

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 84 (1992)
Heft: 11-12

Artikel: Bestimmung hydrologischer Parameter durch inverse Modellierung
Autor: Trösch, Jürg / Kuhlmann, Ulrich
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-940608>

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: 10.02.2026

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

Bestimmung hydrogeologischer Parameter durch inverse Modellierung

Jürg Trösch, Ulrich Kuhlmann

Zusammenfassung

Die inverse numerische Grundwassermodellierung ermöglicht eine rasche automatisierte Eichung der Modelle unter Verwendung vorhandener Messdaten und Vorkenntnisse. Dank Aussagen über die statistische Fehlerstruktur kann das Modellkonzept verbessert werden.

Résumé: Détermination de paramètres hydrogéologiques par modélisation inverse

La modélisation numérique inverse permet d'estimer les paramètres du modèle en tenant compte des données et d'autres informations à priori. Comme la répartition statistique des résidus est connue, il est possible d'améliorer l'idée et la structure du modèle.

Abstract: Determination of hydrogeological parameters by inverse modelling

Inverse numerical modelling of groundwater flow is a straightforward automatic method for estimating the model parameters using field data and prior information. Due to the known distribution of residuals, the conceptual model may be improved iteratively.

1. Einleitung

Die numerische Modellierung von Grundwasserströmungen ist heute für Hydrogeologen und Ingenieure zu einer Selbstverständlichkeit geworden. Die Anwendungen reichen von der Untersuchung von Kiesaquiferen für die Trinkwasserversorgung über Altlastensanierung bis zur Lagerung radioaktiver Abfälle in geklüftetem Fels.

Die grosse Schwierigkeit jeder Modellierung besteht darin, dass der zu modellierende Grundwasserkörper weder in Ausdehnung und Aufbau (Durchlässigkeit) noch bezüglich Randbedingungen (Zu- und Wegflüsse, Niederschläge) bekannt ist. Wohl sind meist punktuelle Messungen verschiedener Parameter vorhanden, doch deren Übertragung auf den ganzen Untersuchungsbereich ist nur mit stark vereinfachenden Annahmen möglich.

Die inverse Modellierung ist der Versuch, mit automatischen Methoden die unbekannten Modellparameter (z. B. Durchlässigkeit) unter Berücksichtigung der vorhandenen Kenntnisse und Felddaten optimal zu bestimmen (Bild 1). Das resultierende Modell sollte in der Lage sein, den gemessenen Potentialverlauf wirklichkeitsgetreu zu simulieren. Das Modell kann anschliessend für Prognoserechnungen verwendet werden, indem nur noch das eigentliche Grundwassermodell mit neuen Randbedingungen gelöst wird, die Materialkennwerte wie Durchlässigkeit oder Speicherkoefizient werden jedoch unverändert übernommen. Als weiterer Vorteil der inversen Modellierung zeigt die statistische Analyse der Residuen zwischen Messung und Modell auf, wo die Lösung noch eine grosse Schwankungsbreite aufweist und allenfalls konzeptuelle Modellverbesserungen oder weitere Felduntersuchungen notwendig sind.

2. Theorie der inversen Modellierung

Zur Lösung des inversen Problems können verschiedene Methoden verwendet werden [Kuhlmann, 1992]. Die Maximum-Likelihood-Methode [Carrera und Neumann 1986]

bietet Vorteile, können doch die aus hydrogeologischen Untersuchungen erhaltenen Informationen direkt verwendet werden.

Die statistische Formulierung des inversen Problems nach der Maximum-Likelihood-Methode führt auf eine Zielfunktion J ,

$$J = J_h + J_Q + \sum J_i \quad (1)$$

die durch Variation der zu bestimmenden Parameter zu minimieren ist. Die Funktion setzt sich aus einem Anteil J_h für die Potentialwerte, J_Q für die Flusswerte sowie Plausibilitätskriterien J_i , die Vorkenntnisse über Modellparameter berücksichtigen, zusammen. Dabei bedeuten (in Vektorschreibweise):

$$J_h = (\mathbf{z}_h^* - \mathbf{z}_h)^T \mathbf{C}_h^{-1} (\mathbf{z}_h^* - \mathbf{z}_h) \quad (2)$$

$$J_Q = (\mathbf{z}_Q^* - \mathbf{z}_Q)^T \mathbf{C}_Q^{-1} (\mathbf{z}_Q^* - \mathbf{z}_Q) \quad (3)$$

$$J_i = (\mathbf{p}_i^* - \mathbf{p}_i)^T \mathbf{C}_i^{-1} (\mathbf{p}_i^* - \mathbf{p}_i) \quad (4)$$

\mathbf{z}_h^*	Messwerte des Potentials
\mathbf{z}_h	berechnete Potentiale
\mathbf{z}_Q^*	Messwerte des Flusses (z. B. Versickerungs- oder Exfiltrationswerte)
\mathbf{z}_Q	berechnete Flüsse
\mathbf{p}_i^*	bekannte Parameterwerte (Durchlässigkeit, Speicherkoefizient)
\mathbf{p}_i	berechnete Parameterwerte
$\mathbf{C}_h, \mathbf{C}_Q, \mathbf{C}_i$	Kovarianzmatrix der Fehlerstruktur der Residuen von Rechnung und Messung, die Inverse dieser Matrix stellt somit eine Wichtung der Residuen dar.

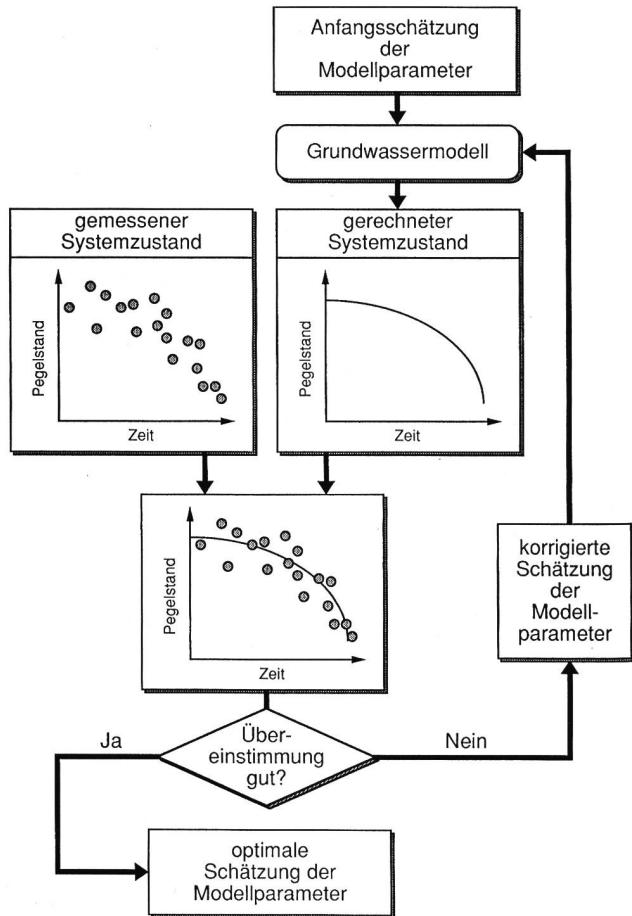


Bild 1. Prinzipschema der inversen Modellierung.

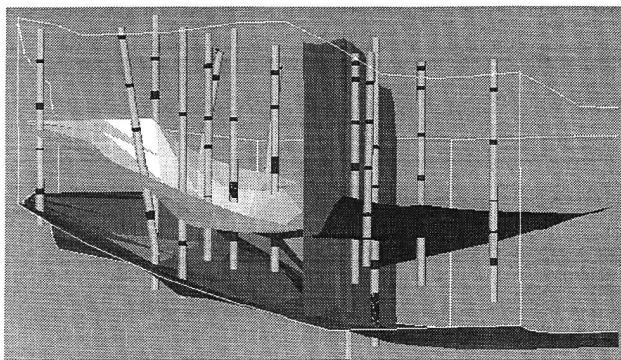


Bild 2. Chalk River Block: Situation, Klüfte und Bohrungen mit Packern.

Die für die Bestimmung der Zielfunktion J benötigten Potentiale \mathbf{z}_h und Flüsse \mathbf{z}_Q werden durch die direkte Lösung der Grundwasserströmungsgleichung berechnet. Diese Lösung setzt jedoch die Kenntnis der physikalischen Parameter Durchlässigkeit, Speichervermögen im ganzen Gebiet und der Randbedingungen an Fluss- und Potentialrändern voraus. Für die dafür notwendige Übertragung von lokalen Messgrößen auf das Modellgebiet sind entweder Interpolationsverfahren oder Zonierungen nötig.

Als Interpolationsmethode kann beispielsweise das Krigingverfahren verwendet werden [de Marsily 1986]. Bei der Zonierung wird einem Teilgebiet ein gleicher Parameterwert zugewiesen. Die Aufteilung der Zonen stützt sich dabei auf hydrogeologische Kenntnisse eines Gebietes. Zur Bestimmung der Zonenmittelwerte kann ebenfalls Kriging verwendet werden.

3. Identifizierbarkeit

Die Zielfunktion J ist eine konvexe Fläche im mehrdimensionalen Parameterraum. Da diese Fläche mehrere Minima aufweisen kann, muss sorgfältig abgeklärt werden, ob es sich um ein lokales oder globales Minimum handelt. Dies kann beispielsweise durch mehrere Rechengänge mit unterschiedlichen Startwerten erfolgen.

Ist die Zielfunktion gegenüber Parameteränderungen insensitiv, liegt meist eine flache, bananenförmige Zielfunktion vor. Die Parameter können in diesem Falle nur mit grosser Unsicherheit bestimmt werden. Erst zusätzliche Daten, insbesondere über transiente Vorgänge und Flussmessungen, können ein besseres Ergebnis ermöglichen. Es zeigt sich zudem, dass sowohl die Durchlässigkeit als auch der Speicherkoeffizient als logarithmischer Wert verwendet werden sollten.

4. Beispiel Chalk River Block

Im Rahmen eines internationalen Programmes [Hydrocoin, 1990] wurde ein kanadisches Testgebiet, der Chalk River Block, als Fallstudie zur Eichung von Modellen verwendet. Die Interpretation der vielen Felduntersuchungen ist in Raven [1986] zusammengefasst.

Der durchschnittlich 50 m mächtige Gneiss-Block ist durchzogen von zahlreichen Störungen und Kleinklüften. Umfangreiche hydraulische Tests lokalisierten fünf wesentliche Diskontinuitäten. Der südlich des Testgebietes einschneidende Diabasengang erwies sich dabei als un-durchlässige vertikale Barriere. Die vier übrigen Hauptkluftzonen bilden ein zusammenhängendes, höher konduktives Fließsystem. Die tiefste dieser Klüfte K1 erstreckt sich nahezu horizontal über das gesamte Test-

gebiet. Die höher liegenden, ebenfalls quasi-horizontalen Zonen K2 und K3 überspannen kleinere Flächen im Südwesten des Geländes. Die vertikale Zone K4 verbindet die Klüfte hydraulisch untereinander (Bild 2).

Insgesamt wurden 17 zum Teil geneigte Bohrungen bis zu einer Tiefe von 40 bis 60 m abgeteuft. Die Bohrlöcher sind mit Multipackersystemen mit bis zu 7 isolierbaren Testintervallen ausgestattet. Sie erlauben die Durchführung von Injektions- und Pumptests und ermöglichen die Langzeitaufnahme der hydraulischen Potentialhöhe. Die veröffentlichten Daten umfassen Angaben über Konduktivitäten und Speicherkoeffizienten als Ergebnisse der Testinterpretationen, Langzeitbeobachtungen der Potentialhöhe sowie die Absenkcurven aus zahlreichen Interferenztests.

Das für die inverse Modellierung verwendete Konzept ist naheliegend: Die 4 Hauptkluftzonen bilden das Hauptfließnetz, diskretisiert mit zweidimensionalen Elementen, die dazwischenliegende Felsmatrix wird als äquivalentes, poröses Medium betrachtet. Innerhalb dieses generellen Konzeptes werden verschiedene Modellstrukturen kalibriert, die sich durch Anzahl und Zonierung der Modellparameter unterscheiden.

Die Diskretisierung verwendet im wesentlichen das von Resele et al. [1988] erstellte Modell mit 700 Elementen und 2100 Knoten. Die Kalibrierung erfolgt anhand transienter Daten aus einem Pumpversuch. Insgesamt werden vier konzeptuell verschiedene Modellstrukturen mit 7/9/13/19 Parametern untersucht, wobei die Verfeinerung jeweils auf der Analyse der Residuen zwischen Rechnung und Messung des vorangehenden Modells beruht.

Leistungsvergleich der Modelle

Die Beurteilung der Simulationsergebnisse erfolgt anhand verschiedener Leistungskriterien. Die Zielfunktion Z nimmt beispielsweise von 225 (Modell 1) ab auf 29 bei Modell 4. Nicht überraschend rangieren die Modelle in der Reihenfolge, wie sie erstellt wurden. Die Reduktion bei allen Kriterien rechtfertigt die Einführung der neuen Parameter in jedem Schritt. Der Vergleich der mit dem Modell 4 berechneten Absenkungen mit den Messdaten zeigt die gute Übereinstimmung (Bild 3).

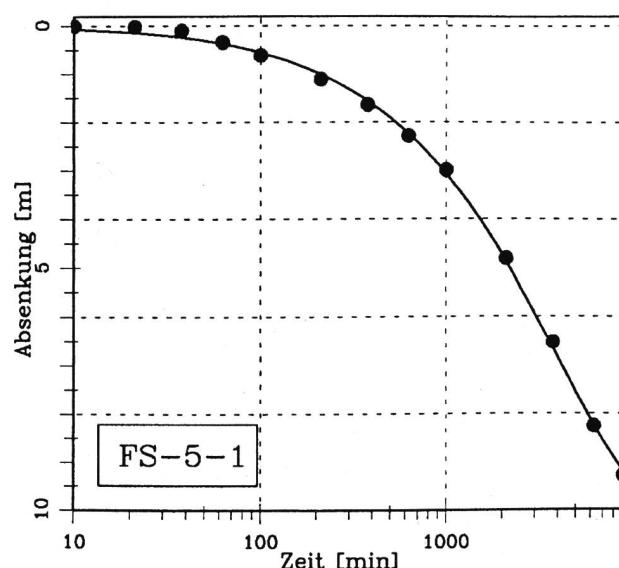


Bild 3. Vergleich zwischen Rechnung und Messung in einem Testintervall der Bodenkluft K1.

5. Schlussfolgerungen

Inverse Modellierung ist sowohl in Kiesaquiferen als auch in komplexen Kluftsystemen möglich. Stationäre Probleme bereiten jedoch oft Mühe, da sie mathematisch schlecht definiert sind. Transiente Messdaten von Potentialen und Flussraten verbessern die Situation wesentlich und sollten in jedem Falle benutzt werden. Dank einer konsequenten statistischen Formulierung kann nicht nur ein Modell geeicht, sondern iterativ die Modellstruktur und das konzeptuelle Modell verbessert werden.

In keinem Falle darf ein Benutzer erwarten, auf Knopfdruck ein fertig geeichtetes Modell zu erhalten. Im Gegenteil, die Auseinandersetzung mit den Felddaten und ihrer Rückwirkung auf das Modell wird intensiviert. Dem Hydrogeologen wird ein Arbeitsinstrument in die Hand gegeben, mit dem er das Verhalten eines Grundwasserträgers optimal nachvollziehen kann.

Verdankung

Die Arbeit wurde unterstützt von der Nagra, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Baden.

Literatur

- [1] Carrera, J., und Neumann, S. P. (1986): Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions, Water Resources Research, 22,2, 199–242.
- [2] de Marsily, G. (1986): Quantitative hydrogeology. Academic Press, London.
- [3] Hydrocoin (1990): The international project, groundwater hydrology modelling strategies for performance assessment of nuclear waste disposal. SKI, NEA/OECD, Paris.
- [4] Kuhlmann, U. (1992): Inverse Modellierung in geklüfteten Grundwasserträgern. Mitteilung Nr. 120. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zürich.
- [5] Raven, G. (1986): Hydraulic characterization of small scale ground-water flow system in fractured monzonitic gneiss. National Hydrology Research Institute, Paper 30. Inland waters directorate, Scientific Series No. 149, Canada.
- [6] Reseke, G., und Job, D. (1990): Calibration, validation and uncertainty analysis of a numerical groundwater model. Proc. IAH/IAHS Conf. on Water Resources in Mountainous Regions, Lausanne, 12,1, 79–86.

Adresse der Verfasser: Dr. Jürg Trösch, dipl. Bauing. ETH, und Urich Kuhlmann, dipl. Bauing., VAW, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zentrum, CH-8092 Zürich.

Daniel Bonnard (1907–1979)

Geboren am 22. Januar 1907 in Vernand VD als Sohn eines Pfarrers, machte er 1930 das Diplom an der Ingenieurschule in Lausanne. Anschliessend trat er ins Labor der Ingenieurschule unter der Leitung von Prof. A. Stucky ein, wurde 1946 Vizedirektor, später dann übernahm er die Leitung der Institution. 1947 wurde er ausserordentlicher, 1956 ordentlicher Professor für Wasser- und Erdbau an der EPFL. Er lehrte die Fächer Hydraulik, Grundbau, Wasserversorgung und Binnenschiffahrt. In der Forschung beschäftigte er sich mit der Wirkung von Wellen auf Dämme, dem Schwebtransport in Flüssen oder dem Einfluss von Frost auf Strassen und Schienen.

Seit 1938 arbeitete Bonnard beim *Bulletin Technique de la Suisse Romande* mit, wurde dann Chefredaktor und schliesslich gar Präsident des Verwaltungsrates. Während 30 Jahren verbrachte er viel Zeit damit, diese angesehene technische Zeitschrift der welschen Schweiz her-



auszugeben. Kurz vor seinem Tode erlebte Bonnard noch die Herausgabe von *Ingénieurs et Architectes Suisses*, welche das Resultat eines langen Annäherungsprozesses mit dem deutschsprachigen Organ des SIA darstellte.

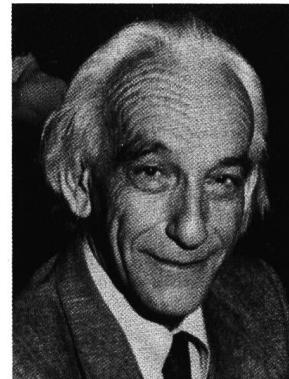
1954, im Alter von 47 Jahren, eröffnete Bonnard mit seinem Mitarbeiter André Gardel das Ingenieurbüro *Bonnard & Gardel Ingénieurs-Conseils SA*. Dort konnten nun neben Unterricht, Forschung und Redaktion Expertisen im Bereich Wasserbau, Grundbau, später auch in Energietechnik ausgeführt werden. Er stand dem Betrieb bis 1969 vor und war bis 1977 Verwaltungsratspräsident.

Als Verdienst für geleistete Dienste erhielt Bonnard die Honorarprofessur von der EPFL. Er bleibt den vielen Schülern und Mitarbeitern als einfache, aufrichtige und liebenswerte Person in Erinnerung. Er verstarb am 6. Februar 1979 nach dreimonatiger, schwerer Krankheit. WHH

Stucky, J. P. (1972). Le prof. Daniel Bonnard quitte son enseignement. «Ingénieurs et Architectes Suisses» 98: 114–115.

Gardel, A. (1979). Daniel Bonnard (1907–1979). «Ingénieurs et Architectes Suisses» 105: 83–84.

Ernest Bisaz (1918–1979)



Geboren am 14. März 1918 im Engadin, war Bisaz geprägt durch die Eigenheiten seiner Heimat. Stets gesprächsbereit, vielseitig gebildet und interessiert auch an kulturhistorischen Entwicklungen, beeinflusste er während Jahren den Arbeitsstil an der Versuchsanstalt.

Gleich nach seiner Diplomierung 1943 trat Bisaz in die damalige Versuchsanstalt für Wasser- und Erdbau ein. Als Versuchsingenieur, dann als Gruppenchef und schliesslich 1970 als Sektionschef ist sein Name mit einer Grosszahl von Modellaufträgen verknüpft, welche hauptsächlich im Bereich Wasser- und Flussbau lagen. Er hat aber auch in der Forschung bedeutende Beiträge geleistet, so im Sedimenttransport oder in der Kolkentwicklung. Seine Intuition bei hydraulischen Fragestellungen, sein Vermögen, Wichtiges von Nebensächlichem zu trennen und Junge für die Forschung zu begeistern, waren herausragende Eigenschaften von Bisaz. Er hat damit über eine lange Zeitspanne den Ruf und die Ausstrahlung der Wasserbauabteilung persönlich mitgeprägt. Er verstarb am 6. September 1979 infolge einer schweren Krankheit. WHH

Vischer, D. (1979). Ernest Bisaz. «ETH Bulletin» 150.
Taubmann, K.-C. (1979). Ernest Bisaz. «Schweizer Ingenieur und Architekt» 97(39): 783.