

# 1 Numerische Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser: Forschungsprogramm und Bedeutung für die Praxis

Numerical modelling of large-scale heat- and contaminant transport in groundwater: research program and practical relevance

*Helmut Kobus*

## Kurzfassung

Die Planung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen zum Grundwasserschutz setzt Kenntnisse über Ausbreitungs- und Transportvorgänge im Untergrund voraus. Eine interdisziplinäre Forschergruppe hat sich deshalb das Ziel gesetzt, Berechnungsgrundlagen für den Transport von Wärme und Inhaltsstoffen in Grundwasserleitern zu erarbeiten und diese an Fallbeispielen für die Anwendungsbereiche Wärme, leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe und Nitrat zu erproben. Die Forschungsarbeiten wurden in sechs Teilprojekten an den Universitäten Stuttgart, Hohenheim und Karlsruhe durchgeführt und durch drei stoffbezogene Fallstudien ergänzt. Primäres Ziel war die Entwicklung und Erprobung anwendungsorientierter numerischer Modelle für Strömungs- und Transportvorgänge im natürlichen Untergrund, welche mit der Art der verfügbaren Naturdaten kompatibel sind. Die Modellarbeiten wurden durch entsprechende Entwicklungen der Meß- und Erkundungstechnik ergänzt. Die Erkenntnisse aus den Forschungsarbeiten liefern Aussagen zur Einsatzfähigkeit von Transportmodellen im Grundwasserschutz und beleuchten deren Rolle als Entscheidungshilfe in der wasserwirtschaftlichen Planung, bei der Beurteilung von Grundwasserverunreinigungen und bei der Erstellung von Sanierungs- und Bewirtschaftungskonzepten.

## Summary

Management of water resources and groundwater protection requires knowledge about spreading and transport processes in the subsurface. An interdisciplinary research group has therefore pursued the goal to provide calculation methods for the transport of heat and substances in aquifers and to test these methods on applied case studies about the subsurface spreading of heat, volatile chlorinated hydrocarbons and nitrates. The research work was pursued in six individual projects at the Universities of Stuttgart, Hohenheim and Karlsruhe, and it was supplemented by three substance-oriented case studies. The primary goal was the development and testing of application-oriented numerical models for flow and transport processes in natural aquifers, which are compatible with the available prototype data. The model developments have been supplemented by corresponding developments of the measurement and exploration techniques. The results of the research projects provide information about the applicability of transport models in groundwater protection and they illuminate the role of such models as an aid in decision-making in water resources planning, in the assessment of groundwater contaminations and in the development of cleanup and management concepts.

This introductory chapter describes the overall topic and research goal as well as the composition of the research group. The general frame of the research is outlined, and the specific objectives of the individual projects and of the various joint case studies are described. Also, the specific role of numerical transport models and their practical relevance for water resources management tasks is delineated.



# 1.1 Einleitung

## 1.1.1 Thema und Forschungsziel

Zahlreiche Beobachtungen über großräumige anthropogene Beeinträchtigungen der Grundwasserqualität sind in jüngerer Zeit in das Interesse der Öffentlichkeit gerückt. Im Hinblick auf die Erhaltung der natürlichen Grundwasserqualität und auf die Nutzung des Grundwassers für die Trinkwasserversorgung sind insbesondere anthropogene Veränderungen der Grundwassertemperaturen, Kontaminationen durch organische Substanzen, vor allem durch chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW), sowie die Belastung durch Nitrat und Pestizide von aktuellem und vorrangigem Interesse. In diesem Zusammenhang sieht sich die Wasserwirtschaft zunehmend vor neue Aufgaben gestellt, deren Lösung eine quantitative Beschreibung und Vorausberechnung der Ausbreitung von Wärme und Schadstoffen im Grundwasser voraussetzt.

Die Erarbeitung der hierfür erforderlichen Berechnungsgrundlagen ist eine komplexe, fachübergreifende Aufgabe. Deshalb hat sich im Laufe des Jahres 1983 eine interdisziplinäre Forschergruppe formiert mit dem Ziel, Berechnungsgrundlagen für den Transport von Wärme und Inhaltsstoffen in Grundwasserleitern zu erarbeiten, diese an Fallbeispielen zu erproben und schließlich beim Erstellen von Konzepten zu Sanierung, Bewirtschaftung und Schutz von Grundwasserleitern einzusetzen. Aufbauend auf den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Stofftransports waren Modellkonzepte zu entwickeln, die im Hinblick auf die praktische Anwendung stets auf Kompatibilität mit der Art der verfügbaren Naturdaten ausgerichtet sein sollten. Ziel war es, für den Transport von Wärme, CKW und Nitrat einsatzreife Modelle zu erarbeiten, wobei die hierfür notwendigen theoretischen, numerischen und experimentellen Untersuchungen von Anfang an fortlaufend an Naturbeobachtungen aktueller Problemfälle orientiert waren.

Transportmodelle ermöglichen eine integrierende Betrachtung der strömungsmechanischen, hydrogeologischen, chemisch-biologischen und bodenkundlichen Aspekte und stellen Entscheidungshilfen dar für die langfristige Erhaltung oder Wiederherstellung der Grundwasserqualität und für die Sicherung der Trinkwasserversorgung aus Grundwasser, insbesondere für

- Planung von Grundwasser-Bewirtschaftungsmaßnahmen im Hinblick auf die Grundwasserqualität und den Grundwasserschutz,
- Prognose der zu erwartenden Auswirkungen von Grundwasserkontaminationen,
- Planung und Bemessung von Abwehr- und Sanierungsmaßnahmen.

Die wesentlichen Ergebnisse, die von der Forschergruppe in der Zeit ihres Zusammenwirkens erarbeitet wurden, sind in dem vorliegenden Band zusammengefaßt.

## 1.1.2 Forschergruppe

Zur Verfolgung des Forschungsziels haben sich Wissenschaftler an den Universitäten Stuttgart, Hohenheim und Karlsruhe zu einer interdisziplinären Forschergruppe zusammengefunden zu einem gemeinsamen 6-Jahres-Programm unter dem Thema „Numerische Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser“. An dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) in den Jahren 1984 bis 1990 finanziell geförderten Forschungsprogramm waren insgesamt acht Antragsteller mit sechs Teilprojekten beteiligt. Die Forschungsarbeiten wurden an folgenden Instituten durchgeführt:

- Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart  
Sprecher der Forschergruppe: H. Kobus  
Projektleiter: B. Barczewski, W. Kinzelbach, H. Kobus
- Institut für Bodenkunde und Standortslehre der Universität Hohenheim  
Projektleiter: R. van der Ploeg, E. Schlichting†
- Bereich Wasserchemie am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe  
Projektleiter: F. Frimmel, U. Rohmann, H. Sontheimer.

Ein wesentliches Element des Forschungsprogramms war die parallele Inangriffnahme und zeitgleiche Durchführung von Fallstudien an verschiedenen Standorten, an denen die Einsatzfähigkeit der Modelle erprobt wurde. Die Durchführung dieser Fallstudien wurde von jeweils unterschiedlichen Institutionen finanziert. Außerdem waren neben den Mitgliedern der Forschergruppe an diesen Fallstudien auch weitere Institutionen beteiligt:

### **Fallstudien Wärme:**

Feldversuche im Emmental wurden vom Wasser- und Energiewirtschaftsamt (WEA) des Kantons Bern/Schweiz und vom Ingenieur- und Studienbüro A. Werner, Burgdorf/Schweiz, mit finanzieller Unterstützung durch den Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung bearbeitet.

### **Fallstudien CKW:**

Schon frühzeitig wurden Untersuchungen von CKW-Schadensfällen unter Beteiligung zahlreicher Landesbehörden und Forschungsinstitute unter Federführung und Finanzierung durch das Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten (MELUF) Baden-Württemberg durchgeführt. Die Fallstudie Lobdengau, an der das Wasserwirtschaftsamt Heidelberg mitwirkte, wurde vom Ministerium für Umwelt (UM) Baden-Württemberg finanziell unterstützt.

### **Fallstudien Nitrat:**

An einem umfassenden Untersuchungsprogramm zur Nitratproblematik war neben den Mitgliedern der Forschergruppe die Landwirtschaftliche Untersuchungs- und



Forschungsanstalt Baden-Württemberg (LUFA) Augutenberg sowie die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Karlsruhe aktiv beteiligt (Kobus und Zilliox 1988). Die Felduntersuchungen wurden insgesamt durch das Land Baden-Württemberg finanziert.

Die Arbeiten der Forschergruppe waren stets über die Senatskommission Wasserforschung der Deutschen Forschungsgemeinschaft in den größeren Rahmen der Forschungsförderung eingebettet und im Detail mit parallel laufenden Schwerpunktprogrammen der DFG abgestimmt (Kobus 1987, 1990).

## 1.2 Forschungsprogramm

### 1.2.1 Rahmenkonzept

Das primäre Ziel der Forschergruppe war es, anwendungsorientierte Modellbausteine zur Berechnung von Strömungs- und Transportvorgängen im natürlichen Untergrund zu entwickeln und zu erproben. Hierzu wurden aufbauend auf den strömungsmechanischen, hydrologischen, physikalischen, chemischen und mikrobiologischen Grundlagen des Stofftransports Modellkonzepte entwickelt und anhand von Laboruntersuchungen und Feldmessungen verifiziert und validiert. Besonderes Augenmerk galt im Hinblick auf die praktische Anwendung stets der Anforderung, daß die Modelle jeweils mit der Art der verfügbaren Naturdaten kompatibel sein müssen.

Das Forschungsprogramm wurde von Anfang an auf die Untersuchung der Ausbreitungs-, Umwandlungs- und Transportvorgänge für drei Anwendungsbereiche beschränkt, die einerseits wegen ihrer großen und unmittelbaren Bedeutung für die wasserwirtschaftliche Praxis von Interesse waren, andererseits auch einer systematischen konzeptionellen Zuordnung genügten:

- Wärmeenergie,
- chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW);
- Nitrat.

Die wissenschaftliche Fragestellung betrifft folgende Aspekte:

- Verbesserung der Modellansätze für die durch geologische Aquiferinhomogenitäten bedingte Makrodispersion;
- Entwicklung von Wärmetransportmodellen für regionale Fragestellungen;
- Entwicklung von Transportmodellen mit erweiterten Adsorptions- und Reaktions-terminen zur Berücksichtigung von Gleichgewichts- und Ungleichgewichtszuständen und mehreren miteinander reagierenden Wasserinhaltsstoffen;

- Entwicklung von Stickstoffhaushaltsmodellen für die ungesättigte Zone;
- Identifizierung der wesentlichen Einflußgrößen der natürlichen Denitrifikation;
- Analyse der datenbedingten Unsicherheit von Modellaussagen und deren stochastische Interpretation als Voraussetzung für die korrekte Anwendung von Modellen;
- Konzeption zur meßtechnischen Erfassung und Behandlung großräumiger Grundwasserkontaminationen;
- Verbesserung der Meß- und Probenahmetechnik für Grundwasserbeschaffenheitsmessungen.

Die praktische Bedeutung der Arbeiten liegt angesichts der zahlreichen Problemfälle in der Praxis auf der Hand. Es werden einsatzfähige Transportmodelle benötigt, die eine integrierende und koordinierte Betrachtung der strömungsmechanischen, hydrogeologischen, hydrochemischen und bodenkundlichen Aspekte ermöglichen. Solche Modelle bieten eine Orientierung für Naturmeßprogramme und gestatten Prognosen über das weitere Ausbreitungsverhalten. Insofern sind sie unerlässlich für die Planung von Bewirtschaftungsmaßnahmen sowie von hydraulischen Abwehr- und Sanierungsmaßnahmen.

Veranlassung zur Einrichtung der Forschergruppe gab die Erkenntnis, daß – im Gegensatz zu numerischen Grundwasserströmungsmodellen – geeignete Transportmodelle für einen routinemäßigen Einsatz in der Praxis nicht zur Verfügung standen. Dies gilt sowohl für die unzulängliche Erfassung der Dispersion bzw. der geologischen Inhomogenitäten als auch für die gleichzeitige Simulation mehrerer miteinander reagierender Wasserinhaltsstoffe. In der Regel besteht auch eine große Diskrepanz zwischen den Erfordernissen an die Eingabedaten und dem im allgemeinen sehr begrenzten Naturdatenmaterial. Das betrifft das Strömungsfeld, die anfänglichen Konzentrationsverteilungen, den Schadstoffeintrag, die Adsorptions- und Reaktionsparameter sowie auch die Interpretation von unter Feldbedingungen gewonnenen Meßdaten. Das Problem der Modelleichung und Validierung ist damit gegenüber der als Basis dienenden reinen Strömungsmodellierung erheblich erschwert.

Die Entwicklung von Transportmodellen umfaßt als schwerpunktmäßige Arbeitsmethode zunächst theoretische und numerische Arbeiten sowie systematische experimentelle Laboruntersuchungen. Das wissenschaftliche Programm hat sich jedoch im Lauf der Zeit konsequenterweise in der Richtung weiterentwickelt, daß als eine notwendige Ergänzung das Thema Bohrlochhydraulik und Probenahmetechnik aufgegriffen wurde. Es wurde erkannt, daß die Entwicklung anwendungsreifer, datenkompatibler Transportmodelle komplementäre Entwicklungen der Meß- und Erkundungstechnik erfordert und sich auf konkrete Meßerfahrungen vor Ort in der Natur abstützen muß. Deshalb sind Fortschritte in der anwendungsorientierten Modellierung von Transportvorgängen im Grundwasser nur erzielbar im abgewogenen Zusammenspiel von theoretisch-numerischen Untersuchungen, systematischen Experimenten im Labor und gezielten Naturmessungen (Kobus 1987).

Die Modellkonzeption umfaßt mehrere eigenständige Teilmodelle als Bausteine. Die Modellierung der ungesättigten Zone ist sowohl im Hinblick auf Wärmeaustauschpro-



zesse als auch auf den Schadstoffeintrag in die gesättigte Zone von Bedeutung (Huwe und v.d. Ploeg 1988). Der Transport im Grundwasserleiter wird vorwiegend horizontal-eben modelliert und umfaßt die Bausteine Strömungsmodell, Adsorptionsmodell und Reaktionsmodell (Kinzelbach 1987). Inhomogenitäten im vertikalen Aufbau des Grundwasserleiters und vertikale Austauschprozesse werden durch Mehrschichtenansätze bzw. die getrennte Behandlung einer stationären und einer bewegten Phase in erster Näherung erfaßt.

Das Untersuchungsprogramm wurde für drei exemplarische Anwendungsbereiche von unterschiedlicher Komplexität konzipiert:

- Transport und Ausbreitung von Wärmeenergie aus Warm- und Kaltwasserversickerungen oder lokalen Wärmeenergiequellen und -senken: hier erfolgt der Eintrag meist punktförmig (bzw. bei Gewässern linienförmig) und ist bei anthropogenen Einleitungen in der Regel bekannt. Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Wärmetransports sind ebenfalls bekannt.
- Transport und Ausbreitung von leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW) aus kontaminierten Standorten: hier handelt es sich gleichfalls um einen meist „punktförmigen“, lokalen Stoffeintrag. Allerdings ist in den meisten Schadensfällen der Zeitpunkt des Eintrags und die eingetragene Schadstoffmenge (sowie oft auch der Eintragsort) nicht oder nur unzureichend bekannt und muß daher abgeschätzt werden. Die Adsorptions- und Abbaueigenschaften sind ebenfalls nicht oder nur unzureichend bekannt, sind jedoch für die Ausbreitung und den Transport im allgemeinen nicht dominierend.
- Transport und Ausbreitung von Nitrat aus landwirtschaftlicher Nutzung: der Stoffeintrag erfolgt diffus mit der Grundwasserneubildung über die ungesättigte Zone aus der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche. Neben den komplexen Eintragsmechanismen sind auch die Transport- und Reaktionseigenschaften im Grundwasserleiter unbekannt und von komplexer Natur (Rohmann und Sontheimer 1985; Kobus und Zilliox 1988).

Das Instrumentarium der Grundwassertransportmodelle ist so aufbereitet, daß eine Übertragung und Anwendung in analoger Weise auch für andere Stoffgruppen über die spezifischen Stoffgruppen der Fallstudien hinaus möglich erscheint. Durch die strenge Orientierung der Modelle an der jeweiligen Fragestellung und den zur Verfügung stehenden bzw. zu erhebenden Meßdaten ist der Realitätsbezug gesichert.

Die Erkenntnisse aus den Forschungsarbeiten liefern Aussagen zur Einsatzfähigkeit von Transportmodellen im Grundwasserschutz und beleuchten deren Rolle als Entscheidungshilfe in der wasserwirtschaftlichen Planung bei der Beurteilung und Behandlung von Grundwasserverunreinigungen.

## 1.2.2 Teilprojekte

Das wissenschaftliche Programm wurde in sechs parallel laufenden Teilprojekten bearbeitet, die jeweils ihre eigene wissenschaftliche Zielsetzung verfolgten und dabei gleichzeitig auf das gemeinsame Ziel ausgerichtet waren (Kobus 1990). Die Teilprojekte, denen jeweils ein Kapitel dieses Buches zugeordnet sind, werden nachfolgend kurz charakterisiert.

### **Hydrodynamische Dispersion in Grundwasserleitern**

Projektleiter: H. Kobus

Beteiligte Wissenschaftler: K. Spitz, M. Herr, G. Schäfer

Das Ziel numerischer und experimenteller Grundlagenuntersuchungen war die Erarbeitung verbesserter Ansätze für die vertikale Quer- und die Längsdispersion in natürlichen Grundwasserleitern, wenn diese geologische Schichtungen oder zufällig verteilte Inhomogenitäten aufweisen. Die Längsdispersion in geologischen Schichtenstrukturen wird hierbei als kombinierte Wirkung von differentieller Konvektion und Querdispersion betrachtet. Für den praktischen Einsatz von Grundwassermodellen ist eine wirklichkeitsnahe Berücksichtigung des makrodispersiven Transports erforderlich (Kapitel 2).

### **Numerische Modellierung des Wärmetransports und Wärmehaushalts in Grundwasserleitern**

Projektleiter: H. Kobus (federführend), W. Kinzelbach

Beteiligte Wissenschaftler: T. Söll, M. Berg

Gegenstand des Vorhabens war die Entwicklung und Validierung horizontal-ebener Mehrschichtenmodelle zur Prognose des Ausbreitungsverhaltens großräumiger Temperaturanomalien. Es wurde untersucht, inwieweit Mehrschichtenansätze eine adäquate Erfassung der vertikalen Wärmestöme und damit der raum-zeitlichen Entwicklung von Temperaturfeldern erlauben, wobei auch der Frage der Datenerhebung in der Natur und ihrer Interpretation im Modell große Bedeutung zukommt. Ziel der Untersuchungen war der Einsatz von Wärmetransportmodellen als Planungshilfe für Fragen der regionalen Wärmebewirtschaftung von Grundwasserleitern insbesondere in Gebieten mit intensiver Nutzung (Kapitel 3).

### **Numerische Modellierung des großräumigen Transports von Schadstoffen im Grundwasser unter Berücksichtigung von Adsorption und chemischen Reaktionen**

Projektleiter: W. Kinzelbach (federführend), H. Kobus

Beteiligte Wissenschaftler: J. Herzer, W. Schäfer, B. Kohane

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein numerisches Schadstofftransportmodell für horizontal- oder vertikal-ebene Betrachtungen der gesättigten Zone entwickelt. Das



Modell, das sich für unterschiedliche Stoffe eignet, ist modular aufgebaut und enthält Optionen für Adsorption im Gleichgewicht, Adsorption im Ungleichgewicht sowie für mehrere chemisch wechselwirkende Wasserinhaltsstoffe. Am Beispiel des Nitrats wurde untersucht, in welcher Näherung die Modellierung des Transports mehrerer wechselwirkender Wasserinhaltsstoffe im Feld möglich ist. Das Modell wurde auf einen synthetischen Fall des Ionen- und Wasserinhaltsstoffs und zwei Feldbeispiele angewandt. Für die Nitratfallstudien wurden der Stoffeintrag und das Reaktionsverhalten in den beiden nachfolgend aufgeführten Teilprojekten untersucht, deren Ergebnisse in das Modell eingebracht wurden (Kapitel 4).

### **Entwicklung und Validierung von Stickstoffhaushaltsmodellen für Standorte unterschiedlicher Nutzung**

Projektleiter: E. Schlichting†, R.R. van der Ploeg

Beteiligte Wissenschaftler: B. Huwe

Gegenstand des Vorhabens war die Entwicklung numerischer Modelle zur Beschreibung des langfristigen Bodenstickstoffhaushalts landwirtschaftlicher Ökosysteme. In den Modellen werden Nutzungsart (Acker- oder Grünland) und Bodenbeschaffenheit berücksichtigt. Es werden standortspezifisch der Bodenwasser- und Bodenwärmehaushalt errechnet und in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte und der Bodentemperatur Stickstoffumsetzungen und -transport im Boden beschrieben. Wichtigste Ausgabegröße der Modelle ist die kontinuierliche Nitratauswaschung aus der Wurzelzone mit dem Sickerwasser, welche den Eintragsterm für die Nitratmodellierung im Grundwasserleiter liefert. Das Modellkonzept wurde nicht nur zur Simulation üblicher landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsverfahren eingesetzt, sondern auch zur rechnerischen Überprüfung der Wirksamkeit alternativer Bewirtschaftungsverfahren zur Reduzierung der Stickstoffauswaschung (Kapitel 5).

### **Untersuchungen zur natürlichen Denitrifikation im Grundwasserleiter und deren Einfluß auf die Grundwasserzusammensetzung**

Projektleiter: H. Sontheimer, U. Rohmann, F. Frimmel

Beteiligte Wissenschaftler: M. Rödelsperger

Ziel der Untersuchungen war die Identifizierung der wesentlichen Einflußgrößen auf die Denitrifikation in Grundwasserleitern sowie eine mathematische Beschreibung der Kinetik des Nitratabbaus in Abhängigkeit von diesen Größen als Grundlage für die Modellierung des Nitrattransports im Grundwasser. Von entscheidender Bedeutung ist dabei die Art und die im Untergrund verfügbare Menge der für die denitrifizierenden Bakterien zur Oxidation verwertbaren Substrate. Darüber hinaus wird die Bakterientätigkeit durch die Milieubedingungen wie pH-Werte, Temperatur und Sauerstoffkonzentration beeinflusst (Kapitel 6).

## **Untersuchungen zur Bohrlochhydraulik: Die Bedeutung von Meßstellenausbau, Bohrlochmeßverfahren und Probenahmetechnik für die Gewinnung und Interpretation von Grundwassermeßdaten**

Projektleiter: B. Barczewski (federführend), H. Kobus

Beteiligte Wissenschaftler: V. Kaleris, P. Marschall

Gegenstand des Vorhabens waren systematische meßtechnische, experimentelle und numerische Untersuchungen mit dem Ziel, verbesserte Methoden zur Bestimmung von Stofffrachten im Grundwasser zu erarbeiten, um eine zuverlässige Datenbasis für die Modellierung des großräumigen Schadstofftransports zu schaffen. Die Ermittlung von Stofffrachten setzt die Kenntnis sowohl der vertikalen Konzentrations- als auch der Durchlässigkeitsverteilung voraus, was geeignete Techniken zur Probenahme für die Gewinnung und Interpretation von Konzentrationsmeßdaten sowie zur Messung von vertikalen Durchlässigkeitsverteilungen erfordert (Kapitel 7).

### **1.2.3 Fallstudien**

Die Konzeption, die Modellentwicklungen von vornherein an parallel laufenden Naturuntersuchungen zu orientieren und so den Realitätsbezug sicherzustellen, hat sich bewährt. Die nachfolgend skizzierten Fallstudien, denen jeweils ein Kapitel dieses Bandes gewidmet ist, stellen somit einen wesentlichen Bestandteil des Forschungsprogramms dar.

#### **Modellierung des regionalen Wärmetransports: Fallbeispiele Kaltwassereinleitung Aefligen und Emmeversickerung Kirchberg**

Im Emmental (Schweiz) wurde eine Reihe von Feldversuchen vom Wasser- und Energiewirtschaftsamt (WEA) des Kantons Bern unter Mitwirkung des Ingenieur- und Studienbüros A. Werner durchgeführt. Im Testgebiet Aefligen fanden mehrere Kaltwasserversickerungsversuche mit punktförmiger Einspeisung über einen Schluckbrunnen statt, für die in einem detaillierten Meßprogramm die resultierenden Temperaturveränderungen erfaßt wurden. Analoge Meßprogramme wurden an einer starken natürlichen linienförmigen Versickerung aus der Emme im Testareal Kirchberg durchgeführt und dokumentiert. Im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung wurden die dort gewonnenen Meßdaten mit den in Kapitel 3 dargestellten numerischen Modellen ausgewertet (Kapitel 8).



## Modellierung des regionalen Transports von chlorierten Kohlenwasserstoffen: Fallbeispiel Lobdengau

Aufgrund umfangreicher Untersuchungen in früheren Jahren hat das Land Baden-Württemberg unter maßgeblicher Mitwirkung mehrerer Mitglieder der Forschergruppe einen „Leitfaden für die Beurteilung und Behandlung von Grundwasserverunreinigungen durch leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe“ (Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten BW, Wasserwirtschaftsverwaltung, Heft 13) herausgegeben, in dem mehrere Schadensfälle exemplarisch dargestellt wurden. Für die weiterführenden Arbeiten der Forschergruppe wurde als neues Fallbeispiel eine CKW-Kontamination im Untersuchungsgebiet Lobdengau herangezogen (Kapitel 9).

## Modellierung des regionalen Transports von Nitrat: Fallbeispiel Bruchsal-Karlsdorf

Im Lauf des Jahres 1984 wurden vom Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten (MELUF) Baden-Württemberg zwei Testgebiete zur intensiven mehrjährigen Erforschung von Nitratreintrag, -umsetzung und -transport ausgewählt. Die Auswahl der Testgebiete und die Planung des Untersuchungsprogramms erfolgte in Abstimmung mit dem Forschungsprogramm der Forschergruppe. Unter der Federführung der Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFA) Augustenberg wurden verschiedene, sich gegenseitig ergänzende Meß- und Untersuchungsprogramme in den Testgebieten von den drei an der Forschergruppe beteiligten Instituten und der LUFA Augustenberg durchgeführt. (Abb 1.1). Die im Rahmen

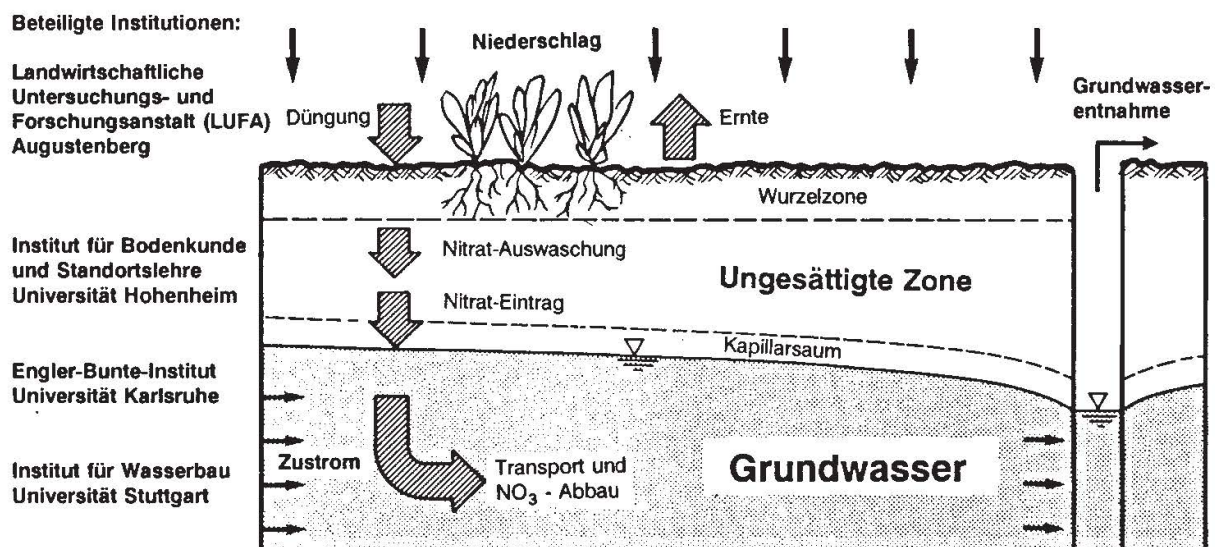


Abb. 1.1. Nitratfallstudien: Schema, beteiligte Institutionen.

Nitrate case studies: scheme, participating institutions.

dieser Fallstudien auf Kosten des Landes Baden-Württemberg in einem fünfjährigen Meßprogramm erhobenen und aufbereiteten Naturmeßdaten standen der Forschergruppe unmittelbar zur Verfügung. Am intensivsten untersucht wurde das Testgebiet Bruchsal-Karlsdorf (Kapitel 10).

## 1.3 Bedeutung für die Praxis

### 1.3.1 Zur Rolle der numerischen Modelle

Im Rahmen des Forschungsprogramms wurden eine Reihe von numerischen Modellen entwickelt und angewendet, welche von stark vereinfachten bis zu komplexen Modellansätzen reichen. Dem numerischen Modellinstrumentarium kommt in der Grundwasserforschung und in der Grundwasserwirtschaft eine wichtige Rolle zu.

Von essentieller Bedeutung sind Modelle für die Grundlagenforschung zur Verbesserung des Verständnisses für die ablaufenden Transportprozesse und die hierfür jeweils maßgebenden Einflußgrößen und Parameter. Hier sind wegen der komplexen Zusammenhänge numerische Modelle zur Simulation von Laborexperimenten unter kontrollierten Bedingungen unerlässlich, um mit ihrer Hilfe die gewonnenen Meßdaten auszuwerten und hierdurch die gewählten Ansätze zu überprüfen und zu interpretieren. Je nach Fragestellung muß das Modell einerseits komplex genug sein, um alle wesentlichen Prozesse korrekt wiederzugeben, jedoch andererseits so einfach wie zulässig sowohl hinsichtlich der Beschreibung des Strömungstransports (z.B. Dimensionalität der Strömung) als auch hinsichtlich der Ansätze für Adsorptionsprozesse und Reaktionen (Kobus und Kinzelbach 1989).

Der Einsatz numerischer Modelle für Aufgaben der Wasserwirtschaft ist dadurch nochmals erheblich erschwert, daß praxisorientierte wasserwirtschaftliche Modelle auch die komplexen Naturgegebenheiten der Feldsituation adäquat wiedergeben müssen. Die Aussagefähigkeit der Modelle ist daher nicht nur von der Frage abhängig, ob alle maßgeblichen Transportprozesse durch das Modell adäquat wiedergegeben werden, sondern entscheidend mitgeprägt durch die Qualität der für eine Modellanpassung an die Feldsituation (Eichung) zur Verfügung stehenden Eingabedaten. Bei dem durch verschiedene Restriktionen in aller Regel stark begrenzten Naturdatenbestand besitzen deshalb wasserwirtschaftliche Grundwassertransportmodelle oft nur geringe, in manchen Fällen auch keine Prognosefähigkeit.

Das Problem einer adäquaten Parameteridentifikation wird naturgemäß um so schwieriger, je komplexer das eingesetzte Modell ist. Der Auswahl des jeweils geeigneten Modelltyps kommt daher große Bedeutung zu. Diese Auswahl muß sich primär an der jeweiligen Aufgabenstellung, aber auch an den zur Verfügung stehenden Daten orientieren. Für unterschiedliche Fragestellungen ist die Anwendung problemorientierter Modelle unterschiedlicher Komplexität angebracht, wobei stets der für die



Fragestellung adäquate, einfachste Ansatz am besten geeignet ist. Für natürliche Grundwasserleiter und großräumige Betrachtungen sind oft zweidimensionale Modellansätze ausreichend, wohingegen die Anwendung dreidimensionaler Modelle nur in besonderen Fällen notwendig erscheint. Entsprechend gilt für Transportmodelle, daß ausgehend vom einfachsten Ansatz für den dispersionsfreien (ausschließlich durch mittlere Abstandsgeschwindigkeit bedingten) Transport eines Tracers je nach Aufgabe die Effekte von Dispersion, Adsorption, Abbauprozessen und Reaktionen wechselwirkender Substanzen bei zunehmender Modellkomplexität berücksichtigt werden müssen.

Zu der Frage, inwiefern Grundwassertransportmodelle realistisch als prognosefähig gelten dürfen, geben die nachfolgenden Buchbeiträge und insbesondere die Fallbeispiele eine differenzierte Antwort. Zweifellos müssen die allzu hohen Erwartungen an solche Modelle auf ein realistisches Maß zurückgeschraubt werden. Andererseits wird jedoch auch ersichtlich, daß Grundwassertransportmodelle durchaus ihrer Aufgabe gerecht werden können, für die Planung in der Wasserwirtschaft, im Grundwasserschutz und in der Trinkwasserversorgung in der Zukunft als zuverlässiges und unerläßliches Instrument zu dienen.

Die im Rahmen der Forschergruppe entwickelten numerischen Modelle und Rechenprogramme wurden in einer vereinheitlichten Form so dokumentiert, daß sie für weitere Forschungsarbeiten sowohl in den beteiligten Instituten als auch für Dritte zugänglich sind. Dabei wurden sowohl die in den Teilprojekten entwickelten Programme als auch Modifikationen und Weiterentwicklungen allgemein zugänglicher Programme für die hier angeschnittenen Aufgabenstellungen erfaßt. Eine Auflistung und kurze Charakterisierung der dokumentierten Programme findet sich im Anhang.

### 1.3.2 Wasserwirtschaftliche Einsatzbereiche

Ein wichtiges Kriterium für die Modellentwicklungen ist deren direkte Einsatzfähigkeit zur Situationsbeschreibung, zur Problemanalyse und zur Lösung praktischer Aufgaben folgender Art:

#### **Zur Wärmeausbreitung:**

- Prognose der Reichweite anthropogen bedingter Temperaturanomalien;
- Auslegung von Schluck- und Entnahmebrunnen zur Vermeidung eines thermischen Kurzschlusses für industrielle Kühlwasseranlagen oder für Grundwasser-Wärmepumpen;
- gegenseitige Beeinflussung verschiedener Grundwasser-Wärmenutzer (Kühlwasserentnahmen und -rückgaben, Wärmepumpen etc.);
- gezielte Nutzung anthropogener thermischer Anomalien in Ballungsgebieten;
- Gefährdung von Trinkwasserversorgungsanlagen durch thermische Nutzungen oder Belastungen des Grundwassers.

**Zu CKW-Kontaminationen:**

- Beurteilung der Gefährdung von Trinkwasserversorgungsanlagen durch bekanntgewordene CKW-Kontaminationen;
- Planungshilfe für Meßstrategien zur Beobachtung der zeitlichen Entwicklung der Kontaminationszone (bei unbekannter Quelle auch Rückschlüsse auf Ort und Zeit des Eintrags);
- Planungshilfe für die Konzeption hydraulischer Abwehr- und Sanierungsmaßnahmen;
- Planungshilfe für in situ-Sanierungstechniken;
- Abschätzung des Wirkungsgrades und der Dauer von Sanierungsmaßnahmen und Entwicklung optimaler Sanierungsstrategien.

**Zum Nitratproblem:**

- Identifizierung der jeweiligen Einzugsgebiete der einzelnen Brunnen von Trinkwasserversorgungsanlagen und der zugehörigen Aufenthaltszeiten;
- Prognose des Nitratintrags in Abhängigkeit von Bewirtschaftung, Boden und Klima;
- Hinweise zum besseren Verständnis des Abbauverhaltens von Nitrat im Boden und im Grundwasser;
- Prognose der Auswirkung veränderter Landbewirtschaftung bzw. veränderten Nitratintrags auf die Nitratkonzentration im Wasserwerk (z.B. reduzierter Eintrag durch Änderung der Düngepraxis oder erhöhter Eintrag durch Grünlandumbruch);
- Planungshilfe für Meßstrategien zur Beobachtung der Langzeitentwicklung sowie zur Planung landwirtschaftlicher Abhilfemaßnahmen;
- Planungshilfe für die Konzeption hydraulischer Abwehr- oder Sanierungsmaßnahmen bei deutlichen Unterschieden im Nitratgehalt des Grundwassers (Brunnenanordnung, erforderliche Pumprate, Wirkungsgrad);
- Planungshilfe für in situ-Sanierungstechniken.

Die im Rahmen des Forschungsprogramms gewonnenen Erkenntnisse finden auf mehrfache Art und Weise ihre direkte Umsetzung in die Praxis. Verschiedene Modelle werden für die obengenannten Fragestellungen von den jeweiligen Interessenten (Wasserversorgungsunternehmen, Kommunen, Industriebetriebe, Wasserwirtschaftsverwaltung) bereits eingesetzt. Die Ergebnisse aus den Arbeiten der Forschergruppe liefern somit einen direkten Beitrag zu den gemeinsamen Bemühungen von Forschung und Umweltbehörden um einen verbesserten Grundwasserschutz.



## Literatur

- Huwe, B.; van der Ploeg, R.R. (1988): Modelle zur Simulation des Stickstoffhaushaltes von Standorten mit unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzung. Mitteilungen Heft 69, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 213 S.
- Kinzelbach, W. (1987): Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser. Oldenbourg, München, Wien, 317 S.
- Kobus, H. (1987): Ein Programm zur Erforschung aktueller Probleme in Grundwasserwirtschaft und Grundwasserschutz. Wasserwirtschaft 11, 591–597
- Kobus, H. (1990): Den Schadstoffen auf der Spur, Transportprozesse im Grundwasser. forschung, Mitteilungen der DFG 1, 18–21
- Kobus, H.; Kinzelbach, W. (Hrsg.) (1989): Contaminant transport in groundwater. Proc. IAHR Symposium, Stuttgart, April, 486 S.
- Kobus, H.; Zilliox, L. (Hrsg.) (1988): Nitratbelastung des Grundwassers. Mitteilungen Heft 71, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 318 S.
- Rohmann, U.; Sontheimer, H. (1985): Nitrat im Grundwasser: Ursachen, Bedeutung, Lösungswege. DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte Institut der Universität Karlsruhe (TH), 468 S.