

ANWENDUNG DER SIMULATIONS-MODELLE IN DER HYDROGEOLOGIE

Die Simulationstechnik der Grundwasserströmungen, vor etwa 20 Jahren nur für die «happy few» reserviert, verbreitet sich immer mehr und die gewöhnlichen Rechenprogramme (oder Simulatoren) kann man für eine handvoll Dollar kaufen oder von anderen Benutzern sogar umsonst erhalten.

In dieser Entwicklung spielten nicht nur die immer leistungsfähigeren und für die Wissenschaftler immer leichter zugänglichen Rechenanlagen eine wichtige Rolle, sondern auch, oder noch mehr, die Vielfältigkeit der neu auftauchenden hydrogeologischen Probleme.

L. Király, Projektleiter und Prof. F. Zwahlen
Centre d'Hydrogéologie
Universität Neuenburg

Warum die Modelle?

War noch vor kurzer Zeit das Hauptproblem des Hydrogeologen, «Wasser zu finden», so kommen seit einigen Jahren – besonders in den industrialisierten Ländern – andere wichtige hydrogeologische Probleme dazu. Die Überbeanspruchung der durch die hydrogeologische Prospektion entdeckten Aquifere, die unterirdische Ablagerung von gefährlichen Schadstoffen, die Störung von Grundwasserfließwegen durch Tiefbauten und die durch Unfälle verursachten Verunreinigungen führen immer häufiger zu einer qualitativen und quantitativen Veränderung der Grundwasserreserven.

«Wasser zu finden» genügt lange nicht mehr; Verwaltung der Grundwasserreserven und Grundwasserschutz sind ebenso wichtige Probleme geworden. Grundwasserressourcen zu verwalten

ten Brunnen pumpen, ohne dass die Ergiebigkeit der schon vorhandenen Brunnen langfristig (in den nächsten 5 oder 10 Jahren) stark abnimmt?

- Wie wird ein Tunnel oder Grundwasserfassungstollen die Ergiebigkeit der benachbarten Quellen langfristig beeinflussen?
- Hydroelektrische Kraftwerke sollen in einem Tal das Flussniveau verändern. Wie werden sich die vorgesehenen Veränderungen auf die Grundwasserverhältnisse des Tales auswirken?
- Ein Grundwasserkörper ist an einer gegebenen Stelle durch Schadstoffe kontaminiert. In welcher Richtung und mit welcher Geschwindigkeit wird sich der Kontaminant ausbreiten? Wie wird sich die Schadstoffkonzentration langfristig verändern? usw., usw.

Da in allen diesen Problemen die Experimente «in Naturgrösse» weder möglich noch erwünscht sind, besteht die Notwendigkeit, ein Instrument anzuwenden (Modell oder Simulator), wel-

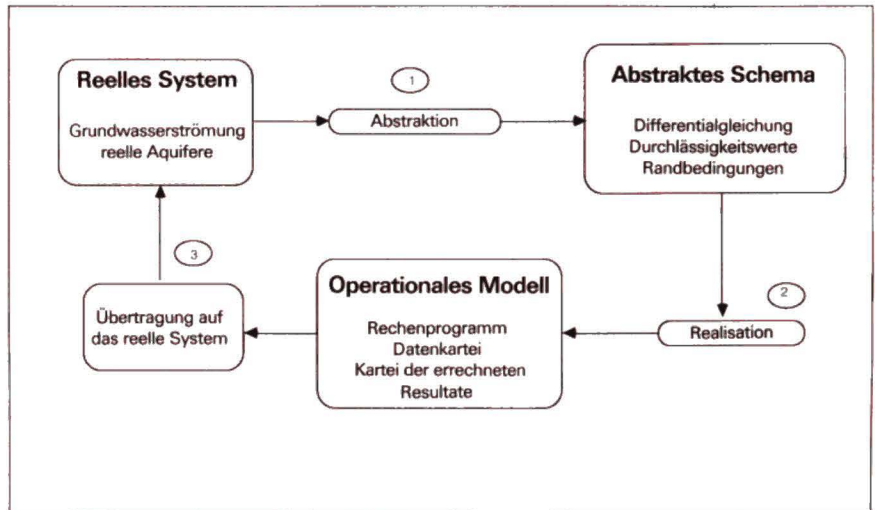


Abbildung 1. Beziehungen zwischen Realität, abstraktem Schema und Modell.

bedeutet aber, dass man in einem gegebenen Aquifer die natürlichen Fließvorgänge versteht und dass man den Einfluss menschlicher Eingriffe auf Qualität und Quantität des zur Verfügung stehenden Grundwassers vorausagen kann. Heutzutage muss sich der Hydrogeologe z.B. mit folgenden Fragestellungen auseinandersetzen:

- Welche maximale Wassermenge könnte man aus einem neu installier-

ches die Grundwasserverhältnisse unter natürlichen Bedingungen und unter dem störenden Einfluss menschlicher Eingriffe simulieren kann.

Obwohl die Modelle hauptsächlich für die Lösung praktischer Probleme entwickelt sind (Vorhersage der Grundwasserströmungen in Aquifere, für die «genügend Daten» zur Verfügung stehen), erscheint uns ihre «theoretische» Anwendung im Unterricht und in der

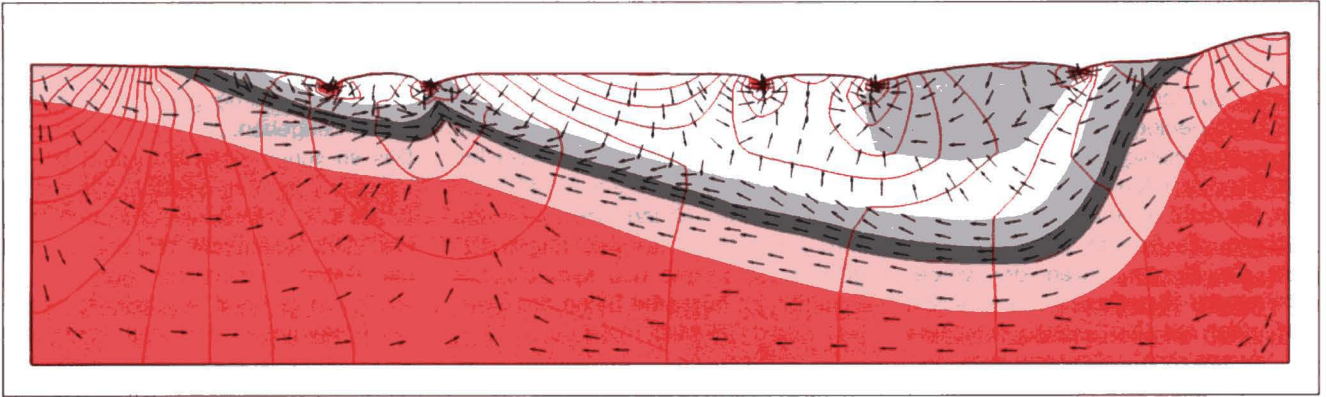


Abbildung 2. Äquipotentiale (rote Linien) und Fließrichtungen (Pfeile) in einem heterogenen hydrogeologischen Becken (die verschiedenen Abstufungen zeigen die verschiedenen Durchlässigkeiten).

Forschung fast ebenso wichtig, und wir denken, dass die Rolle der Modelle in der Ausbildung der Hydrogeologen nicht mehr vernachlässigt werden darf. Insbesondere gestatten die Modelle:

- die Erkenntnisse in synthetischer und, zum Teil, in nichtsprachlicher Form zu übermitteln
- die Konsequenzen der Fließgesetze zu visualisieren
- den Einfluss der hydraulischen Parameter (heterogene oder anisotrope Permeabilitäten) oder den Einfluss der Randbedingungen (heterogene Infiltrationen, Vorfluterniveau) auf die Grundwasserströmungen zu zeigen

- als Versuchs- oder Demonstrationsinstrumente benutzt zu werden
- die Kohärenz der Hypothesen zu kontrollieren, die man über die hydraulischen Eigenschaften des Grundwasserleiters (Permeabilität, Speicherkoeffizient) und über die Randbedingungen (Infiltrationen, Entnahmemengen, Vorfluterniveau) macht.

Der letzte Punkt spielt übrigens auch in den **praktischen Anwendungen** eine wichtige Rolle. Man muss tatsächlich betonen, dass die räumliche Verteilung der hydraulischen Eigenschaften eines Aquifers niemals in allen Einzelheiten

bekannt ist: die Permeabilitäten sind zum Beispiel nur in einigen, zum Teil voneinander weit entfernten Bohrungen gemessen und die Werte müssen zwischen den Bohrungen interpoliert oder bis an die Aquifergrenzen extrapoliert werden. Inwieweit diese Interpolationen und Extrapolationen mit einem auf statistischen Methoden beruhenden Computerprogramm berechnet wurden oder von einem auf seine Erfahrung und Intuition zurückgreifenden Hydrogeologen durchgeführt sind, ändert nichts an der Tatsache, dass unsere Kenntnisse über den Grundwasserleiter immer mehr oder weniger hy-

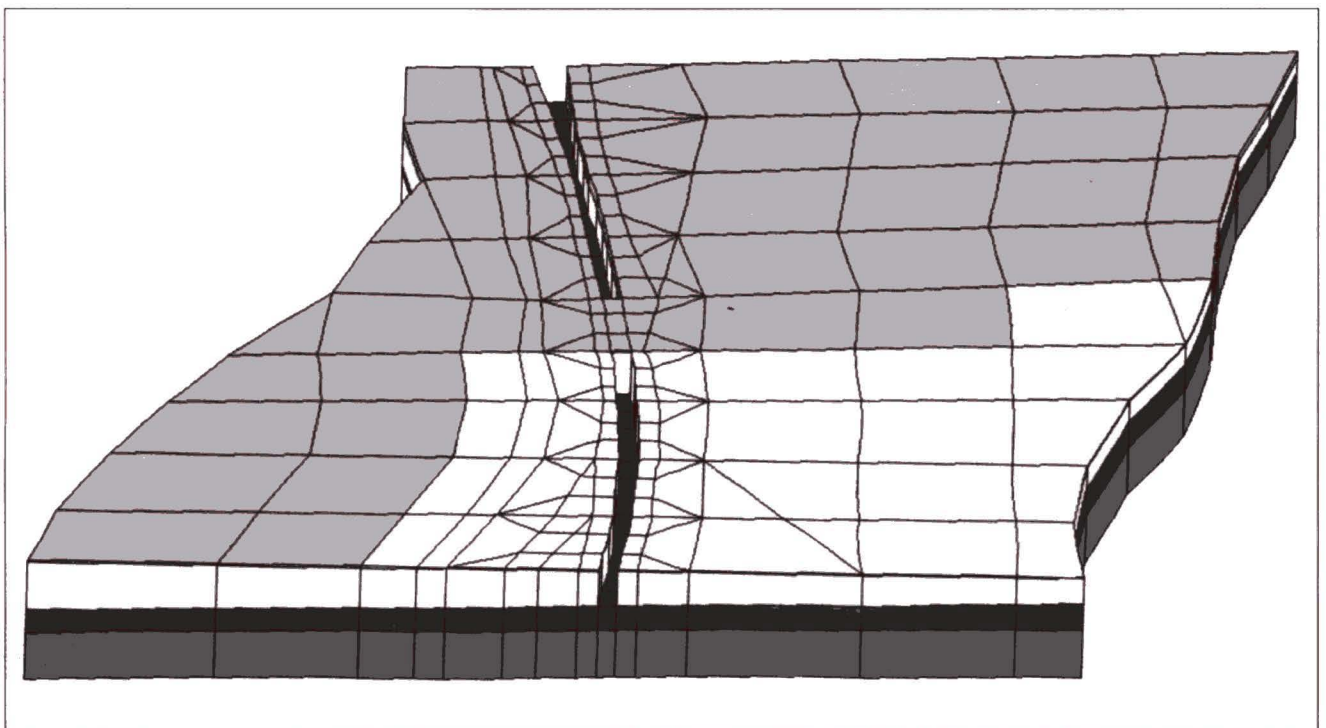


Abbildung 3. Elementnetz für die Simulation undurchlässiger Spundwände (Teilmodell).

pothetisch und mehr oder weniger unsicher sind (auch wenn man die Vertrauensgrenzen um die interpolierten Werte manchmal abschätzen kann). Alle Hydrogeologen machen Hypothesen, auch diejenigen, welche nicht mit Modellen arbeiten und insbesondere jene, die nicht über «genügend Daten» verfügen. Es könnte nun passieren, dass die Konsequenzen der vorgeschlagenen Hypothesen unrealistisch sind, oder mit den bisher gemachten Grundwasserbeobachtungen in Widerspruch stehen. Solche Widersprüche könnten der «intuitiven Beweisführung» leicht entweichen, aber ein Modell, auch wenn es nicht die «exakte Lösung» liefert, könnte sie leicht auffindig machen und dazu beitragen, die Bemühungen auf realistische Ideen zu konzentrieren. – Einige Beispiele werden die Anwendung der Modelle in der Hydrogeologie illustrieren.

Realität, Schema, Modell, Rechenprogramm

Das Modell ist nicht die Realität, es ist nur die Realisierung einer schematischen und symbolischen Darstellung des realen Systems. Die Beziehungen zwischen «Realität», «abstraktem Schema» und «Modell» sind auf Abbil-

dung 1 dargestellt; hierbei treten auch die wichtigsten Probleme der Modellierung in Erscheinung.

Der erste Schritt besteht aus der Konstruktion einer **schematischen und symbolischen Darstellung des realen Systems**, oft «konzeptuelles Modell» genannt. Die Grundwasserströmung wird durch Differentialgleichungen dargestellt (abstraktes und symbolisches Schema, im höchsten Sinne des Wortes), deren Gültigkeit meist durch mehrere theoretische Annahmen beschränkt ist.

Die Grundwasserströmung beschreibenden Differentialgleichungen enthalten einige Parameter, welche hauptsächlich vom Grundwasserträger abhängen, so z.B. Permeabilität und Speicherkoeffizient. Der Grundwasserträger wird nun durch diese Parameterfelder schematisiert, das heisst, man ordnet einen Durchlässigkeitswert und einen Speicherkoeffizientwert jedem Punkt des Aquifers zu, sogar dorthin, wo wir keine Messungen haben (darum sind Interpolation und Extrapolation der Messwerte notwendig).

Eine solche Darstellung des Grundwasserträgers wird notwendigerweise Hypothesen und Vereinfachungen enthalten und damit in grossem Masse schematisch sein. Schliesslich muss man, um das hydrogeologische Problem in

dem konzeptuellen Modell eindeutig definieren zu können, noch die Randbedingungen (das heisst, die Infiltrationen, Entnahmemengen und Vorfluterniveau) angeben.

Das so schematisierte System ist, im Vergleich mit der Realität, gleichzeitig ärmer und reicher geworden. Ärmer, weil stark vereinfacht, und reicher, weil die Daten aufeinander bezogen, in strukturierter Form erscheinen, wobei die Beziehungen zwischen Parameter und Variablen durch die jeweils benutzte Differentialgleichung definiert sind. Es ist vielleicht nicht überflüssig zu betonen, dass ein Schema immer in der im voraus festgelegten Absicht hergestellt ist, ein Problem zu lösen. Man begreift dann, dass das gleiche reelle System, je nach der Problemstellung, mit sehr verschiedenen Schemen dargestellt werden kann, und die Adequation eines Schemas nur in Abhängigkeit zur im voraus festgelegten Absicht beurteilt werden darf. Selbstverständlich wird ein Schema, so vollkommen es auch sein mag, niemals mit der Realität identisch sein.

Der zweite Schritt besteht aus der **Erstellung des eigentlichen, lauffähigen Simulationsmodells**. Da die elektrischen Analogmodelle seit Ende der 60er Jahre fast keine Verwendung mehr finden, werden hiernächst nur die

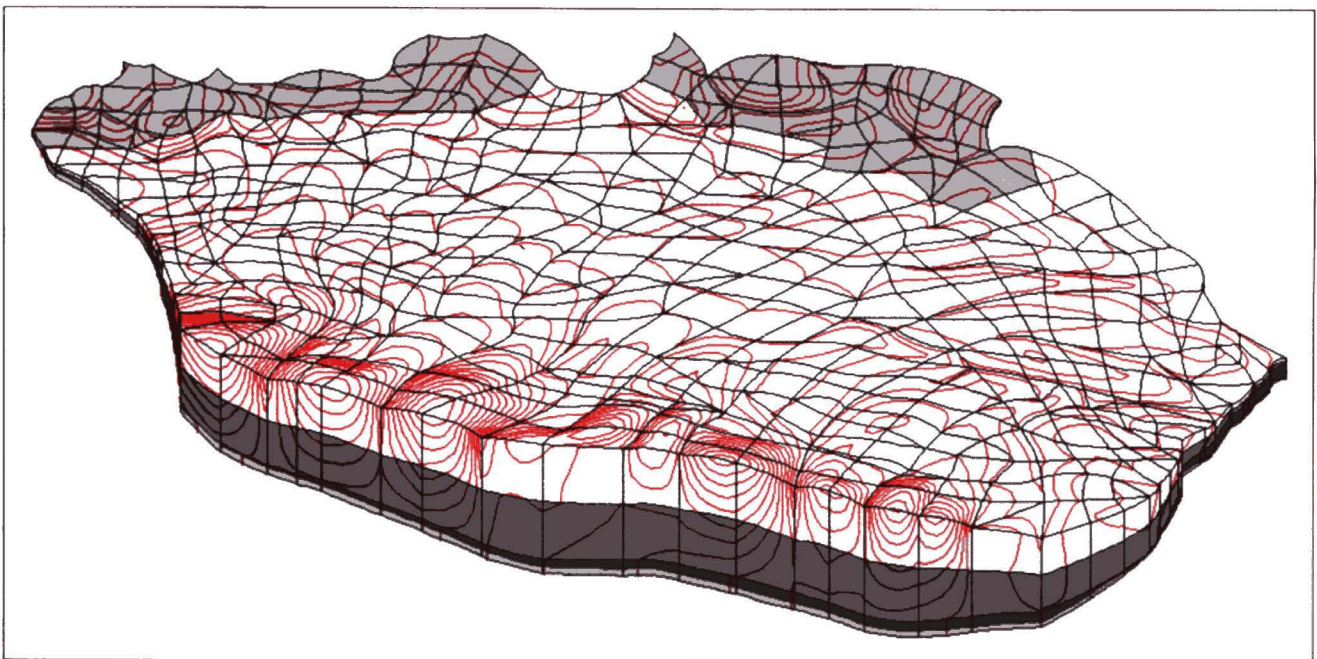


Abbildung 4. Simulierte Äquipotentiale (rote Linien) im bayrischen Molassebecken (Versuchsvariante).

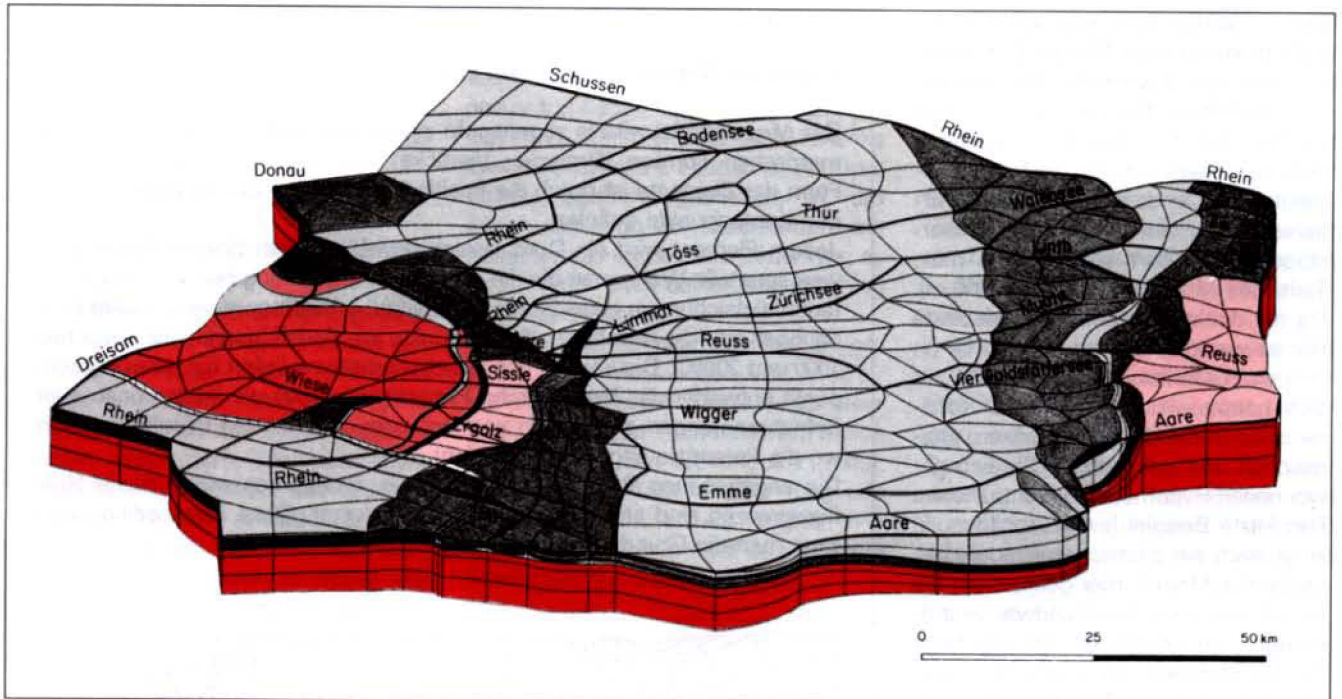


Abbildung 5. Dreidimensionales Elementnetz für das Regionalmodell der NAGRA. Die verschiedenen Abstufungen zeigen die verschiedenen hydrogeologischen Einheiten (nach NTB 84-50).

mathematischen Modelle und insbesondere die Modelle nach der Methode der finiten Elemente erwähnt. Hier wird das Modellgebiet in durch Knoten bestimmte finite Elemente aufgeteilt und die Differentialgleichung der Grundwasserströmung wird für jeden Knotenpunkt durch ein Computerprogramm numerisch gelöst. Die numerische Lösung enthält einen Potentialwert für jeden Knotenpunkt und diese Potentialwerte bestimmen eindeutig die Fliessrichtungen sowie die Durchflussmengen in jedem beliebigen Punkt des Modells (siehe zum Beispiel Abbildung 2). Die für einen Rechenablauf benötigten numerischen Daten beziehen sich auf die Geometrie der Elemente (Koordinaten der Knotenpunkte), auf den Durchlässigkeitswert und den Speicherkoeffizientwert (der jedem Element zugewiesen wird), sowie auf die Randbedingungen (Potentialwerte, Zu- oder Wegflüsse), welche man an einigen Knotenpunkten angibt. Die Genauigkeit der Lösung wird natürlich durch das numerische Lösungsverfahren und durch die Feinheit des Elementnetzes beeinflusst.

Die Übertragung der simulierten Resultate auf das reelle System ist die dritte, sehr wichtige Operation in der

Modellierung. Streng genommen sind die simulierten Resultate nur im Rahmen des stark vereinfachten Modells gültig. Ihre vernünftige Übertragung auf das reelle System erfordert, dass man sich aller in den beiden ersten Schritten gemachten Vereinfachungen bewusst ist («Abstraktion» und «Realisation», siehe Abbildung 1). Insbesondere müssen alle «Unsicherheiten» der ins Modell eingegebenen Werte als «Unsicherheiten» der simulierten Resultate in Erscheinung treten.

Die «Modellierung» besteht aus allen Operationen, die in Abbildung 1 dargestellt sind. Die Hydrogeologen müssen sich aller dieser Operationen bewusst sein, um die Nützlichkeit der Modelle objektiv beurteilen und im Aufbau der Modelle aktiv mitwirken zu können.

Einige Beispiele

Die meisten hydrogeologischen Becken sind stark heterogen aufgebaut: man findet oft mehrere übereinander liegende Aquifere mit verschiedenen Durchlässigkeiten (die sogenannten Grundwasserstockwerke), die möglicherweise durch gering permeable geologische Schichten voneinander

getrennt sind. Dies ist der Fall in dem in Abbildung 2 dargestellten Modell. Die Fliessrichtungen (Pfeile) geben Auskunft über die Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Aquiferen (Drainage oder Einspeisung des Grundwassers).

Das in Abbildung 3 dargestellte Elementnetz ist aus einem grösseren Modell (etwa 1,5 km x 5 km) herausgeschnitten worden, welches für ein Autobahnprojekt in der Gegend von Visp (VS) angefertigt wurde. Die fertige Konstruktion sollte undurchlässige und tief ins Grundwasser herabreichende Längsspundwände enthalten, welche einen Stau effekt auf die Grundwasserströmungen ausüben und damit die Ergiebigkeit der vorhandenen Brunnen beeinflussen könnten. Ziel des Modells ist es, den Einfluss der geplanten Konstruktion auf die Grundwasserströmungen zu simulieren, unter Annahme verschiedener Durchlässigkeitsverteilung und Tiefe der Spundwände. In dem in Abbildung 3 dargestellten Fall reichen die Spundwände bis zu einer wenig durchlässigen Siltschicht herab, welche zwei durchlässige Kiesaquifere voneinander trennt.

Abbildung 4 zeigt ein Modell mit ganz anderen Dimensionen: das Modellge-

biet ist 340 km lang und seine maximale Breite ist etwa 190 km. Es handelt sich um das Bayerische Molassebecken zwischen Donaueschingen und Passau. Die Grundwasserströmungen sollten in den mächtigen Tertiärsedimenten und in dem tief unter die Tertiärsedimente abtauchenden Malmkarstaquifer simuliert werden (die max. Tiefe des Modells ist etwa -7000 m). Da die direkte Kontrolle der Resultate nur an wenigen Stellen möglich ist (in einigen Tiefbohrungen), handelte es sich hauptsächlich darum, die Kohärenz der durch die geologischen, chemischen und isotopischen Studien gewonnenen Hypothesen zu kontrollieren. Das letzte Beispiel (siehe Abbildung 5) zeigt auch ein ziemlich ausgedehntes, regionales Modell. Hier geht es um die Simulation der tiefen Grundwasserströmungen im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz, zwischen Aarmassiv und Schwarzwald. Die geographische Lage des Modellgebietes, die wichtigsten hydrogeologischen Einheiten sowie das dreidimensionale Elementnetz des Modells sind auf Abbildung 5 dargestellt. Es ist interessant zu erwähnen, dass die simulierten Resultate an einigen Stellen durch die NAGRA Tiefbohrungen kontrolliert werden konnten. Insbesondere haben die in verschiedenen Tiefen ausgeführten Potentialmessungen die ascendente Grundwasserströmungen unter den Regionalvorflutern durchaus bestätigt.

Schlussfolgerungen

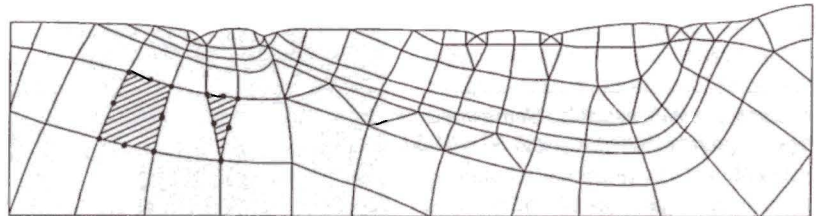
Obwohl die Anwendung der Simulationsmodelle in der Hydrogeologie unbestreitbar als ein wichtiger Fortschritt zu betrachten ist, zeigen die hier aufgeführten Beispiele nur sehr ungenügend die grossen Schwierigkeiten, welche bei der Modellierung der realen Grundwasserbecken auftreten. Es handelt sich hauptsächlich um die Beschaffung der Eingabedaten, welche für den Modellaufbau nötig wären und – vielleicht noch mehr – um die Beschaffung der Daten, welche die Kontrolle der Modellresultate ermöglichen könnten. Diese meist aus Kostengründen auftretenden Schwierigkeiten beschränken die weitgehende Anwendung der Modelle in der Praxis noch zu sehr. ■

Prinzip der Methode der Finiten Elemente

Das Modellgebiet wird in sogenannte «finite Elemente» mit einfachen geometrischen Formen (Dreiecke, Vierecke) aufgeteilt (siehe Schema). Die Form der Elemente ist durch die Position der auf den Elementseiten liegenden Knotenpunkte definiert.

Jedem Element wird ein Durchlässigkeitswert und ein Speicherkoeffizientwert zugeteilt. Wenn man die die Grundwasserströmung beschreibende Differentialgleichung in jedes Element integriert, erhält man sovieler lineare Gleichungen wie die Anzahl der Knotenpunkte im Modell (gewöhnlich zwischen 1000 und 20000). Die Lösung des Gleichungssystems liefert für jeden Knotenpunkt entweder das **hydraulische Potential** (dort wo die Infiltrationen oder Entnahmemengen angegeben wurden) oder die **Zu- und Wegflüsse** (dort wo die Potentiale angegeben wurden).

Die angegebenen Potentiale, Infiltrationen, Entnahmemengen sowie Nullflussgrenzen sind als **Randbedingungen** bekannt. Ohne Randbedingungen kann man die Grundwasserströmungen nicht simulieren.



Unterteilung eines Gebietes in «finite Elemente» (mit typischen Knotenpunkten)

Definition einiger elementarer Begriffe

– **Hydraulisches Potential:**

Das hydraulische Potential ist, in einem Punkt «A», als die Summe der Positionshöhe des Punktes über ein Referenzniveau und der im Punkt «A» gemessenen Druckhöhe definiert.

– **Aequipotentiale:**

Die Aequipotentiale sind Linien oder Flächen, welche die Stellen gleicher Potentiale verbinden.

– **Hydraulischer Gradient:**

Der hydraulische Gradient ist ein Vektor, der in jedem Punkt senkrecht zu den Aequipotentiale steht.

– **Flussvektor:**

Der Flussvektor ist das Produkt der Durchlässigkeit mit dem hydraulischen Gradient (Gesetz von Darcy).