Joint and constrained inversion of geophysical data for improved imaging of aquifer structure and processes

Doctoral Thesis**Author(s):**

Doetsch, Joseph

Publication date:

2011

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006689501>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

DISS. ETH NO. 19762

**JOINT AND CONSTRAINED INVERSION OF GEOPHYSICAL DATA FOR
IMPROVED IMAGING OF AQUIFER STRUCTURE AND PROCESSES**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
JOSEPH ANDREAS DOETSCH

Dipl. Phys., ETH Zurich
born August 25th, 1981
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Alan G. Green, examiner
Prof. Dr. Niklas Linde, co-examiner
Prof. Dr. Stewart A. Greenhalgh, co-examiner
Prof. Dr. Andreas Kemna, co-examiner

2011

ZUSAMMENFASSUNG

Um die Verfügbarkeit von Grundwasser, dessen Anfälligkeit für Kontaminierung und eventuell Maßnahmen zur Sanierung im Falle von Verschmutzung zu beurteilen, kann eine prognostische Grundwassermodellierung wesentliches beitragen. Leider sind genaue Informationen über die Eigenschaften der Grundwasserleiter, welche für die Modellierung wichtig sind, schwer abzuschätzen. Geophysikalische Bildgebungsverfahren können die Struktur von Grundwasserleitern und deren Eigenschaften abschätzen, allerdings sind die Ergebnisse nicht eindeutig. Dieser Nachteil kann teilweise behoben werden, indem Daten verschiedener geophysikalischer Methoden in einer gemeinsamen Inversion (*joint inversion*) oder einer Inversion mit strukturellen Randbedingungen (*constrained inversion*) kombiniert werden. Fünf Beispiele für solche Datenintegrationsansätze für statische und zeitabhängige Daten sind Bestandteil dieser Dissertation und werden im Folgenden zusammengefasst.

Ein viel versprechender Ansatz zur Charakterisierung von Grundwasserleitern ist die strukturelle gemeinsame 3-D Inversion verschiedener geophysikalischer Daten, gefolgt von einer Einteilung in hydrologische Zonen und Zonenparameterschätzung. Anhand einer Studie mit synthetischen Daten wird gezeigt, wie die gemeinsame Inversion von Seismik- und Georadar-Laufzeiten, sowie Geoelektrik-Daten, die Klassifizierung von Zonen gegenüber getrennten Inversionen verbessert (3.7% anstatt 21.3% falsch klassifizierte Zellen). Dadurch werden auch die Zonenparameter genauer bestimmt (0.3% anstatt 1.8% Fehler). Daten eines Grundwasserleiters in der Nähe der Thur (Nordostschweiz) zeigen drei verschiedene Zonen mit ~30% unterschiedlicher Porosität und einem erhöhten Lehmanteil in der Tiefe.

Die Erweiterung der strukturellen gemeinsamen Inversion für zeitabhängige Daten wurde erfolgreich auf Georadar- und Geoelektrik-Daten eines Wasserinjektionsversuchs in ungesättigtem Sandstein angewandt. Die Ergebnisse einer Modellstudie und eines Feldversuchs zeigen, dass die zeitabhängige gemeinsame 3-D Inversion die Bilder des injizierten Wassers im Untergrund deutlich verbessert.

Durch die Inversion mit Randbedingungen kann die Uneindeutigkeit der Inversionsmodelle durch zusätzliche strukturelle Information vermindert werden. Die strukturellen Randbedingungen können entweder von hochauflösenden geophysikalischen

Methoden oder aus detailliertem Vorwissen stammen. Zum Beispiel konnten Geoelektrikmessungen zwischen Bohrlöchern nahe der Thur nur sinnvoll ausgewertet werden, nachdem die physikalischen Eigenschaften der wassergefüllten Bohrlöcher explizit berücksichtigt wurden.

Bei Oberflächengeoelektrikmessungen auf einer Kiesbank im Flussbett der Thur konnten Unterschiede innerhalb des Grundwasserleiters nur unter Berücksichtigung von Schichtgrenzen aus Georadarreflexionsdaten interpretiert werden. Ohne die Schichtgrenzen zwischen dem Kiesgrundwasserleiter und dem darunter liegenden Lehm wurden die Widerstandsmodelle durch die starken Kontraste verschmiert. Eine Entkopplung der Schichten in der Inversion konnte dieses Problem beheben.

Ein Salzmarkierungsversuch (*tracer test*) an der gleichen Messstelle an der Thur wurde mit Oberflächengeoelektrik beobachtet. Die Salzfahne konnte über 35 m verfolgt werden, bis sie das Messgebiet verließ. Die hydraulische Leitfähigkeit von 4×10^{-4} m/s wurde durch Vergleiche mit einer Simulation des Transports im Grundwasser bestimmt. Der Vergleich von synthetischen Geoelektrikinversionen basierend auf dem Grundwassermodell mit den Feldtestergebnissen zeigt, dass die Bewegung der Salzfahne anfänglich durch ein homogenes Modell beschrieben werden kann. Nach 6 Stunden wird aber der starke Einfluss der Heterogenität des Grundwasserleiters sichtbar.

Diese fünf Beispiele zeigen, dass das Kombinieren verschiedener geophysikalischer Messungen die Charakterisierung von flachen Grundwasserleitern gegenüber der einzelnen Datenbehandlung deutlich verbessert. Die hier gezeigten Ansätze können auf andere Methoden und Situationen erweitert werden. Die direkte Einbindung von hydrogeologischen Messungen in die Inversion wäre eine wichtige Neuerung.

ABSTRACT

Predictive groundwater modeling can help to assess groundwater supplies, their vulnerability to contamination, and the design of remediation schemes in cases of pollution. Unfortunately, accurate information on aquifer characteristics required for groundwater modeling is generally difficult to obtain. Geophysical imaging is a powerful tool for delineating aquifer structure and physical properties at an appropriate scale and resolution, but it suffers from problems of ambiguity and yields only indirect information on hydraulic properties. These limitations can be partly overcome by combining data from multiple geophysical techniques in joint or constrained inversion strategies. Five such data integration approaches for static and time-lapse data constitute the subject matter of this thesis and are summarized in the following.

One promising approach for aquifer characterization is structural 3-D joint inversion of multiple geophysical data sets, followed by clustering to form zones and subsequent inversion for zonal parameters. A synthetic study demonstrates how joint inversion of seismic and ground-penetrating radar (GPR) traveltimes and electrical resistance tomography (ERT) data greatly reduces misclassification of zones (down from 21.3% to 3.7%) and improves the accuracy of retrieved zonal parameters (from 1.8% to 0.3% error) compared to individual inversions. Application of the scheme to a data set collected close to the Thur River in northeastern Switzerland shows that the inversion models resolve three principal sub-horizontal units distinguished by a $\sim 30\%$ variation in porosity within the gravel aquifer and an increasing fraction of finer sediments with depth.

The extension of the structural joint inversion technique to time-lapse data is successfully applied to crosswell GPR traveltime and ERT monitoring data of a water injection experiment in unsaturated sandstone. The results from a synthetic and companion field study show that joint 3-D time-lapse inversion significantly improves the imaged features of the point-injected plume, such as lateral spreading and center of mass, as well as the overall consistency between models.

Constrained inversion is an effective means of reducing ambiguity in a single inversion, particularly if additional structural information is available. Structural constraints critical for

meaningful inversions can be either derived from complementary high-resolution geophysical surveys or based on detailed prior knowledge. For example, meaningful inversions of crosshole ERT data collected in the vicinity of the Thur River are only possible once the boreholes and their fluids are properly taken into account.

In using surface ERT to resolve aquifer properties below a gravelbar within the active channel of the Thur River, the imposition of interfaces delineated by reflection GPR were crucial to a meaningful interpretation of subtle changes within the aquifer. If GPR-defined boundaries between the shallow gravel aquifer and an underlying clay layer, and between two units within the aquifer, are not included in the inversion, then strong smearing in the resistivity model results from the large resistivity contrasts and regularization effects. Decoupling the regularization between the layers resolved this issue.

A salt tracer injection experiment at the same Thur River field site was monitored using surface ERT. The tracer plume could be tracked for 35 m until it moved beyond the ground covered by the electrode array. An effective 4×10^{-2} m/s hydraulic conductivity within the aquifer was determined by constraining a groundwater flow and transport model by the positions of the plume's center of mass determined in the time-lapse ERT images. Comparison of synthetic ERT inversions based on transport simulation with ERT inversions of the field experiment demonstrates that the tracer movement is initially consistent with a homogeneous aquifer, but that heterogeneity has a very strong influence on the plume transport 6 hours after the injection.

These five examples show that integration of multiple geophysical data sets can improve the characterization of shallow aquifers compared to separately treated data sets. The approaches presented here can be extended to other methods and situations. Including hydrogeological measurements directly in the modeling and inversion would be an important development.