**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
**Band:** 76 (1984)
**Heft:** 10

**Artikel:** Numerische Grundwassermodelle für die Praxis
**Autor:** [s.n.]
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-941232

**Nutzungsbedingungen**
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 15.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

neue Dimensionen. Durch eine sinnvolle Ausnützung dieser Eigenschaften kann die Überwachung der Anlagen verbessert werden, was zu einer grösseren Betriebssicherheit führt. Die gesteigerte Leistungsfähigkeit der leittechnischen Systeme lässt auch eine weitgehende, optimalere Automatisierung zu; dank den erweiterten Speichermöglichkeiten stehen auch mehr und bessere Daten für die Planung zur Verfügung.

Allerdings gilt es nach wie vor, alle bekannten physikalischen und technischen sowie die jeweiligen materiellen Randbedingungen zu beachten, deren Verletzung meist unheilvoll ist. Ebenso ist es auch weiterhin unerlässlich, Einsatz und Struktur leittechnischer Einrichtungen genau zu planen, denn Software ersetzt kein Pflichtenheft. Letztlich soll man sich auch über die Verwendungsmöglichkeit und Notwendigkeit «vorsorglich» abgespeicherter Daten kritische Gedanken machen, denn auch hier ist die Beschränkung langfristig eine Tugend.

Adresse des Verfassers: Dr. *Hans Jakob Leutenegger,* Direktor, Rittmeyer AG, Zug.

Vortrag, gehalten an der Fachtagung zum Thema Messen und Auswerten von Wasser-Parametern für Wasserkraftnutzung und Seenregulierung. Diese fand am 6.9.1984 anlässlich der 73. Hauptversammlung des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes in Sitten statt.

---

# *Numerische Grundwassermodelle für die Praxis*

*Jürg Trösch*


## *Zusammenfassung*

*Aus Anlass des 60. Geburtstages von Prof. Dr. h.c. Ernst U. Trüeb (7. 11. 1984) wird anhand einiger Beispiele die praxisbezogene Verwendung von numerischen Grundwassermodellen dargestellt. Selbst aufwendige dreidimensionale Modelle, wie sie an Hochschulen entwickelt wurden, werden heute in der Praxis verwendet. Dies wurde durch die stürmische Entwicklung im Computerwesen möglich.*

## *Summary: Numerical models of groundwater flow for engineering practice*

*On the occasion of the 60th anniversary of Prof. Dr. h.c. Ernst U. Trüeb, some examples of numerical models of groundwater flow used in engineering practice are shown. Even complicated three dimensional models developed at universities are used nowadays by private enterprises, as more of them have access to the necessary computer facilities.*

## *Résumé: Les modèles numériques des nappes phréatiques pour l'application pratique*

*A l'occasion du soixantième anniversaire du Prof. Dr h.c. Ernst U. Trüeb quelques exemples de modèles numériques de l'écoulement dans les nappes phréatiques sont présentés. Développés par les universités, ils sont employés aujourd'hui par les ingénieurs pour l'application pratique. Même des modèles compliqués en trois dimensions sont à leur portée, grâce au développement des ordinateurs.*


## *1. Einleitung*

Die Strömung des Grundwassers fasziniert die Menschheit schon seit Urzeiten. Während im Mittelalter (wie auch heute noch) Wasser im Untergrund von Rutengängern gesucht wurde, stehen heute dem Ingenieur moderne Instrumente und Methoden zur Verfügung. Für die Untersuchungen im Felde sind hochpräzise Messgeräte vorhanden, die sowohl in Bohrlöchern als auch mit indirekten Methoden (z.B. «remote sensing» aus der Luft) eine Fülle von Messdaten über das untersuchte Objekt liefern können. Im Büro unterstützt ihn der Computer bei seiner Arbeit, sowohl bei der Verarbeitung, Speicherung und Auswertung der Messdaten als auch bei der Projektierung neuer Anlagen mit Simulationsmodellen.

## *2. Rückblick*

In den sechziger Jahren wurden die ersten numerischen Grundwassermodelle entwickelt, vorerst mit der Differenzenmethode, aufbauend auf einem quadratischen Gitternetz [1], gleichzeitig auch mit finiten Elementen [2]. Diese Programme entstanden fast ausschliesslich an Hochschulen, da die notwendige Computerkapazität nur dort zur Verfügung stand. Viele Grundwassermodelle wurden noch mit Analogiemodellen erstellt, entweder mit elektrisch leitendem Widerstandspapier für zweidimensionale Modelle oder mit elektrischen Widerstandsnetzwerken. Diese teilweise dreidimensionalen Netzwerke füllten oft ganze Räume. In der Schweiz wurde um 1971 mit ersten Arbeiten zur Erstellung von Grundwassermodellen begonnen, ein Vergleich verschiedener Methoden erschien 1973 [3]. Es zeigte sich dabei, dass die verglichenen Methoden gleiche Resultate erbringen konnten, dass aber vor allem die Methode der finiten Elemente wegen ihrer Flexibilität in der Unterteilung der Topographie Vorteile bietet. Aufgrund dieses Vergleiches wurde die Methode der finiten Elemente weiter verfolgt, mit dem Ziel, dem praktisch tätigen Ingenieur und Hydrogeologen ein ohne grosse Computerkenntnisse verwendbares Modell in die Hand zu geben. Ein solches benützerfreundliches Modell wurde 1975 publiziert [4, 5]. Weitere Modelle wurden an verschiedenen Instituten entwickelt oder von ausländischen Universitäten übernommen, doch waren diese oft nicht praxisreif ausgebaut. Inzwischen sind fast zehn Jahre verstrichen, genügend Zeit, um Bilanz zu ziehen und den heutigen Stand der Grundwassermodelle zu überblicken.

## *3. Heutiger Stand*

Durch die Entwicklung im Energiebereich – Wärmepumpen mit Grundwasser – und die zunehmende Umweltverschmutzung sind für den Hydrogeologen neue Problemkreise aufgetreten, die sich mit den herkömmlichen Strömungsmodellen allein nicht mehr lösen lassen:

- Ausbreitung von abgekühltem oder erwärmtem Wasser im Grundwasserträger
- Ausbreitung von Schadstoffen im Grundwasser
- dreidimensionale Probleme
- Nutzung der geothermischen Wärme.

Gleichzeitig entwickelte sich die Computertechnik explosionsartig, so dass heute schnellere Rechner mit mehr Speicherkapazität einem viel breiteren Benützerkreis zur Verfügung stehen. Heute sind in vielen Betrieben Computer oder Computeranschlüsse vorhanden, und es steht die Software für Modelle zur Verfügung. Oft werden vor allem die Messdaten mit EDV verarbeitet (z.B. [6]) und mit einfacheren Programmen Pumpversuche ausgewertet. Die numerischen Modelle werden vor allem von den grösseren Ingenieurunternehmen und von spezialisierten Büros eingesetzt [7]. Das an den Hochschulen entwickelte Fachwissen konnte in diesen Fällen erfreulicherweise an die Anwender weitergegeben werden. Die international tätigen Unternehmungen stehen im harten Konkurrenzkampf, und qualitativ hochstehende Software interessiert sie daher besonders.

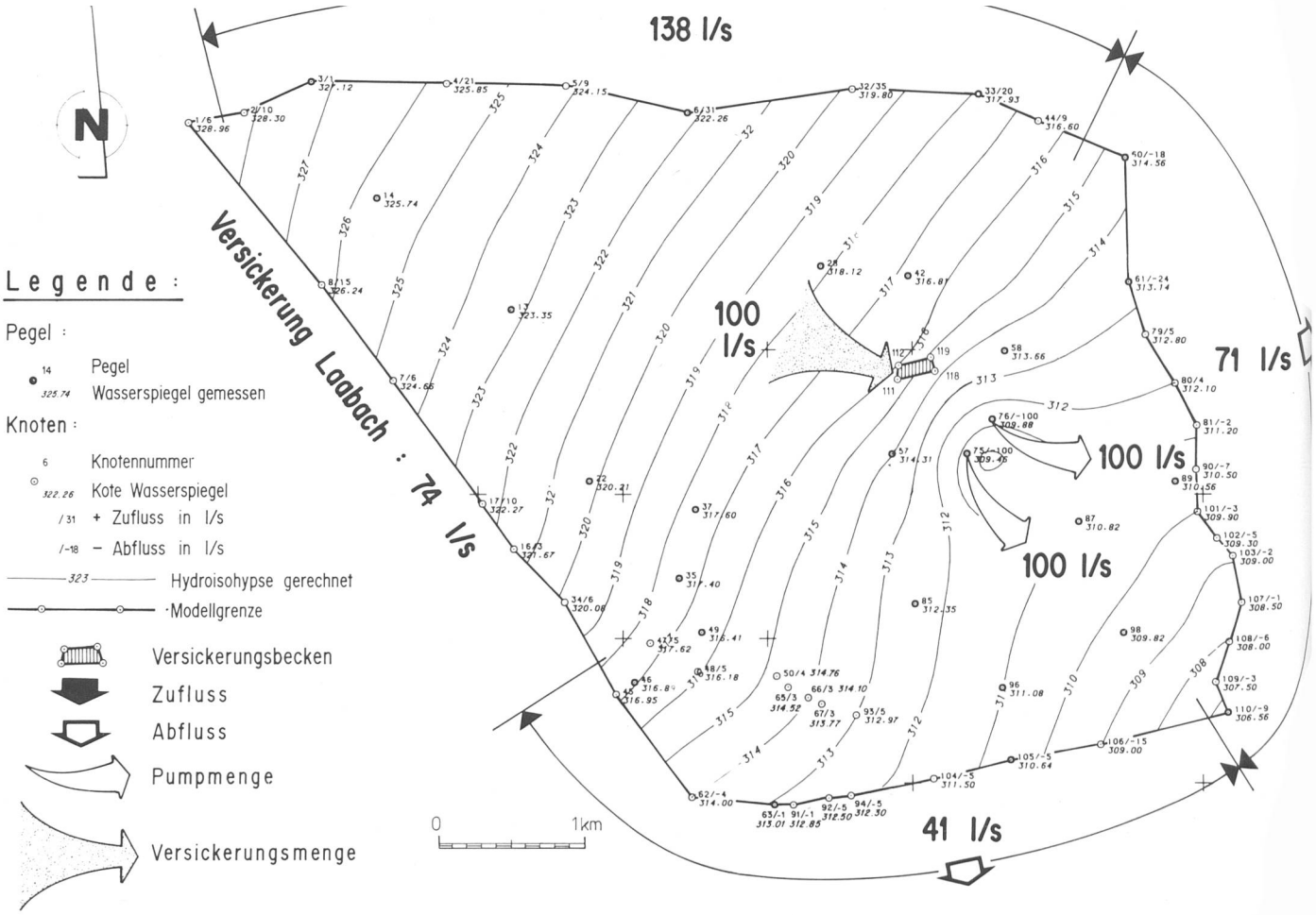


Bild 1. Zweidimensionale Simulation eines komplizierten Grundwasserfeldes mit Versickerungsbecken und Brunnen. (Mit freundlicher Genehmigung des Geotechnischen Institutes, Bern.)

Was heute noch weitgehend fehlt, ist die Ausbildung der Ingenieure und Hydrogeologen in numerischer Modelltechnik. Erstmals wurde 1983 von Prof. Dr. h.c. Ernst U. Trüeb im Nachdiplomstudium für Siedlungswasserwirtschaft die Möglichkeit geboten, Übungen mit Grundwassermodellen durchzuführen. In Zukunft werden auf diesem Gebiet vermehrte Anstrengungen notwendig sein, um jedem im Grund- und Erdbau tätigen Ingenieur das notwendige Rüstzeug mitzugeben.

Im folgenden sei ein kurzer Überblick über einige in der Praxis eingeführte numerische Modelle gegeben.

### *3.1 Zweidimensionale Modelle*

Die horizontal-zweidimensionalen Modelle werden für die Untersuchung und Bewirtschaftungsplanung von einfach aufgebauten Grundwasserträgern verwendet, wo die Annahme von Dupuit (keine Vertikalströmung) zulässig ist. Für mehrstöckige Grundwasserträger sind diese Modelle nicht geeignet, dazu müssten entweder mehrere Schichten des zweidimensionalen Modells gekoppelt oder ein dreidimensionales Modell verwendet werden. Als Beispiel eines zweidimensionalen Modells sei das in [5] in extenso publizierte Modell aufgeführt. Es ermöglicht die Berechnung inhomogener und anisotroper Grundwasserträger unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen: Brunnen, Zu- und Wegflüsse, gegebene Wasserspiegelkoten. Ein Beispiel einer mit diesem Modell berechneten Isohypsenkarte zeigt Bild 1.

Das ursprüngliche Computerprogramm wurde aufgrund von Wünschen der Anwender laufend ergänzt und verbessert. So wurden zusätzlich eingeführt:

– elementweiser Speicherkoeffizient bei instationärer Berechnung;

– elementweise verschiedene Niederschläge, um beispielsweise Sickerbecken einfacher eingeben zu können;

– knotenweise, nicht über das Element gemittelte Transmissivität, um bei starker Änderung der Grundwassermächtigkeit und grober Elementeinteilung doch ein richtiges Resultat zu erhalten. Die gemittelte Berechnungsart ist jedoch immer noch der Normalfall, da im Rechenaufwand geringer. Bild 2 zeigt den Vergleich eines nur mit einem Element berechneten Drainagegrabens.

Als wichtige Verbesserung konnte mit einer neuen Lösungsroutine (in [8] beschrieben) erreicht werden, dass die Knotennumerierung nicht mehr optimiert werden muss. Die Knoten können in beliebiger Reihenfolge numeriert werden. Damit sind Änderungen der Elementeinteilung bedeutend vereinfacht worden, da zusätzliche Knotennummern einfach angefügt werden können, ohne sämtliche Knoten neu zu numerieren. In gewissen Fällen ist es sogar möglich, Knoten- und Elementnummern auszulassen.

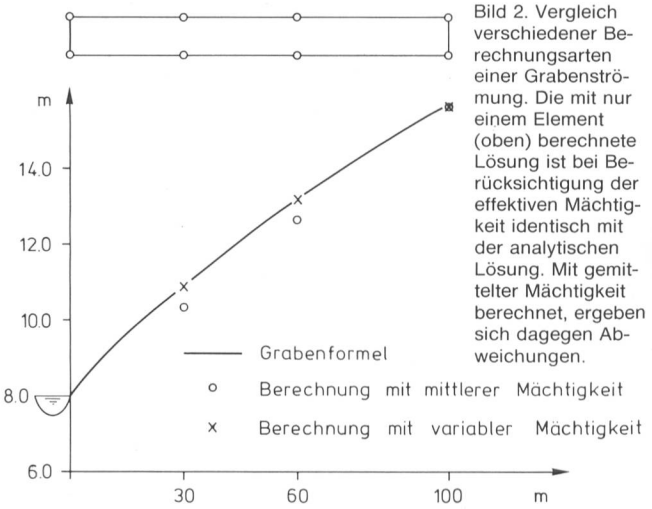


Bild 2. Vergleich verschiedener Berechnungsarten einer Grabenströmung. Die mit nur einem Element (oben) berechnete Lösung ist bei Berücksichtigung der effektiven Mächtigkeit identisch mit der analytischen Lösung. Mit gemittelter Mächtigkeit berechnet, ergeben sich dagegen Abweichungen.

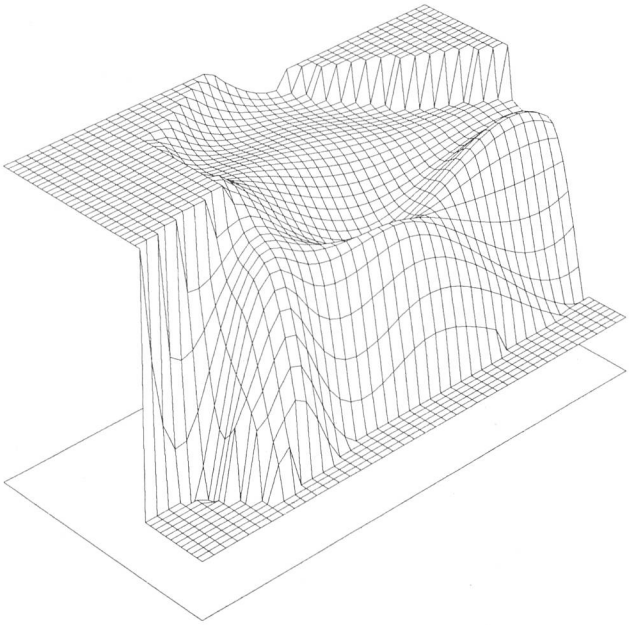

Bild 3. Computerdarstellung eines Grundwasserspiegels, berechnet mit einem dreidimensionalen Modell (nicht massstäblich). Das Gitternetz dient nur der Visualisierung und hat keinen Bezug zur ursprünglichen Elementeinteilung [15].

Die vertikal-zweidimensionale Version wurde nun ebenfalls eingebaut, um damit Sickerströmungen unter Bauwerken und durch Dämme berechnen zu können.

Das Modell wurde bisher noch nicht mit einem Wärme- und Stofftransportmodell ergänzt, da solche Modelle schon vorhanden und teilweise erhältlich sind [9], [10].

Der strittigste Punkt aller numerischen Modelle ist in Diskussionen meist die Kalibrierung der Modelle, also die Anpassung des Modells an die Natur durch Änderung der Randbedingungen und Bodenkennwerte. Der Neuling sucht dabei die Abweichung oft bei der mathematischen Formulierung, der numerischen Integration der Differentialgleichungen oder im Programm. Diese Fehler sind jedoch im Vergleich zu den vom Hydrogeologen gezwungenermassen eingeführten Vereinfachungen der natürlichen Gegebenheiten vernachlässigbar. Die numerische Rechnung gibt die zu den Eingabedaten gehörende Lösung. Abweichungen von Lösung und Natur müssen daher in den allermeisten Fällen bei den Randbedingungen (ungenügend bekannte Zu- und Wegflüsse) oder der Geologie (horizontale Schichtungen, schlecht erfassbare Durchlässigkeiten usw.) gesucht werden. Im Prinzip kann bei sehr gut bekannten Grundwasserträgern die Kalibrierung automatisiert werden. Doch sollte dieser Schritt erst vollzogen werden, wenn aufgrund der hydrogeologischen Kenntnisse das Modell schon eine vernünftige Lösung wiedergibt. Oft dürfte durch eine automatische Kalibrierung eine Naturtreue vorgetäuscht werden, die sich bei weiteren Rechnungen in Schall und Rauch auflöst. Zudem hält sie den Benützer davon ab, sich mit den Unstimmigkeiten seines Modells auseinanderzusetzen. Eine Kalibrierung aufgrund eines an einzelnen Punkten gemessenen Grundwasserspiegels ist immer einfacher, aber auch ungenauer, als wenn Messdaten von Ausbreitungsvorgängen herangezogen werden können. Denn erst ein Ausbreitungsvorgang widerspiegelt die eigentliche Grundwasserströmung. Versuche zur automatischen Lösung der Kalibrierung finden sich in [11], [12].

Neuere Arbeiten versuchen, Ausbreitungsvorgänge mit statistischen Methoden anzugeben, doch müssen noch zu viele Parameter experimentell bestimmt werden [13]. Die Praxisreife ist daher bei diesen Modellen noch nicht erreicht.

### *3.2 Dreidimensionale Strömungsmodelle*

Eine stationäre Version eines dreidimensionalen Modells mit finiten Elementen wurde für inhomogene und anisotrope Verhältnisse entwickelt [15]. Der Einsatz dieses sowohl in der Datenaufbereitung wie auch im Rechenaufwand anspruchsvollen Modells wird vor allem bei komplizierten geohydraulischen Problemen sinnvoll sein, beispielsweise bei dreidimensionalen Sickerströmungen um Bauwerke in komplizierten geologischen Verhältnissen (Bild 3).

## *4. Schlussfolgerungen*

Die numerischen Grundwassermodelle sind auch in der Schweiz weit verbreitet und werden zur Lösung vieler Fragestellungen eingesetzt. Aktuelle Probleme erfordern die Weiterentwicklung und praxisnahe Gestaltung der bestehenden Modelle. Für das Problem der Wärmenutzung der Grundwasserträger soll dieses Ziel mit der Ergänzung des nationalen Forschungsprogrammes «Probleme des schweizerischen Wasserhaushaltes» des schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung erreicht werden. Das unter der Leitung von Prof. *E. Trüeb* angelaufene Teilprogramm «Nutzung der natürlichen Wärme von Grundwasserträgern» wird sich zu einem wesentlichen Teil mit numerischer Modelltechnik befassen.

Literatur


[1] *Pinder G.F.* and *J.D. Bredehoeft* (1968): Application of the digital computer for aquifer evaluation. Water Resources Res. Vol. 4, No. 5.

[2] *Zienkiewicz O.C., P. Mayer* and *Y.K. Cheung* (1966): Solution of anisotropic seepage by finite elements. J. Engineering Mech. Div., ASCE, No. 1.

[3] *Schommer P., J. Trösch* und *U. Gerber* (1973): Vergleich von elektrischen und numerischen Verfahren zur Simulation von Grundwasserströmungen mit Feldmessungen. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 9 (vergriffen).

[4] *Trösch J.* (1975): Numerische Simulation Dupuitscher Grundwasserströmungen. Band 1: Handbuch für Benützer; Berechnungsbeispiel Bernisches Seeland. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 14 (vergriffen).

[5] *Trösch J.* (1975): Numerische Simulation Dupuitscher Grundwasserströmungen. Band 2: Programmbeschreibung. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 15 (vergriffen).

[6] *Hufschmid P., F. Muchenberger* und *A. Werner* (1981): GEOHYD 2, ein Programmsystem zur Darstellung und Auswertung geohydrologischer Daten. Zürich (FIDES Rechenzentrum).

[7] *Schikor G.* (1983): Hydrogeologie und Hydrochemie von Graz-Nord. Steirische Beiträge zur Hydrogeologie, 34/35.

[8] *Trösch J.* (1983): Strömung in Seen – dreidimensionale Simulation mit finiten Elementen. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 63.

[9] *Mathey B., A. Menjoz* und *B. Saugy* (1974): Modification du champ des températures de la nappe souterraine sous une raffinerie de pétrole. Mémoires de l'Association Internationale des Hydrogéologues, Tome X-1.

[10] *Bachmat Y., J. Bredehoeft, B. Andrews, D. Holtz* and *S. Sebastian* (1980): Groundwater Management: The use of numerical models. American Geophysical Union, Water Resources Monograph 5, Washington D.C.

[11] *Ensellem Y.* and *G. de Marsily* (1971): An Automatic Solution for the Inverse Problem. Water Resources Res. 7 (5).

[12] *Yeh W.G.* and *Y.S. Yoon* (1981): Aquifer Parameter Identification with Optimum Dimension in Parametrization. Water Resources Res. 17 (3): 664–672.

[13] *Gelhar L.W.* and *C.L. Axness* (1983): Three-Dimensional Stochastic Analysis of Macrodispersion in Aquifers. Water Resources Res. 19 (1): 161–180.

[14] *Trüeb E.* (1983): Grundwasserdargebot: quantitative und qualitative Aspekte. Schlussbericht des Nationalen Forschungsprogrammes «Wasserhaushalt» des schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (6 Beiträge verschiedener Autoren). Gas, Wasser, Abwasser, Vol. 63, Nr. 9.

[15] *Trösch J.* (1984): Beschreibung eines dreidimensionalen, stationären Grundwasserprogramms. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (unveröffentlicht).



Adresse des Verfassers: Dr. *Jürg Trösch*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.