



Doctoral Thesis

Inverse Modellierung in geklüfteten Grundwasserträgern

Author(s):

Kuhlmann, Ulrich

Publication Date:

1992

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000692259> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 9922

INVERSE MODELLIERUNG IN GEKLÜFTETEN GRUNDWASSERTRÄGERN

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

Ulrich Kuhlmann
Dipl. Ing. (TH)

geboren am 26.7.1952
von Lauchringen / Baden (D)

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. D. Vischer, Referent
Prof. Dr. T. Dracos, Korreferent
Prof. Dr. J. Carrera, Korreferent

Zürich, 1992

KURZFASSUNG

Simulationsergebnisse numerischer Modelle sind im Normalfall mit Fehlern behaftet, die u.a. auf die Unsicherheit der eingehenden Parameter zurückzuführen sind. Dies gilt in besonderem Masse für Strömungsmodelle in der Hydrogeologie, wo naturgemäss unsere Kenntnisse über die Eigenschaften des wasserführenden Mediums beschränkt sind. Eine zuverlässige Modellierung erfordert daher die Bewältigung einer Reihe von Identifikationsaufgaben – insbesondere die optimale Bestimmung der hydrogeologischen Parameter.

Die vorliegende Arbeit stellt ein Modell vor, das unter den besonderen Aspekten einer transienten, gesättigten Strömung in geklüfteten Grundwasserträgern die Kalibrierung der hydro- und hydrogeologischen Eingabeparameter anhand eines gemessenen Strömungszustandes ermöglicht. Die Bestimmung der Parameter erfolgt dabei auf iterativem Wege durch wiederholte Lösung der Strömungsgleichungen mit Hilfe der Finite-Element-Methode. In geklüfteten Medien ist dabei eine dreidimensionale Betrachtung häufig unumgänglich. Darüberhinaus erlaubt das Modell die effiziente Erfassung diskreter Klufflächen und Fliesskanäle mit Hilfe unterdimensionaler Elemente. Räumlich verteilte Parameter, die in der Regel als lokale Messgrössen vorliegen, können entweder zonenweise oder punktweise in Kombination mit dem Kriging-Interpolationsverfahren behandelt werden.

Das inverse Problem der Grundwasserhydraulik, d.h. die Rückrechnung der involvierten Modellparameter aus einem gemessenen Strömungszustand, wird im Rahmen der statistischen Maximum-Likelihood-Methode formuliert. Auf diese Weise werden Mess- und Modellfehler mitberücksichtigt, sodass der Informationsgehalt kostspieliger Messungen weitgehend nutzbar wird. Die resultierende Zielfunktion kann automatisch unter Anwendung verschiedener mathematischer Optimierungsmethoden minimiert werden. Sowohl Gradientenverfahren als auch ein Gauss-Newton-Verfahren können im vorgestellten Modell eingesetzt werden, wobei sich in vielen Fällen eine sequentielle Kombination bewährt hat. Aufgrund des nichtlinearen Charakters des gestellten Optimierungsproblems wird die Effizienz der Algorithmen entscheidend geprägt durch die Genauigkeit der erforderlichen Ableitungen der Zielfunktion. Der vorliegende Code berechnet die exakten Ableitungen des numerischen Problems je nach Bedarf durch Anwendung der Adjoint-State-Methode oder durch direkte Differenzierung der Finite-Element-Gleichungen.

Eine Neuerung im Bereich der Inversen Modellierung – neben der drei-dimensionalen Betrachtung – stellt die Möglichkeit dar, nicht nur gemessene Potentialhöhen sondern auch Messungen von Wassermengen zu interpretieren, die durch Modellränder zu- oder abfließen. Anhand von Illustrationsbeispielen wird gezeigt, dass sich hierdurch die Identifizierbarkeit hydrogeologischer Parameter deutlich verbessert.

Abschliessend werden zwei Anwendungsbeispiele aus internationalen Validierungsprojekten untersucht. Die hydrogeologische Charakterisierung einer heterogenen Einzelkluft in Fallstudie I als auch die Kalibrierung eines drei-dimensionalen Kluft-Matrix-Systems in Fallstudie II dienen dazu, spezielle Möglichkeiten des entwickelten Codes einem Test zu unterziehen. Die Ergebnisse zeigen, dass selbst in komplexen Systemen des geklüfteten Mediums eine Inverse Modellierung sowohl konzeptionell als auch technisch realisierbar ist. Mit dem vorliegenden Code wird dem Modellierer ein Werkzeug in die Hand gegeben, das nicht nur eine rasche und zuverlässige Bestimmung der Modellparameter erlaubt. Vielmehr ermöglicht eine wiederholte Kalibrierung unter veränderten konzeptionellen Bedingungen zusätzlich die Identifikation struktureller Merkmale des Mediums.

ABSTRACT

An inverse modeling scheme is presented which allows the estimation of model parameters of saturated groundwater flow from measurements made on the system response as well as from prior information on the parameters. An indirect approach to the inverse problem is applied determining the hydro- and hydrogeological parameters of a numerical model by repeated solution of the transient flow equation. This so-called direct problem is solved numerically by the Finite Element Method. The three-dimensional model is especially designed for dealing with fractured media so that elements of lower dimension than the overall model can be included in order to model fault zones. Spatially distributed parameters are considered alternatively by conventional zonation or pointwise definition in connection with a kriging interpolation technique.

The inverse problem is formulated in the statistical framework of the maximum-likelihood estimation method which enables one to account for errors of the measurements and for errors of model output. The resulting objective function is minimized by alternative mathematical optimization algorithms where a sequential combination of a gradient method and a Gauss-Newton method has been found to perform best in many cases. With respect to the computational efficiency of the nonlinear optimization problem, the exact gradient (of the numerical problem) as well as the Jacobian matrix, i.e. the partial derivatives of the performance measures, are computed by the adjoint-state method or by direct derivation of the FE-equations, respectively.

In addition to potential head measurements which are conventionally used to calibrate flow models, flow rates measured at model boundaries can be considered. Some basic examples illustrate that such incorporation of flow rate data improves the identifiability problem in many instances. Finally, two case studies of international validation projects are investigated. The hydrogeological characterization of a highly heterogeneous fracture plane as well as the calibration of a three-dimensional fracture-matrix-system aim at testing the specific features of the model applying it to real data.

RÉSUMÉ

La connaissance optimale des paramètres hydrogéologiques est requise pour la modélisation des écoulements souterrains d'un aquifère. Une méthode de modélisation inverse est présentée, permettant d'estimer les paramètres du modèle en comparant ses prédictions avec des données expérimentales sur les caractéristiques de l'aquifère. Ainsi, les paramètres obtenus par modélisation inverse améliorent la calibration du modèle.

Un modèle numérique tridimensionnel à éléments finis est utilisé pour l'étude des écoulements transitoires en milieu fracturé. L'approche indirecte - appliquée pour la résolution du problème inverse - le considère dans le cadre de la théorie du maximum de vraisemblance et prend en compte aussi bien les mesures du potentiel et de débit, que l'information a priori relative aux paramètres du modèle. La minimisation de la fonction objective est réalisée à l'aide de différentes méthodes d'optimisation mathématique. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque les méthodes du gradient et de Gauss-Newton sont appliquées de façon séquentielle. Le caractère non linéaire de l'optimisation exige le calcul exact du gradient numérique et de la matrice Jacobienne. Ceux-ci sont calculés respectivement par la méthode adjointe et par dérivation directe des équations aux éléments finis.

La prise en compte de la variabilité spatiale des paramètres du modèle est effectuée à l'aide d'une méthode classique par zonation, aussi que de manière ponctuelle par une technique d'interpolation par krigeage. L'introduction de mesures de débit dans la formulation de la fonction objective améliore l'estimation des paramètres du modèle.

Finalement, l'approche proposée est appliquée à l'étude de deux sites pour lesquels des projets internationaux de validation sont en cours. Les résultats obtenus montrent que la modélisation inverse conduit non seulement à une meilleure calibration des paramètres du modèles, mais également à l'identification des structures de l'aquifère.