
- [6] Kobus, H.; Cirpka, O.; Barczewski, B.; Koschitzky, H.-P.: „Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung VEGAS – Konzeption und Programmrahmen“, Mitteilungsheft Nr. 82, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Oktober 1993, 89 S.
- [7] Kobus, H.: „Prognoseinstrumente und Meßdatenrealität in der Grundwasserwirtschaft“ in DFG-Mitteilung 'Perspektiven der Wasserforschung' (in Vorbereitung)
- [8] Marschall, P.: „Die Ermittlung lokaler Stofffrachten im Grundwasser mit Hilfe von Einbohrloch-Meßverfahren“, Mitteilungsheft Nr. 79, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1993, 161 S.
- [9] Matthes, G. (Hrsg.): „Lebensdauer von Bakterien und Viren in Grundwasserleitern“, in: Umweltforschungsplan des Bundesministers des Innern – Wasserwirtschaft, Wirkungen/Ökologie, Forschungsbericht 102 02 202/01-07, UBA-FB 83-042, MATERIALIEN 2/85, Erich Schmid Verlag, 1985
- [10] Ptak, T.: „Stofftransport in heterogenen Porenaquiferen: Felduntersuchungen und stochastische Modellierung“, Mitteilungsheft Nr. 80, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1993, 176 S.

[11] Schmidhalter, U.; Alfoeldi, T.; Oertli, J.: „Repräsentativität von N_{\min} -Untersuchungen“, Landwirtschaft Schweiz, Band 4 (8): 1991, S. 431 – 435

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. H. Kobus
Institut für Wasserbau
der Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 61
70569 Stuttgart