

## **Tafel 8.3 Geologische und hydrogeologische Profile, Teil 2: Hydrogeologie**

### **Einleitung**

Ziel dieser Tafel ist es, die Strömungsverhältnisse des Grundwassers im Untergrund des schweizerischen Mittellandes schematisch darzustellen (Fig. 1). Die Hauptschwierigkeit der Darstellung liegt darin, dass Grundwasserströmungen im dreidimensionalen Raum ablaufen. Zum besseren Verständnis der Hauptströmungsrichtungen wurden Vertikalprofile sowie Kartendarstellungen gewählt. Letztere zeigen einige der Hauptaquifere in ihrer vollständigen Ausdehnung.

### **Der Begriff Grundwasserströmungssystem**

Wasser füllt die Gesteinshohlräume und -klüfte bis in Tiefen von mehreren Tausend Metern unter Meeresniveau. Dieses Wasser wird als Grundwasser bezeichnet. Grundwasser ist in Bewegung (Fig. 2): Es fliesst von den Infiltrationsgebieten (meist hochgelegene Gebiete) in Richtung der Exfiltrationsgebiete, welche in der Regel dem hydrographischen Netz der Seen, Flüsse und Täler entsprechen. Die mittlere Grundwasserbewegungsrichtung wird in Form von Strömungsbahnen oder als Fließfeld schematisch dargestellt. Diese Richtungen sowie die «Geschwindigkeit» der Grundwasserströmung werden im einfachsten Fall durch das Darcy-Gesetz beschrieben (siehe «Definitionen»).

Nach der Theorie von [9] bilden sich zwischen den Infiltrationsgebieten und den Exfiltrationsgebieten lokale, subregionale und regionale Strömungssysteme (s. Fig. 3, Strömungssysteme in einem theoretischen homogenen Grundwasserraum). Es ist leicht verständlich, dass diese Strömungssysteme einen idealen Rahmen für thermische, chemische und isotopische Grundwasserstudien darstellen. Auch geringe Kenntnisse darüber können wertvolle, wenn auch nur qualitative Hinweise liefern, so etwa zum möglichen Transport gelöster Stoffe im Grundwasser in verschiedenen Tiefen (z.B. infolge von Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen). Nach Figur 3 ist der Ursprungsort der gelösten Stoffe in bezug auf die lokalen, subregionalen und regionalen Strömungssysteme von grosser Bedeutung. Es ist wichtig zu vermerken, dass die hierarchische Gliederung der Grundwasserströmungssysteme eine Folge der Hierarchie des hydrographischen Netzes, d.h. der Exfiltrationsgebiete ist.

Eine «direkte Messung» der Grundwasserströmungsrichtungen an jedem Punkt der Erdkruste ist unmöglich; der Aufwand dafür wäre unverhältnismässig hoch. Dies bedeutet, dass die Rekonstruktion eines Grundwasserfließfeldes in den meisten Fällen mit Hilfe indirekter Methoden, wie z.B. der mathematischen Modellierung, vorgenommen werden muss (siehe «Definitionen»).

### **Grosse heterogene Grundwasserströmungssysteme**

In grossen heterogenen Grundwasserströmungssystemen liegen mehrere Grundwasserstockwerke übereinander, welche durch vergleichsweise geringdurchlässige geologische Schichten voneinander getrennt sind. Die gegenseitige Abgrenzung der Grundwasserströmungssysteme ist wesentlich schwieriger als bei den homogenen Verhältnissen in Figur 3; die Flussvektoren geben jedoch wertvolle Hinweise auf die Grundwasserströmungsverhältnisse und den Wasseraustausch zwischen den einzelnen geologischen Einheiten. Die hydraulischen Beziehungen zwischen einzelnen Grundwasserstockwerken können von Ort zu Ort wechseln: einmal speist das obere Grundwasserstockwerk das untere, an einer anderen Stelle kann dies umgekehrt sein. Diese Beziehungen, d.h. das Grundwasserfließfeld, sind durch die Struktur des Grundwasserströmungssystems (die räumliche Verteilung der Gesteinsdurchlässigkeiten [3]) sowie die Lage der Infiltrationsgebiete und der Exfiltrationsgebiete (Randbedingungen) festgelegt.

Auch wenn die theoretischen zweidimensionalen Darstellungen das Verständnis der Grundwasserströmungen erleichtern und in hydrogeologischen Studien [1] anwendbar sind, so wäre es noch wichtiger, herauszufinden, wie die Grundwasserströmungen im realen dreidimensionalen Grundwasserraum ablaufen und welche Möglichkeiten bestehen, diese Verhältnisse nachzubilden und darzustellen.

## **Grundwasserströmungen zwischen Aar- und Schwarzwaldmassiv**

Die hier dargestellten Profile geben schematisch die Grundwasserströmungsverhältnisse zwischen dem Aar- und dem Schwarzwaldmassiv im Untergrund des schweizerischen Mittellandes wieder. Sie erlauben es, den Grundwasserfluss in einem grossen dreidimensionalen Raum darzustellen. Es handelt sich dabei um eine der zahlreichen Rechenvarianten eines mathematischen Modells (s. Legende, Tab. 1 der Tafel 8.2), das im Rahmen einer früheren Studie [5] erstellt wurde.

Im theoretischen zweidimensionalen Fall ist die Darstellung des Grundwasserfliessfeldes vergleichsweise einfach, da die Flussvektoren keine vertikale Komponente aufweisen. In realen grossräumigen Grundwasserströmungssystemen ist dies dagegen nicht der Fall, da es hier nahezu unmöglich ist, eine Abbildungsebene zu finden, die an jeder Stelle parallel zu den Flussvektoren und damit den Strömungsbahnen angelegt ist. Ferner sind geringmächtige Aquifere (einige Dutzend Meter) mit einer horizontalen Ausdehnung von mehreren hundert Kilometern ausserordentlich schwer darstellbar – sowohl in Blockdiagrammen als auch in Vertikalprofilen. Die Ergebnisse werden darum in folgender Form dargestellt: In Vertikalprofilen, auf welche die Flussvektoren projiziert sind sowie in Kartenform, wobei die Kartenebene der lateralen Ausdehnung einiger Hauptaquifere entspricht. Dabei ist in jedem dargestellten Fall eine zusätzliche, senkrecht zur Darstellungsebene laufende Strömungskomponente mitzubersichtigen. Es versteht sich von selbst, dass beim Übergang vom realen System zum hydrogeologischen Modell eine Reihe von Vereinfachungen bei der geometrischen Darstellung der wichtigsten geologischen Einheiten und bei den gewählten hydrogeologischen Randbedingungen unabdingbar ist.

Das regionale Modell, das als Grundlage für die hier dargestellten hydrogeologischen Profile dient, reicht vom Aarmassiv im Süden bis zum Schwarzwaldmassiv im Norden. Der Bodensee im Osten und die Aare im Westen bilden die übrigen Modellgrenzen. Die lateralen Modellgrenzen stimmen mit den regionalen Grundwassersystemgrenzen überein, die sich bis in erhebliche Tiefen auswirken (Rhein-, Rhone-, Aaretal etc.). Das ursprüngliche Ziel dieses Modells war es, die Grundwasserströmungen im nordschweizerischen Kristallin zu untersuchen [5,6,8,10]. Die Obergrenze des Modells wird durch den freien Grundwasserspiegel gebildet und wurde mit Hilfe hydrogeologischer und topographischer Karten abgeschätzt (dreidimensionale Darstellung). Die hydrogeologischen Randbedingungen beruhen auf Grundwasserstands- und Grundwasserflussmessungen (Infiltration und Exfiltration) sowie auf Schätzungen. Diese Bedingungen stellen jeweils die dem Modell zugrunde gelegten Hypothesen dar. Die Kohärenz dieser Daten ist in der Folge anhand der simulierten Resultate zu verifizieren. Das schematische Blockdiagramm (s. Legende) zeigt die vereinfachten geologischen Ausgangsdaten sowie das Vorgehen bei der dreidimensionalen Rekonstruktion der modellierten Aquifergeometrie.

Alle Berechnungen wurden unter stationären Verhältnissen durchgeführt, d.h., dass die eingesetzten Bedingungen zeitkonstant sind. Das Programm FEM301 [4] errechnet die Verteilung des hydraulischen Potentials und die Fliessmengen im simulierten Bereich. Die Ergebnisse werden mit den verfügbaren Feldmessungen verglichen. Es ist in diesem Zusammenhang interessant zu vermerken, dass die Modellergebnisse zum Teil anhand von Tiefbohrungen verifiziert werden konnten. Insbesondere war es möglich, aufwärts gerichtete Grundwasserströmungen in der Umgebung regionaler Exfiltrationsgebiete durch Potentialmessungen in verschiedenen Tiefen dieser Bohrungen nachzuweisen [2]. Die Ergebnisse erlauben es, die Grundwasserströmungsverhältnisse der wichtigsten Aquifere zwischen Aar- und Schwarzwaldmassiv schematisch darzustellen. Es ergibt sich ein schlüssiges, wenn auch vereinfachtes Bild der Grundwasserzirkulation in den tiefen Aquiferen. Die hydraulischen Beziehungen zwischen zwei

sich überlagernden Grundwasserstockwerken können von Ort zu Ort wechseln (Profile), so wie es der theoretische Fall (Fig. 2,3) verdeutlicht hat.

Die dreidimensionale Darstellung zeigt die Aufschlüsse der verschiedenen geologischen Formationen sowie die Lage der Infiltrationsgebiete (hohe Werte des hydraulischen Potentials) und der Exfiltrationsgebiete (niedrige Werte des hydraulischen Potentials in den Tälern des hydrographischen Netzes).

Das Profil 3 durch das dreidimensionale Modell, etwa rechtwinklig zu den beiden anderen angelegt, zeigt vor allem die lokalen Grundwasserströmungssysteme. Diese markieren die Hauptexfiltrationsgebiete in den Talböden, wobei in diesen Zonen vertikale Strömungskomponenten überwiegen.

## Grundwasserströmungssysteme im Kristallin, Muschelkalk und Malm

Um die wichtigsten Grundwasserströmungssysteme zu veranschaulichen, sind in dieser Tafel beispielhaft die Bedingungen der drei Hauptaquifere erläutert: Kristallin, Muschelkalk und Malm. Die Strömungsverhältnisse im Kristallin (Fig. 5) und im Malm (Fig. 4) sind in zwei Karten wiedergegeben und anhand von Kurztexten erläutert. Die Verhältnisse im Muschelkalk werden nachfolgend kommentiert.

Die Infiltrationsgebiete und Exfiltrationsgebiete des Muschelkalkes sind an die Gebiete gebunden, in denen der Muschelkalk an die Oberfläche tritt, d.h. an die Alpen im Süden und den Tafeljura im Norden (s. dreidimensionale Darstellung). Da eine graphische Darstellung der Ergebnisse in Profilform in diesem Massstab unmöglich ist, beschränken wir uns auf die folgenden Bemerkungen: Im Alpenraum exfiltrieren die Muschelkalkwässer vor allem in die oberen Täler der Aare, der Reuss und des Rheins sowie in die Region Vättis. Im Norden gelangen die Wässer ins Rheintal zwischen Basel und Bad Säckingen sowie ins Wutachtal. Zwischen diesen beiden Gebieten wird der obere Muschelkalkaquifer durch die ihn zerschneidenden Täler, wie die der Sisslen, der Aare und des Rheins, entwässert.

## Verdankungen

Die vorliegende Arbeit wurde im Auftrag der Landeshydrologie und -geologie, BUWAL, realisiert, wobei sich die entsprechenden Grundlagen auf Ergebnisse früherer, im Auftrag der Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) ausgeführter Studien stützen.

## Literatur

- [1] **Bouzelboudjen, M. (1993):** Cartographie hydrogéologique et systèmes d'écoulement souterrain. Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel – Service hydrologique et géologique national. Rapport inédit, Berne.
- [2] **Hufschmied, P., Frieg, B. (1989):** Observation of hydraulic heads in the Nagra boreholes in Northern Switzerland. Nagra Bulletin, Special Edition 39-49, Baden.
- [3] **Király, L. (1970):** L'influence de l'hétérogénéité et de l'anisotropie de la perméabilité sur les systèmes d'écoulement. In: Bulletin der Vereinigung schweizerischer Petroleumgeologen und -ingenieure, 37/91:50–57, Zürich.
- [4] **Király, L. (1985):** FEM301 – A three-dimensional model for groundwater flow simulation. Nagra Technischer Bericht NTB 84-49, Baden.
- [5] **Kimmeier, F. et al. (1985):** Simulation par modèle mathématique des écoulements souterrains entre les Alpes et la Forêt Noire; Partie A: Modèle régional, Partie B: Modèle local (Nord de la Suisse). Nagra Technischer Bericht NTB 84-50, Baden.

- [6] **Nagra (1988):** Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988. Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz. Nagra Technischer Bericht NTB 88-25, Baden.
- [7] **Skinner, B.J., Porter, S.C. (1991):** The dynamic earth: an introduction to physical geology. Second edition, New York.
- [8] **Thury, M. et al. (1994):** Geology and Hydrogeology of the Crystalline Basement of Northern Switzerland. Synthesis of Regional Investigations 1981–1993 within the Nagra Radioactive Waste Disposal Program. Nagra Technischer Bericht NTB 93-01, Baden.
- [9] **Tóth, J. (1995):** Hydraulic continuity in large sedimentary basins. In: Hydrogeology Journal Volume 3, Nr. 4/1995:4–16, Hannover.
- [10] **Voborny, O. et al. (1992):** Analysis of regional groundwater flow in crystalline rocks of Northern Switzerland: Results of a numerical model using an equivalent porous medium. Nagra Interner Bericht, Baden.