

ETH Dissertation Nr. 11604

MODELLIERUNG DER STOFFAUSBREITUNG IN
INHOMOGENEN GRUNDWASSERLEITERN

Abhandlung zur Erlangung des Titels

Doktor der Technischen Wissenschaften

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE

vorgelegt von

Martin Rauber

Dipl. Kulturingenieur, ETH Zürich

geboren am 1. Februar 1961

von Windisch, Kanton Aargau, CH

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. T. Dracos

Referent

Prof. Dr. H. Flühler

Korreferent

Dr. F. Stauffer

Korreferent

1996

Kurzfassung

Die Schotterablagerungen des Alpenvorlandes stellen für die Schweiz wichtige Grundwasservorkommen dar, welche für die Trinkwasserversorgung von vorrangiger Bedeutung sind. Diese werden aber in zunehmendem Masse durch verschmutzte Flüsse, Deponien, Verkehrsanlagen, Industrie, Gewerbe, Siedlungen und Landwirtschaft gefährdet. Für die Ergreifung von Schutz- und Sanierungsmassnahmen sind eingehende Kenntnisse über das Verhalten von ins Grundwasser gelangenden Schadstoffen erforderlich. Ein wichtiges Hilfsmittel stellen dabei mathematische Modelle dar, mit welchen die Folgen von Eingriffen ins Grundwasser, bewusst oder infolge von Unfällen, simuliert werden können. Ein grosses Problem bei der Simulation von Strömungs- und Transportvorgängen stellt die Erfassung von Inhomogenitäten bezüglich der hydraulischen, chemischen und biologischen Bodeneigenschaften dar.

Da diese in einem konkreten Fall nur sehr beschränkt bestimmt werden können, hat Jussel et al. (1994; a und b) in verschiedenen Kiesgruben versucht, die wesentlichen geologischen Elemente und deren hydraulischen und geometrischen Eigenschaften zu erfassen und statistisch zu analysieren. Aufgrund dieser Auswertungen wurde es möglich, Grundwasserleiter mit denselben statistischen Eigenschaften wie denjenigen der untersuchten Schotterablagerungen zu generieren. Für die Durchführung von stochastischen Simulationen nach der Monte-Carlo-Methode wurde ein dreidimensionales Strömungs- und Transportmodell entwickelt. Dieses wurde von Jussel et al. (1994; a und b) möglichst einfach und übersichtlich konzipiert und in einem Computer-Programm implementiert, welches speziell auf die Anwendung auf Grossrechnern ausgerichtet ist, um Simulationen in einem möglichst grossen Modellgebiet durchführen zu können.

In der vorliegenden Arbeit, welche im Rahmen eines Schweizerischen Nationalfondprojektes (Nr. 20-29537.90 und 20-36377.92) realisiert worden ist, wird versucht, die numerischen Methoden des oben erwähnten Modells zu verbessern, da insbesondere die starken Kontraste sowie die Anisotropie bezüglich der hydraulischen Leitfähigkeit bei der numerischen Simulation Diskretisierungsfehler verursachen. Alternative Formulierungen wurden theoretisch und softwaremässig realisiert. Die erhaltenen Resultate zeigen eine deutliche Verbesserung in der Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes.

Die Simulationsprogramme wurden auf verschiedenen Workstations und Grossrechnern, unter anderem auch auf dem Supercomputer NEC-SX3 im CSCS Manno, implementiert.

Die Auswertung von 100 numerischen Tracerexperimenten hat gezeigt, dass die effektive longitudinale Dispersivität mit zunehmender Transportdistanz ansteigt. Im Vergleich zu theoretischen Ergebnissen wurden Unterschiede

festgestellt, welche vor allem auf unterschiedliche Voraussetzungen und die starke Abhängigkeit von der Korrelationslänge zurückzuführen sind.

Der Prozess der Sorption von Schadstoffen an der Bodenmatrix wurde im Transportmodell als unkorreliertes, lognormal verteiltes Zufallsfeld von Retardationsfaktoren berücksichtigt. Eine Vergleichsrechnung mit konstantem Retardationsfaktor zeigte, dass die Variabilität des Retardationsfaktors durch die Heterogenität der hydraulischen Parameter verwischt wird.

Das Ausbreitungsverhalten einer Schadstoffwolke ist stark abhängig von den lokalen geologischen Strukturen. Speziell die hochdurchlässigen Linsen aus Rollkies, deren Volumenanteil zwar nur wenige Prozente beträgt, haben auf die effektive Durchlässigkeit einen grossen Einfluss und bilden präferenzielle Fliesswege. Deshalb ist es wichtig, möglichst viele bekannte Informationen bezüglich der hydraulischen Parameter in die Modellierung miteinzubeziehen. In der vorliegenden Arbeit wurden für die Konditionierung des stochastischen Generierungsprozesses von künstlichen Grundwasserträgern Georadar-Daten (Huggenberger et al. (1994)) berücksichtigt. Die Simulationen haben gezeigt, dass der Grad der Konditionierung mit zwei senkrecht zueinander stehenden Georadar-Profilen zu schwach ist, um die Unsicherheit der Ergebnisse massgeblich zu verkleinern.

Mit einer numerischen Sanierungsstudie wurden die Grenzen und Möglichkeiten der bei Grundwasserverschmutzungen häufig angewandten, sogenannten "Pump and Treat"-Methode aufgezeigt. Dabei wurde deutlich, dass die hochdurchlässigen Linsen einen enormen Einfluss auf das Einzugsgebiet eines Sanierungsbrunnens haben. Der Vergleich der Resultate mit solchen einer homogenen Betrachtungsweise zeigte deutlich, dass der Einfluss der Heterogenitäten auf das Transportverhalten einer Schadstoffwolke nur ungenügend in den hydraulischen und Transportparametern des homogenen Falls berücksichtigt werden können. Da in einem praktischen Fall die örtlichen geologischen Begebenheiten nur ungenügend bekannt sind, ist es schwierig, realistische Sanierungsziele festzulegen und einzuhalten.

Abstract

The fluvial deposits of the alpine foreland are important groundwater resources for Switzerland being of major significance for the public water supply. Nevertheless they are endangered to an increasing extent by polluted rivers, landfill sites, traffic systems, industry, trade, settlements and agriculture. To take protection and remediation measures profound knowledge about the behaviour of pollutants getting into the groundwater is needed. Mathematical models are therefore an important tool to simulate the consequences of taken measures related to the groundwater, may it be conciously or as a result of an accident. In the context of the simulation of flow and transport mechanisms the evaluation of the inhomogeneities concerning hydraulic, chemical and biological properties is a big problem.

As these are very difficult to be evaluated in an actual case Jussel et al. (1994; a and b) tried to detect and statistically analyze the main sedimentological structures and their corresponding hydraulic and geometric properties in various gravel pits. On the basis of these analysis it was possible to generate synthetic aquifers with the same statistical properties as found in the fluvial deposits. To perform Monte-Carlo-simulations a three-dimensional flow and transport model was developed. This was as simply and clearly designed by Jussel et al. (1994; a and b) as possible and implemented in a code suitable to be run on super computers to allow simulations in as big model domains as possible.

In this study which was realized in the context of the Swiss National Science Foundation project (grant # 20-29537.90 and 20-36377.92) the numerical methods of the model mentioned above were tried to be improved, because especially strong contrasts and the anisotropy of the hydraulic conductivity cause discretisation errors in the numerical simulation. Alternative formulations were theoretically realized and implemented in the code. The results showed a significant improvement as far as the determination of the velocity field is concerned.

The simulation codes were implemented on various workstations, midi-computers and even on the supercomputer NEC-SX3 at CSCS Manno.

The analysis of 100 numerical tracer experiments showed that the effective longitudinal dispersivity increases with increasing transport distance. Comparing with theoretical results differences were found which are mainly due to differing assumptions and the strong dependance on the correlation length.

The process of sorption of contaminants to the soil matrix was taken into account as an uncorrelated, lognormal distributed random field of retardation factors. A comparative simulation with a constant retardation factor showed

that the variability of the retardation factor is covered up by the heterogeneity of the hydraulic parameters.

The spreading behaviour of a contaminant plume is strongly dependant on the local geological structural elements. Specially the highly permeable lenses of coarse gravel representing only 2% of the whole bulk volume have a strong influence in the effective conductivity and build preferential flow paths. Therefore it is important to include into the model as many known informations about hydraulic parameters as possible. In this study georadar-data (Huggenberger et al. (1994)) were taken into account for the conditioning of the generation process of synthetic aquifers. The simulations showed that the grade of conditioning by two georadar-profiles perpendicular to each other is too weak to significantly reduce the uncertainty of the results.

In a numerical remediation study the limits and possibilities of the so called pump and treat method which is widely used in groundwater contamination problems were investigated. It became very obvious that the highly permeable lenses have an enormous influence on the size and shape of the capture zone of a remediation well. The comparison of the results with those of a homogeneous approach clearly showed that the influence of the heterogeneities of the transport behaviour of a contaminant plume are not sufficiently represented by the transport parameters of the homogeneous case. As the local geological situation is only unsufficiently known in actual cases, it is very difficult to define and meet remediation goals.
