

# New developments in electrical resistivity imaging with applications to geological CO<sub>2</sub> storage

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Wagner, Florian M.

**Publication date:**

2016

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010636965>

**Rights / license:**

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

DISS. ETH NO. 23418

**NEW DEVELOPMENTS IN ELECTRICAL RESISTIVITY IMAGING  
WITH APPLICATIONS TO GEOLOGICAL CO<sub>2</sub> STORAGE**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

**Florian Michael Wagner**

*M.Sc. Applied Geophysics*  
*TU Delft, ETH Zurich, RWTH Aachen University*

born on May 8, 1987  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Hansruedi Maurer, examiner  
Dr. Cornelia Schmidt-Hattenberger, co-examiner  
Prof. Dr. Martin O. Saar, co-examiner  
Prof. Dr. Andrew Binley, co-examiner

2016

# Abstract

In the context of climate change, the geological storage of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is considered as a transitional technology to reduce anthropogenic greenhouse gas emissions. Safe and reliable geological storage requires a thorough understanding of the storage reservoir and its induced spatiotemporal changes. Geoelectrical monitoring techniques are highly sensitive to compositional changes of the pore fluid and offer opportunities for spatiotemporal imaging of fluid displacement processes. Although well established in near-surface geophysics, the application of geoelectrical techniques to CO<sub>2</sub> storage monitoring is relatively new and entails specific practical and methodological challenges. This thesis investigates the optimal locations of electrodes along the borehole trajectories, borehole related imaging artifacts, and the integration with data sets from other monitoring techniques by means of a process-based hydrogeophysical modeling and inversion framework with an application to the pilot site for CO<sub>2</sub> storage at Ketzin, Germany.

Based on a developed optimization algorithm, it is demonstrated that a sparse, but well conceived set of electrodes can provide a large part of the information content offered by comparably dense electrode distributions. Optimized layouts exhibit a refinement of the electrode spacing within the target horizon and are symmetric for layered and homogeneous models. Effects of complex borehole completions are identified and minimized by means of an explicit discretization of the different completion types within the finite-element model. Of particular relevance are open parts of the well completion, since these can exhibit varying electrical properties due to the prevalence of either resistive CO<sub>2</sub> or conductive brine during the storage operation. Influences of borehole deviations are analyzed and the possibility to infer borehole deviations solely based on geoelectrical data sets is investigated. Finally, a new hydrogeophysical modeling and inversion framework is presented that allows to integrate geoelectrical data with observed CO<sub>2</sub> arrival times and gas pressure measurements for an estimation of the spatial permeability distribution. The integration of multi-physical data sets enables a better parameterization of the numerical reservoir simulations and thereby contributes significantly to an improvement of predictive simulation capabilities and understanding of the underlying processes. Although primarily developed to increase the reliability and efficiency of geoelectrical monitoring for geological storage reservoirs, the developed approaches are transferable to other applications in the field of electrical resistivity imaging.

# Kurzfassung

Im Kontext der Erderwärmung bietet die geologische Speicherung von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) eine Möglichkeit zur Reduktion anthropogener Treibhausgasemissionen. Um eine sichere und verlässliche Speicherung zu gewährleisten, ist eine umfangreiche raumzeitliche Überwachung der Speicherformation notwendig. Geoelektrische Verfahren weisen eine hohe Sensitivität in Bezug auf kompositionelle Veränderungen des Porenfluids auf und bieten zusätzlich Möglichkeiten einer raumzeitlichen Bildgebung. Obgleich weit verbreitet in der oberflächennahen Geophysik, ist die Verwendung geoelektrischer Verfahren zur Überwachung von CO<sub>2</sub>-Speichern relativ neu und bringt spezifische praktische und methodische Herausforderungen mit sich. Die vorliegende Arbeit untersucht die optimale Anordnung von Elektroden entlang des Bohrlochverlaufs, Bohrloch bedingte Inversionsartefakte und die Integration von anderen Überwachungsmethoden mithilfe einer prozessgestützten hydrogeophysikalischen Inversion am Beispiel des Pilotstandorts zur CO<sub>2</sub>-Speicherung in Ketzin, Brandenburg.

Auf der Basis eines entwickelten Optimierungsalgorithmus wird gezeigt, dass eine geringe, aber sorgfältig ausgewählte Teilmenge von Elektroden einen großen Anteil des Informationsgehalts von vergleichsweise dichten Elektrodenanordnungen besitzt. Optimierte Anordnungen weisen eine Verfeinerung des Elektrodenabstands im Zielhorizont auf und sind symmetrisch für homogene und geschichtete Modelle. Die Effekte komplexer Bohrlochkomplettierung werden mithilfe einer expliziten Diskretisierung des Bohrlochringraums in der Finite-Elemente-Modellierung untersucht und minimiert. Von Relevanz sind hierbei insbesondere offene Ringraumabschnitte, deren Füllzustände während eines Speicherbetriebs von CO<sub>2</sub> oder Salzwasser dominiert sein können, was eine Variabilität ihrer elektrischen Eigenschaften impliziert. Die Einflüsse von Bohrlochabweichungen und Möglichkeiten zur Abschätzung der Bohrlochabweichung, basierend auf geoelektrischen Messungen, werden analysiert. Abschließend wird ein neuer hydrogeophysikalischer Modellierungs- und Inversionsansatz vorgestellt, der durch die Hinzunahme von CO<sub>2</sub>-Ankunftszeiten und Gasdruckmessungen eine Abschätzung der räumlichen Permeabilitätsverteilung erlaubt. Die Integration multi-physikalischer Datensätze ermöglicht eine genauere Parametrisierung der computergestützten Speichersimulationen und trägt damit wesentlich zu einer Verbesserung der Langzeitvorhersagen und des Prozessverständnisses bei. Die vorgestellten Verfahren ermöglichen eine verlässliche und effiziente geoelektrische Überwachung von geologischen Speichern und sind darüber hinaus auf andere Anwendungsgebiete der Geoelektrik übertragbar.