

## Geoelektrische Tiefensondierungen über der Cuxhavener Rinne

Jörn Schünemann<sup>1</sup> und Annika Steuer<sup>2</sup>

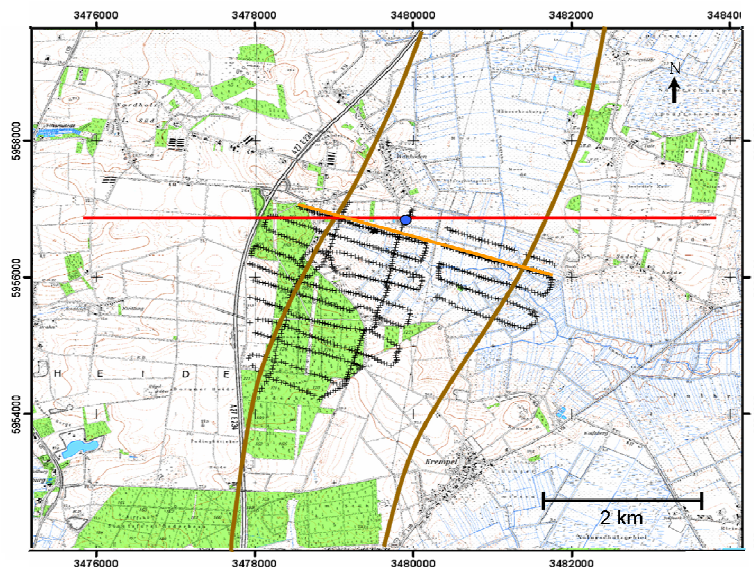
<sup>1</sup>GGA-Institut, Stilleweg 2, D-30655 Hannover, j.schuenemann@gga-hannover.de,

<sup>2</sup>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Stilleweg 2, D-30655 Hannover,  
annika.steuer@bgr.de

### Das BurVal Projekt

Das Ziel des von der EU kofinanzierten BurVal Projektes ist es eiszeitliche Rinnen auf ihre Struktur- und hydrologischen Eigenschaften zu untersuchen und das Wissen über diese tiefen Grundwasserreservoirs zu erweitern. Die Untersuchungen erfolgen mit verschiedenen geophysikalischen und hydrogeologischen Methoden, deren Ergebnisse zur Entwicklung eines Modells für die Grundwassergewinnung dienen sollen. Die Resultate werden in zwei Handbüchern zusammengefasst. Das technische Handbuch soll Geophysikern, Hydrogeologen und Ingenieuren zur Kartierung der Rinnen und der Bewertung der Grundwasserreserven dienen. Das Handbuch für Wirtschaft und Behörden gibt Empfehlungen, wie die Rinnen genutzt und geschützt werden können.

Die bis zu 400 m tiefen, 1-2 km breiten und mehrere Kilometer langen Rinnen entstanden während der Eiszeit im gesamten Nordseeraum, als Schmelzwasser unter dem Eis abfloss und dabei tief in die tertiären Sedimente schnitt. Während des Abtauens der Gletscher wurden die Rinnen mit quartären Sedimenten verfüllt. Diese Sedimente können je nach Beschaffenheit ergiebige Aquifere bilden. Einige Aquifere werden bereits von Wasserwerken zur Trinkwassergewinnung genutzt. An der Oberfläche sind diese Rinnen



**Abbildung 1:** Übersichtskarte des Messgebietes Wanhöden. Eingezeichnet sind die Rinne (braun), die Schlumberger Sondierung (rote Linie quer zur Rinne), ein Referenzprofil von TEM (orange), die SkyTEM Fluglinien (schwarze Kreuze) und die Lage der Bohrung (blauer Punkt).

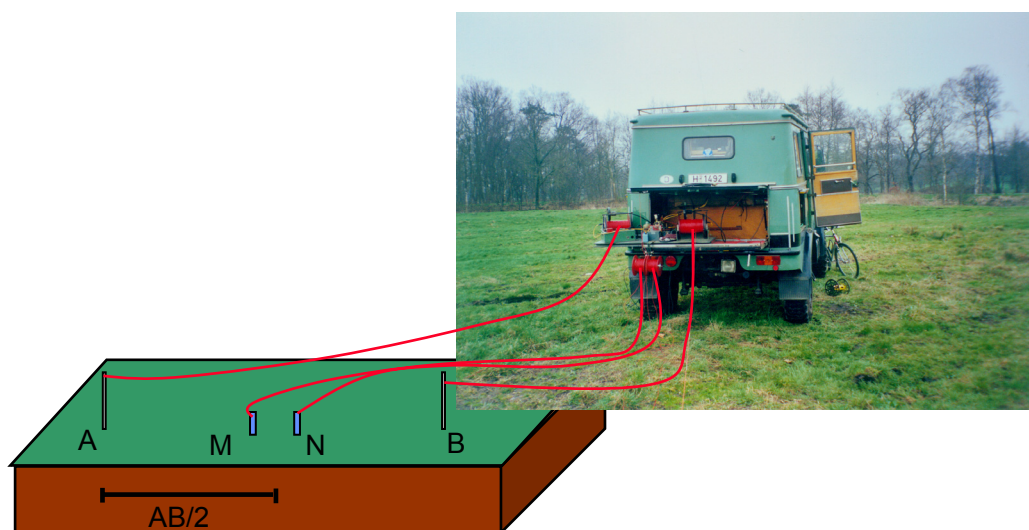
jedoch nicht mehr zu erkennen. Die gute Durchlässigkeit der Sedimente ermöglicht aber auch, vor allem im nordseenehnen Bereich, das Eindringen von Salzwasser. Die Gefahr von Schadstoffeinträgen von der Erdoberfläche ist ebenfalls gegeben. Geophysikalischen Verfahren können dazu beitragen die Rinnen zu untersuchen. Beispielsweise wurde durch Hubschrauber-Elektromagnetik (HEM) die Lage der Rinne genau bestimmt [Siemon et al., 2004]. Aus seismischen Messungen ist die Tiefe von Untergrundstrukturen bekannt, wie z.B. die Basis der Rinne im Messgebiet Wanhöden in 300 m Tiefe. Messungen mit gravimetrischen, elektromagnetischen und elektrischen Verfahren können die Untersuchungen bestätigen und ergänzen. [Gabriel et al., 2003; Wiederhold et al., 2005]

Die Cuxhavener Rinne verläuft in Nord-Süd Richtung und ist hauptsächlich mit Sand und Kies gefüllt. Teile der Rinne sind mit dicken Ton- und Schluffschichten abgedeckt.

### Geoelektrische Tiefensondierungen

Bei Schlumberger Messungen wird über zwei Elektroden A und B ein Gleichstrom in den Boden eingespeist. Im Untergrund bildet sich ein Potentialfeld aus, das im Wesentlichen von der Verteilung des spezifischen Widerstandes im Untergrund beeinflusst wird. Zwei Sonden M und N an der Erdoberfläche messen den Potentialunterschied (Abbildung 2). Hieraus lässt sich auf die Verteilung elektrischer Leitfähigkeitsstrukturen im Untergrund schließen.

Mit Schlumberger Sondierungen können Aussagen über die spezifischen Widerstände am Mittelpunkt der Auslage in verschiedenen Tiefen gemacht werden, in dem dazu die Abstände der Elektroden schrittweise vergrößert werden. Durch die wachsenden Abstände der Elektroden wird das Potential von immer tiefer liegenden Strukturen beeinflusst. Bei zu geringen gemessenen Spannungen, werden die Abstände der Sonden ebenfalls vergrößert.



**Abbildung 2:** Messfahrzeug mit schematischem Aufbau der Schlumberger Anordnung.

Im Messgebiet Wanhöden bereits durchgeführte Schlumberger Sondierungen mit Elektrodenabständen von  $AB/2 = 500$  m konnten die tiefen Bereiche der Rinne nicht erreichen. Nach einer

Faustformel kann hier eine Eindringtiefe von ca. 160 m abgeschätzt werden. Für elektromagnetische Methoden war aufgrund der abschirmenden Wirkung der gut leitenden Lauenburger Schichten die Eindringtiefe ebenfalls begrenzt [Steuer & Siemon, 2006]. Weitere Schlumberger Messungen mit  $AB/2 = 4000$  m sollten deshalb die Ergebnisse der Elektromagnetik in größeren Tiefen ergänzen.

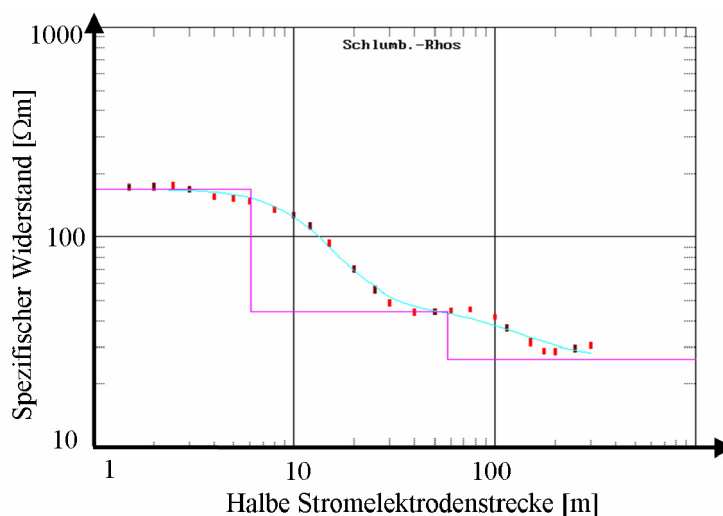
Zur Gegenüberstellung mit der Elektromagnetik (EM) werden die Daten bis  $AB/2 = 300$  m herangezogen, da der Sondierungspunkt über der Rinne lag und die EM hier nicht tiefer als 100 m eingedrungen ist. Bei größeren Elektrodenabständen sind mehrdimensionale Effekte zu beachten.

### Inversionsergebnisse Geoelektrik

Die Messdaten wurden mit dem Inversionsprogramm gkf2 [Rodemann & Reitmayr, 1996, 1998] bearbeitet. Hierbei handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Marquardt-Inversionsprogramms INGESO [Mundry & Dennert, 1981]. Bei einer Inversion wird in einem Iterationsprozess eine Modellkurve so lange an die Kurve der Messwerte angepasst, bis eine bestimmte Fehlergrenze unterschritten wird. Im Allgemeinen wird die Anpassung bei größerer Schichtzahl besser. Jedoch sollte die Zahl der Schichten so klein wie möglich gehalten werden, weil eine größere Schichtzahl auch größere Parameterfehler zur Folge hat.

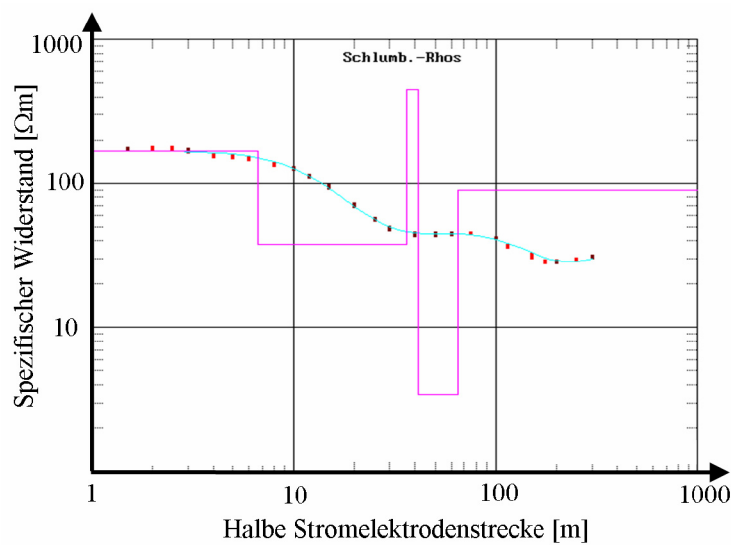
Es werden hier zwei Inversionsergebnisse dargestellt, bei denen einmal Kenntnisse über die Lauenburger Tonschicht einfließen und einmal nicht.

Ohne Kenntnisse des Untergrundes ist das Ergebnis der Inversion ein einfaches 3-Schicht-Modell. Die Lauenburger Tonschicht, bekannt aus Bohrungen und der Elektromagnetik, kann nicht aufgelöst werden, da es sich bei der Tonschicht um eine elektrisch dünne Schicht handelt. Die Modellanpassung ist mit 6% dennoch recht akzeptabel.



**Abbildung 3:** 1D Inversionsergebnis ohne Berücksichtigung von Vorinformationen. Es entsteht ein einfacher 3-Schicht-Fall.

Aus Bohrungen (Abbildung 5) und der Elektromagnetik [Steuer & Siemon, 2006] sind Mächtigkeit und Spezifischer Widerstand der Lauenburger Tonschicht bekannt. Wird deren Lage als Vorinformationen bei der Inversion berücksichtigt, ergibt sich ein 5-Schichtfall. Bei der Inversion wurden die Mächtigkeiten der 3. und 4. Schicht festgehalten, da es sich hierbei um dünne Schichten handelt und diese bei der Inversion in der Mächtigkeit gegen Null laufen würden. Der spezifische Widerstand der Tonschicht wurde nicht festgehalten, um das Ergebnis der Inversion später mit dem Ergebnis der EM vergleichen zu können. Als Resultat ergibt sich für den spezifischen Widerstand der Tonschicht mit  $5 \Omega\text{m}$  ein Wert, der in der Größenordnung dem Ergebnis der EM entspricht. Die Anpassung für dieses Modell liegt bei 3,5% (RMS).

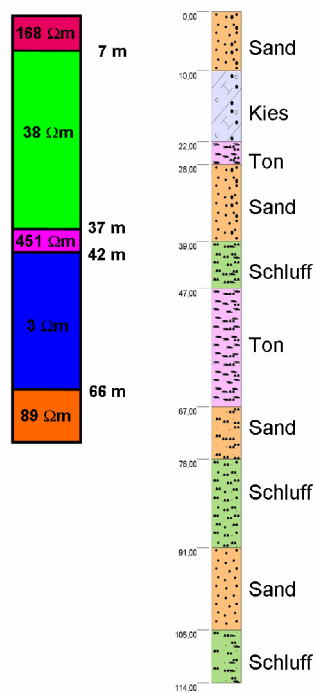


**Abbildung 4:** 1D Inversionsergebnis mit Berücksichtigung der Lage der Lauenburger Tonschicht. Die Mächtigkeiten der 3. und 4. Schicht wurden festgehalten.

Die Unsicherheiten bei der Bestimmung der einzelnen Parameter schwanken zwischen  $\pm 3\%$  und  $\pm 10\%$  für den 3-Schicht-Fall, sowie bei der 1. und 2. Schicht des 5 Schichtfalles. Die übrigen Parameter weisen Unsicherheiten von mehr als 23% auf. Die Ursache ist das Äquivalenzproblem.

Im Gegensatz zu einer idealen Kurve ist eine Messkurve mit Fehlern behaftet, die durch Messungenauigkeiten oder Abweichungen vom Horizontalschichtfall verursacht werden und sich wie ein Schlauch um die Messkurve legen. Nach dem Äquivalenzprinzip können viele verschiedene Schichtmodelle die Daten innerhalb des Schlauches erklären. Zusätzliche Informationen, zum Beispiel geologische Informationen aus Bohrungen oder Ergebnisse anderer geophysikalischer Methoden, können bei der Interpretation helfen, indem durch Festhalten von Parametern die Zahl der Äquivalenzfälle eingeschränkt wird. Einige Schichten treten zum Teil nur schwach in der Sondierungskurve hervor. Bei diesen Schichten handelt es sich um dünne Schichten. Eine Schicht kann bereits als dünn bezeichnet werden, wenn sie die gleiche Mächtigkeit hat wie das Hangende.

Beim gezeigten Modell treten zwei dünne Schichten durch das Festhalten bekannter Schichtgrenzen auf. Daraus ergeben sich die oben genannten großen Unsicherheiten.



Bei der Gegenüberstellung des 5-Schicht Inversionsergebnisses mit einem Bohrprofil aus der nahen Umgebung des Messpunktes (Lage siehe Abbildung 1) ist zu erkennen, dass die Schichttiefen zum Teil gut mit denen des Bohrprofils übereinstimmen. Die spezifischen Widerstände sind denen der HEM ähnlich, vor allem bei der 4. Schicht, der Lauenburger Tonschicht. Der spezifische Widerstand der ersten Schicht spricht für Sand. Das wird auch im Bohrprofil bestätigt. Der zweite Wert ist ein Mischwiderstand aus verschiedenen Materialien (Sand, Ton, Kies). Der spezifische Widerstand der dritten Schicht ist zu hoch und die Mächtigkeit ist recht gering. Hier tritt das Äquivalenzproblem hervor. Ein geringerer Widerstand würde hier zu einer größeren Mächtigkeit der Schicht führen. Das heißt, dass die Parameter nicht genau bestimmt werden können.

**Abbildung 5:** Gegenüberstellung des 5-Schicht-Inversionsergebnisses mit dem Bohrprofil.

## Zusammenfassung

Es wird gezeigt, dass eine Kombination von elektrischen und elektromagnetischen Verfahren zum Vorteil bei der Auswertung genutzt werden kann. Ohne Vorwissen über den Untergrund ergibt sich bei der Geoelektrik-Inversion ein einfaches 3-Schicht-Modell, das schon eine relativ gute Anpassung zeigt. Durch die Berücksichtigung der aus der EM gewonnenen Erkenntnisse über den Untergrund, wie hier zum Beispiel die Tiefenlage und die Mächtigkeit der Lauenburger Tonschichten, kann das Inversionsergebnis durch das Festhalten von Parametern sinnvoll beeinflusst und die Anpassung verbessert werden.

Die EM-Verfahren hatten Schwierigkeiten die Lauenburger Tonschicht in der Rinne zu durchdringen und Erkundungstiefen von mehr als ca. 100 m zu erreichen. Es zeigt sich, dass bei beiden Methoden der Widerstand der Lauenburger Tonschicht ähnlich bestimmt wird. Um Kenntnisse über die Widerstandsverhältnisse in größeren Tiefen zu bekommen, wurden Schlumberger Messungen mit  $AB/2 = 4000$  m durchgeführt. Bei den hier dargestellten Ergebnissen handelt es sich um Inversionen unter 1D Bedingungen. Bis  $AB/2 = 300$  m kann diese Betrachtung erfolgen. Bei größeren Elektrodenabständen muss davon ausgegangen werden, dass mehrdimensionale Effekte der Rinne eine Rolle spielen und deshalb wird eine Auswertung in diese Richtung durchgeführt. Ergebnisse hierzu liegen allerdings noch nicht vor.

## Literatur

GABRIEL, G., KIRSCH, R., SIEMON, B. & WIEDERHOLD, H. (2003): Geophysical investigation of buried Pleistocene subglacial valleys in Northern Germany. - *Journal of Applied Geophysics*, **53**: 159-180.

MUNDRY, E (1985): Gleichstromverfahren, in: BENDER, F. (Hrsg.) *Angewandte Geowissenschaften*, Enke Verlag, Stuttgart.

MUNDRY, E. & DENNERT, U. (1981): INGESO 81, Bericht über ein Programm zur Inversion geoelektrischer Sondierungskurven für horizontal geschichteten Untergrund, NLFb-Bericht Nr. 92894, Hannover.

REPSOLD, H. (1991): *GEOKURZ, Geoelektrik in wenigen Worten, Eine kurze Anleitung für die Interpretation geoelektrischer Tiefensondierungen*, Eigenverlag, Isernhagen-Kirchhorst.

RODEMANN, H. & REITMAYR, G. (1996): Zwei Auswerteprogramme für DC-Geoelektrik, in: BAHR, K & JUNGE, A. (Hrsg.) *Protokoll über das 16. Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung*, Burg Ludwigstein, 9.4.-12.4.1996, Göttingen / Frankfurt/Main.

RODEMANN, H. & REITMAYR, G. (1998): Kurzbeschreibung für das Programm GKF2, Stand 5/98. *Technischer Bericht*, GGA-Institut/BGR, Hannover.

SIEMON, B., EBERLE, D.G. & BINOT, F. (2004): Helicopter-borne electromagnetic investigation of coastal aquifers in North-West Germany. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, **32** (5/6), 385-395.

STEUER, A. & SIEMON, B. (2006): Untersuchungen der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne mit TEM, HEM und SkyTEM. *Protokoll über das 21. Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung*, Haus Wohldenberg, 3.10.-7.10.2005, Hildesheim.

WIEDERHOLD, H., GABRIEL, G., GRINAT, M. (2005): Geophysikalische Erkundung der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne im Umfeld der Forschungsbohrung Cuxhaven. – *Z. Angew. Geol.*, **1/2005**; Hannover (in press).