

## Untersuchungen der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne mit TEM, HEM und SkyTEM

Annika Steuer und Bernhard Siemon

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Stilleweg 2, D-30655 Hannover,  
[annika.steuer@bgr.de](mailto:annika.steuer@bgr.de), [bernhard.siemon@bgr.de](mailto:bernhard.siemon@bgr.de)

### Zusammenfassung

*Innerhalb eines internationalen Projektes zur Untersuchung von quartären Rinnen als Grundwasserreservoir wurden drei elektromagnetische (EM) Methoden im Bereich der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne eingesetzt und miteinander verglichen. Die Ergebnisse der Methoden Transient-Elektromagnetik (TEM), Hubschrauber-Elektromagnetik (HEM) und SkyTEM stimmen gut miteinander überein. Die HEM erfasst deutlich die laterale Ausdehnung und die Tiefe der Oberkante der Lauenburger Schichten, doch die gut leitenden Tone und Schluffe begrenzen die Erkundungstiefe. Dort, wo dicke leitfähige Schichten existieren, gelingt es mit HEM nicht diese zu durchdringen. TEM-Verfahren helfen hier die Mächtigkeit der tonhaltigen Schichten zu bestimmen und detektieren zusätzlich außerhalb der Rinne eine gut leitende Schicht in größerer Tiefe. EM-Messungen aus der Luft haben den Vorteil, dass eine schnelle Kartierung des elektrischen Widerstands mit einer großen räumlichen Auflösung möglich ist. Die kosteneffiziente HEM im Frequenzbereich konkurriert mit dem teureren Zeitbereichsverfahren SkyTEM, das eine größere Erkundungstiefe erreicht. Bodengeophysikalische Messungen wie die TEM sind andererseits genauer, aber definitiv zeitaufwendiger als die Methoden aus der Luft. Es hängt von Untersuchungsobjekt, notwendiger Erkundungstiefe, Zeit, Geld und Arbeitskraft ab, welche Methode oder Methodenkombination gewählt wird.*

### Das BurVal Projekt

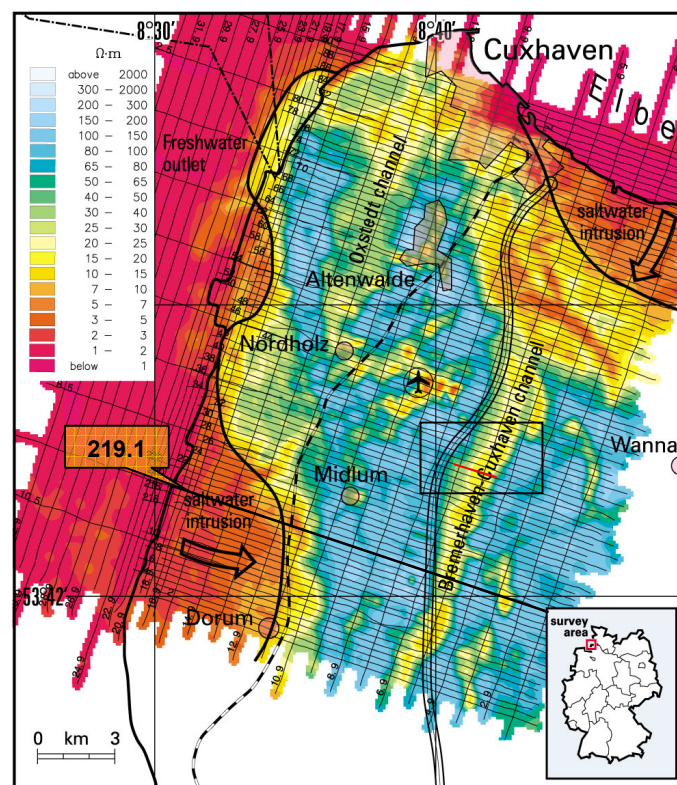
Das interregionale **Buried Valleys** Projekt ([www.burval.org](http://www.burval.org)) wird kofinanziert von der Europäischen Union und beschäftigt sich mit der Untersuchung von eiszeitlichen Rinnen in Nordeuropa mit unterschiedlichen Methoden. Diese Rinnen enthalten ergiebige Grundwasserreservoirs, die wichtig für die zukünftige Wasserversorgung sein werden.

Das Ziel vom BurVal-Projekt ist es, das Wissen über die Ausdehnung, den inneren Aufbau und die hydraulischen Eigenschaften dieser Grundwasserressourcen zu vertiefen, die Gefahren durch Schadstoffeinträge von der Erdoberfläche abzuschätzen und die Wechselwirkung mit anderen Grundwasserleitern oder eindringendem Salzwasser zu untersuchen.

## Untersuchungsgebiet

Eines der Untersuchungsgebiete ist die Bremerhaven-Cuxhavener Rinne, die durch eiszeitliche Schmelzwässer bis zu 300 m in die tertiären Sedimente eingeschnitten wurde. Die Füllung mit groben Sand und Kies wird von fein- bis mittelkörnigem Sand überlagert. Im oberen Bereich existieren Ton- und Schluffablagerungen, die Lauenburger Schichten, die sich vom umgebenden Material durch ihre hohen elektrischen Leitfähigkeiten abheben. Dadurch sind sie mit elektromagnetischen Methoden gut detektierbar.

Die Karte des scheinbaren spezifischen Widerstands für die Frequenz 1,8 kHz der Hubschrauber-Elektromagnetik (Abbildung 1) zeigt die Salzwasserintrusionen ins Landesinnere, westlich von Cuxhaven einen Süßwasseraustritt ins Wattenmeer und (parallel zur Autobahn) eine lang gezogene Struktur mittleren spezifischen Widerstandes, bei der es sich um die Lauenburger Schichten in der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne handelt. Abbildung 1 enthält auch die Lage des Testgebiets Wanhöden.



**Abbildung 1:** Karte des scheinbaren spezifischen Widerstands für die Frequenz 1,8 kHz der Hubschrauber-Elektromagnetik. Der schwarz umrandete Kasten im zentralen Abschnitt der Rinne markiert das Messgebiet Wanhöden.

## Hubschrauber-Elektromagnetik (HEM)

Beim Hubschrauber-System der BGR werden drei verschiedene geophysikalische Methoden simultan angewendet. Im Hubschrauber selbst sitzt das Gammastrahlen-Spektrometer der Radiometrie. Etwa 40 m unter dem Hubschrauber wird der so genannte Bird nachgeschleppt. Hierbei handelt es sich um ein System der Firma Fugro Airborne Systems, das aus 5 horizontal-koplanaren Spulenpaaren für die EM und einem Cs-Magnetometer besteht. Der Frequenzbereich der HEM ist 380 Hz – 190 kHz.

Das oszillierende Primärfeld jeder Frequenz induziert Wirbelströme im leitfähigen Untergrund. Diese generieren ein magnetisches Sekundärfeld, das mittels Empfangsspulen registriert wird.

Die Fluggeschwindigkeit beträgt 140-150 km/h. Bei einer Messrate von 10 Hz erhält man einen mittleren Stationsabstand von etwa 4 m.

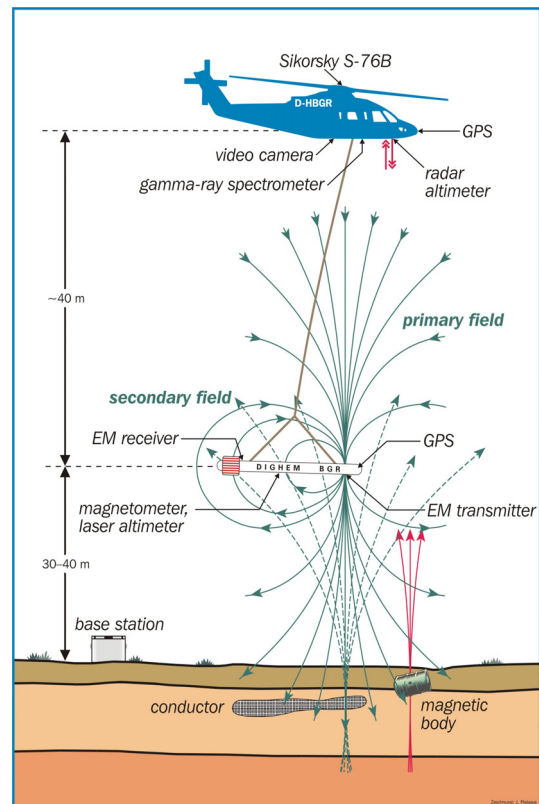


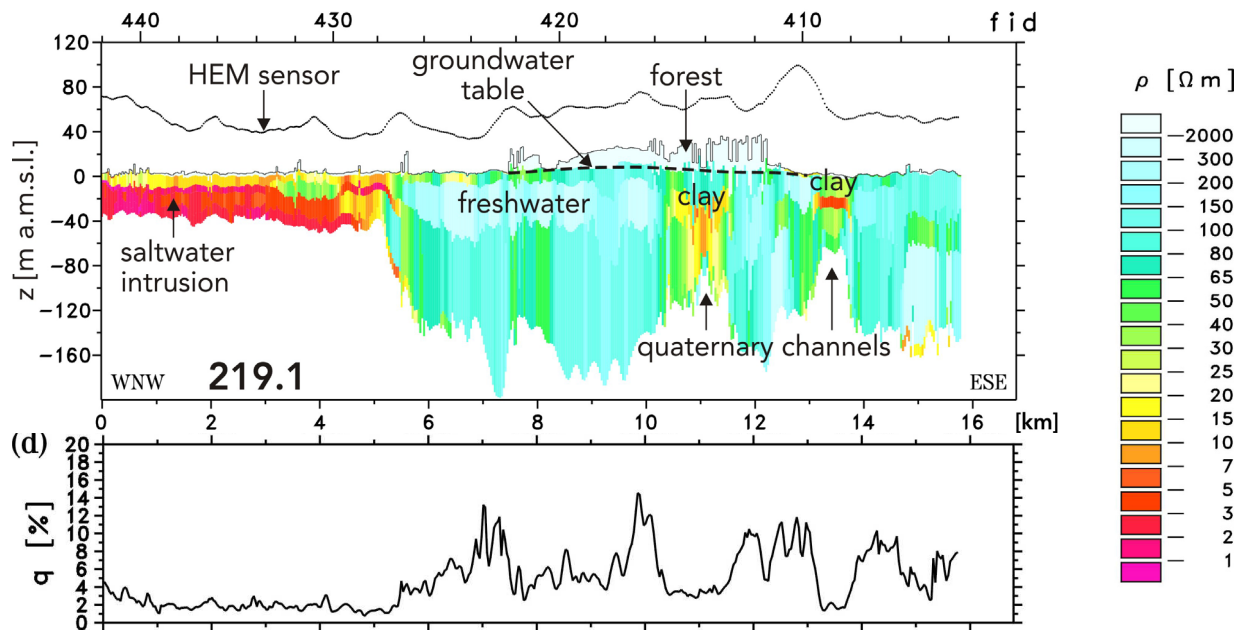
Abbildung 2: Das Hubschrauber-System der BGR.

Die Positionen von Hubschrauber und Bird werden mittels GPS (bis zum Jahr 2001 auch Glonass) gemessen. Der Abstand vom Hubschrauber zur Erdoberfläche wird mit einem Radar-Altimeter bestimmt und der Abstand vom Bird zur Erdoberfläche mit einem Laser-Altimeter [Siemon et al., 2002].

In den Jahren 2000 und 2001 wurden innerhalb des Forschungsvorhabens DAGLA<sup>1</sup> die Messgebiete Cuxhaven und Bremerhaven mit einer Gesamtfläche von über 1000 km<sup>2</sup> und fast 5000 Profilkilometern mit dem Hubschrauber-System der BGR befliegen, wofür 19 Tage benötigt wurden. Der Fluglinienabstand betrug 250 m. [Siemon et al., 2004]

Die Vertikalsektion in Abbildung 3 ist das Ergebnis der 1D-Inversionen der HEM-Daten.

<sup>1</sup> Detaillierte aerogeophysikalische Landesaufnahme



**Abbildung 3:** Ergebnisse der HEM 1D-Inversion der Fluglinie 219.1 (Lage s. Abb. 1). Die quartären Rinnen werden durch gut leitende Strukturen sichtbar.

An jedem Messpunkt, also alle 4 m, wurde eine 1D-Inversion durchgeführt und die Schichtmodelle als Säulen aneinandergereiht. Über den Modellen ist die Flughöhe des Sensors dargestellt und unterhalb der Anpassungsfehler der Inversion.

Diese Vertikalsektion beginnt an der Küste, die hohen Leitfähigkeiten weisen auf Salzwasserintrusionen ins Landesinnere hin. Geringe spezifische Widerstände dämpfen das induzierte elektromagnetische Feld stärker als hohe Widerstände, die Erkundungstiefe ist deshalb im Bereich der Salzwasserintrusionen stark begrenzt.

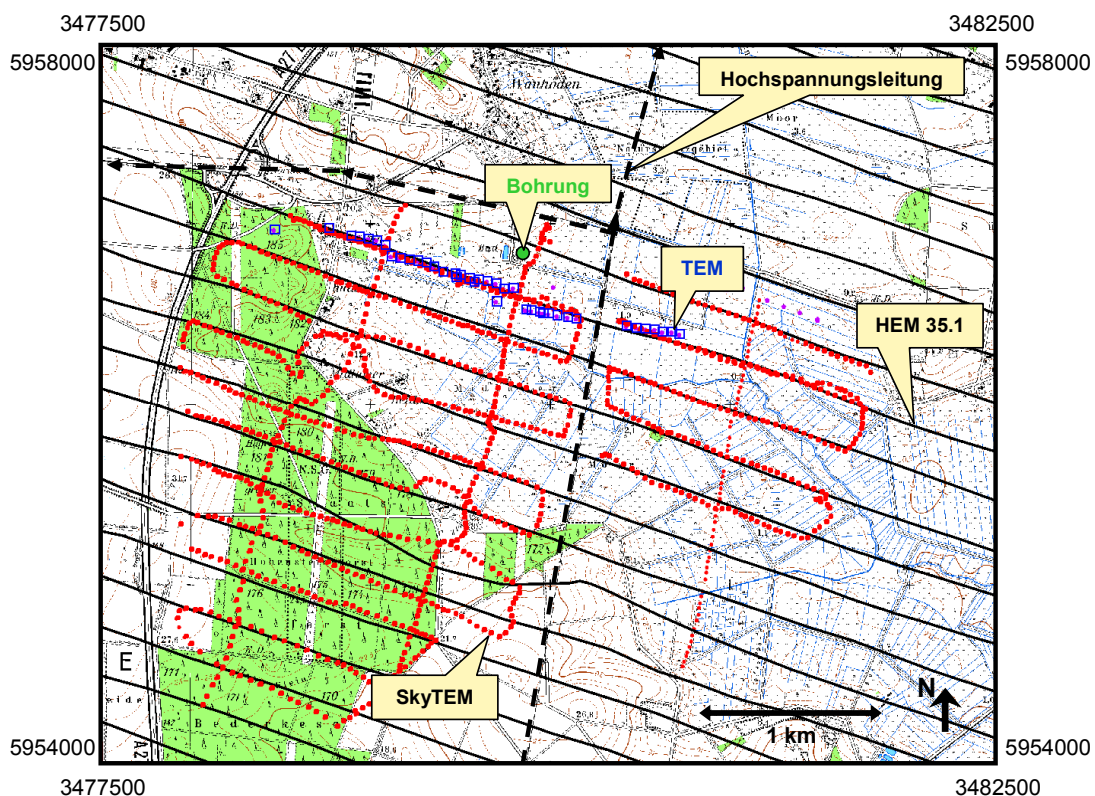
Weiter östlich stechen zwei weitere gut leitende Strukturen hervor. Hierbei handelt es sich um quartäre Rinnen mit Tonschichten im oberen Bereich. Auch tonhaltige Schichten haben einen geringen Widerstand. Die Hubschrauber-Elektromagnetik erkundet deutlich sowohl die laterale Ausdehnung als auch die Oberkante der Lauenburger Schichten [Siemon et al., 2004], doch der leitfähige Ton begrenzt die Eindringtiefe der Methode. Dort, wo dicke Tonschichten existieren, wie bei Messkilometer 11 in Abbildung 3, gelingt es mit HEM nicht diese vollständig zu durchdringen und somit deren Mächtigkeit zu bestimmen.

## Messgebiet Wanhöden

Die Bremerhaven-Cuxhavener Rinne wurde mit verschiedenen geophysikalischen Methoden untersucht [Gabriel et al., 2003]. Das Messgebiet Wanhöden ist ein ausgesuchtes Testfeld, um die Kombination von unterschiedlichen geophysikalischen Methoden zu erforschen, wie Seismik, Gravimetrie, Geoelektrik, Transient-Elektromagnetik, Hubschrauber-Elektromagnetik, Bohrlochgeophysik [Wiederhold et al., 2005].

Die Seismik liefert uns die grobe Struktur der quartären Rinne, insbesondere die Basis der Rinne in 300 m Tiefe. Geoelektrik und HEM zeugen von der Existenz der gut leitenden Lauenburger Schichten.

Um zusätzliche Informationen über die elektrischen Leitfähigkeiten unterhalb der Tonschicht zu erhalten und die HEM zu verifizieren, wurden TEM-Messungen entlang der HEM-Fluglinie 35.1 im Messgebiet Wanhöden durchgeführt (Abbildung 4). Außerdem wurden auch Geoelektrische Tiefensondierungen durchgeführt [Schünemann & Steuer, 2006].

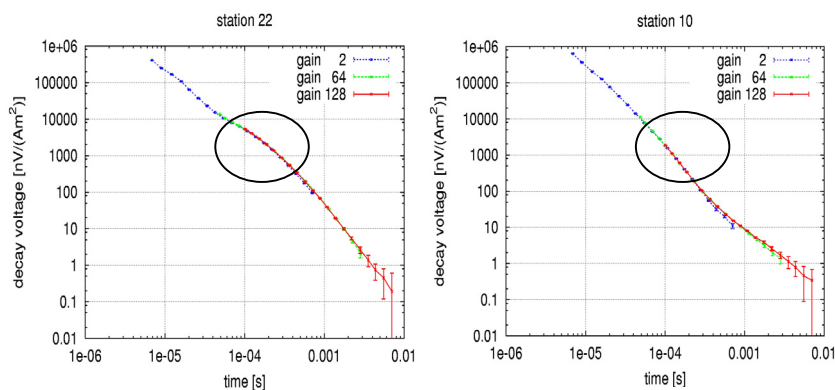


**Abbildung 4:** Lageplan vom Messgebiet Wanhöden: Eingezeichnet sind die TEM Stationen (blaue Kästen), die Fluglinien von HEM (schwarze Linien) und SkyTEM (rote Punkte) und die Lage der Bohrung (grüner Punkt).

## Transient-Elektromagnetik

Die TEM-Messungen wurden mit der analogen Protem47-Apparatur der Firma Geonics durchgeführt. Ein Ziel der TEM ist es, die Basis der Lauenburger Schichten zu bestimmen. Eine zweite Fragestellung ist, ob es in der Tiefe einen weiteren Leitfähigkeitskontrast von Rinnensanden zu Tonen oder Salzwasser gibt und die Basis der Rinne erfasst werden kann. Dieses Messgebiet eignet sich zudem für eine vergleichende Studie von HEM, TEM und SkyTEM.

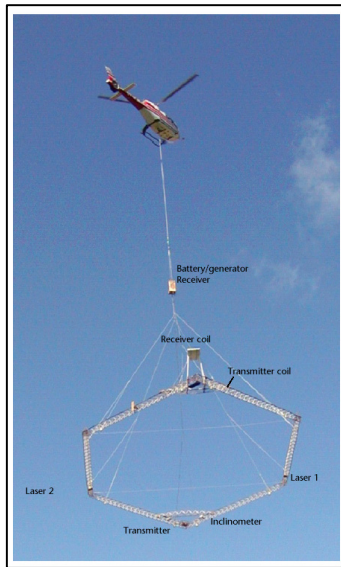
Wir haben die *Central-Loop* Konfiguration benutzt, da im Zentrum der Sendespule die z-Komponente des sekundären Feldes am größten ist. Das Sendemoment von  $30\,000\text{ Am}^2$  haben wir mit einer  $100 \times 100\text{ m}^2$  großen Sendespule und  $3\text{ A}$  Sendestrom erzeugt. Die effektive Fläche der Empfangsspule war  $31,4\text{ m}^2$ . Die große Dynamik des Spannungssignals stellt hohe Anforderungen an den Analog/Digital-Wandler. Um die Spannungen über den gesamten Bereich auflösen zu können, wurde in drei Zeitbereichen mit verschiedenen Verstärkungen gemessen. In Abbildung 5 ist am Beispiel von zwei Stationen der Spannungsabfall in  $\text{nV}/\text{Am}^2$  gegen die Zeit in Sekunden aufgetragen. Der Zeitbereich des Transienten reicht von  $6\text{ }\mu\text{s}$  bis  $7\text{ ms}$  nach Abschalten des Sendestroms. Ein Transient ist das Ergebnis einer internen Mittelung über 1000 Messungen. Der Stationsabstand der 46 Stationen beträgt  $50\text{ m}$  bis  $100\text{ m}$ . Die TEM-Sektion ist ca.  $3\text{ km}$  lang. Der Messfortschritt war bis zu 7 Stationen pro Tag.



**Abbildung 5:** Der Vergleich eines Transienten innerhalb und außerhalb der Rinne zeigt deutliche Unterschiede zu mittleren Zeiten. Innerhalb der Rinne fällt der Transient weniger steil ab, was auf eine gut leitende Struktur hinweist.

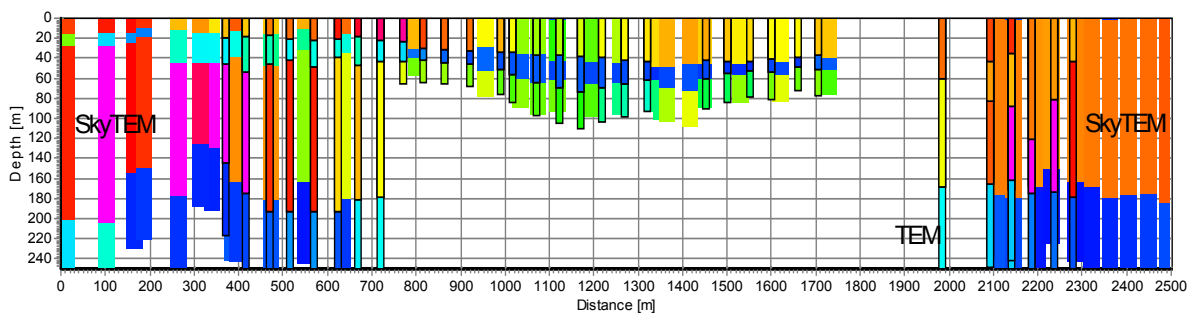
## SkyTEM

Im März 2005 wurde das Messgebiet Wanhöden, insgesamt  $8\text{ km}^2$  an einem Tag, mit SkyTEM [Sørensen & Auken, 2004] vom *Department of Earth Sciences* der Universität Aarhus (Dänemark) befliegen. Das hohe Sendemoment war bei der *Inloop* Konfiguration mit  $36\,000\text{ Am}^2$  vergleichbar zu dem der Boden-TEM. Der Hubschrauber flog mit einer Geschwindigkeit von  $18\text{ km/h}$ , also wesentlich langsamer als beim HEM-Verfahren. Da es sich um ein Zeitbereichsverfahren handelt und aufgrund der Wiederholungsmessungen ist der Stationsabstand mit ca.  $35\text{ m}$ , trotz der langsamen Fluggeschwindigkeit, größer als bei der HEM mit  $4\text{ m}$ . Das SkyTEM-System ist in Abbildung 6 dargestellt.



Der Vergleich der 1D-Inversionsergebnisse von TEM und SkyTEM in Abbildung 7 zeigt, dass die Ergebnisse nahezu identisch sind. Es wird eine leitfähige Schicht mit ca.  $7 \Omega\text{m}$  zwischen 40 m und 60 m detektiert – die Lauenburger Schicht, die die Bremerhaven-Cuxhavener Rinne markiert. Außerhalb der Rinne in etwa 180 m Tiefe finden die TEM-Methoden eine weitere gut leitende Schicht. Diese kann im Bereich der Rinne nicht detektiert werden. Die TEM-Daten lassen zwar eine gut leitende Struktur erahnen, die aber schlecht aufgelöst ist und deshalb hier nicht dargestellt wurde. Wahrscheinlich liegt sie dort tiefer und wird aufgrund des Abschirmungseffekts der oberen leitfähigen Schicht nicht aufgelöst.

**Abbildung 6:** SkyTEM-System der Universität Aarhus.

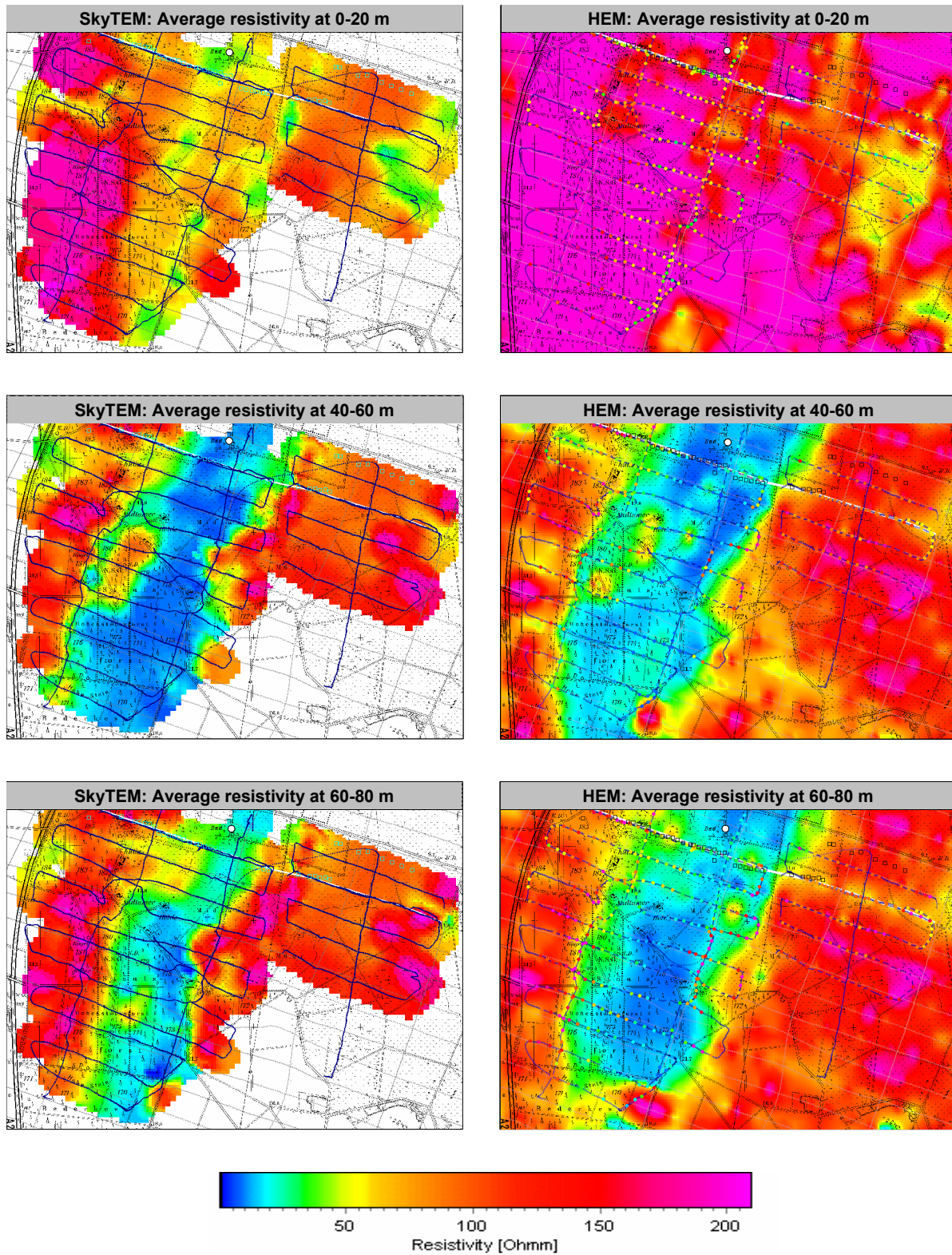


**Abbildung 7:** 1D-Inversionsergebnisse von TEM (umrahmte Säulen) und SkyTEM (breite Säulen).

## Vergleich der Ergebnisse

Die Karten in Abbildung 8 zeigen den mittleren spezifischen Widerstand in einem bestimmten Tiefenabschnitt auf der Basis der 1D-Inversionsergebnisse. Auf der linken Seite sind die Ergebnisse der SkyTEM-Messungen, auf der rechten Seite die der HEM-Messungen dargestellt. Zwischen den Messstationen wurde interpoliert. Pinke und rote Farben weisen auf Schichten mit relativ hohen spezifischen Widerständen hin, wie Sande und Kiese, blaue Farben zeigen Schichten mit geringeren spezifischen Widerständen an, wie ton- oder salzwasserhaltige Schichten. Um den Unterschied zwischen beiden Methoden zu verdeutlichen, sind in den HEM-Karten zusätzlich die Ergebnisse der SkyTEM als farbige Punkte eingefügt.

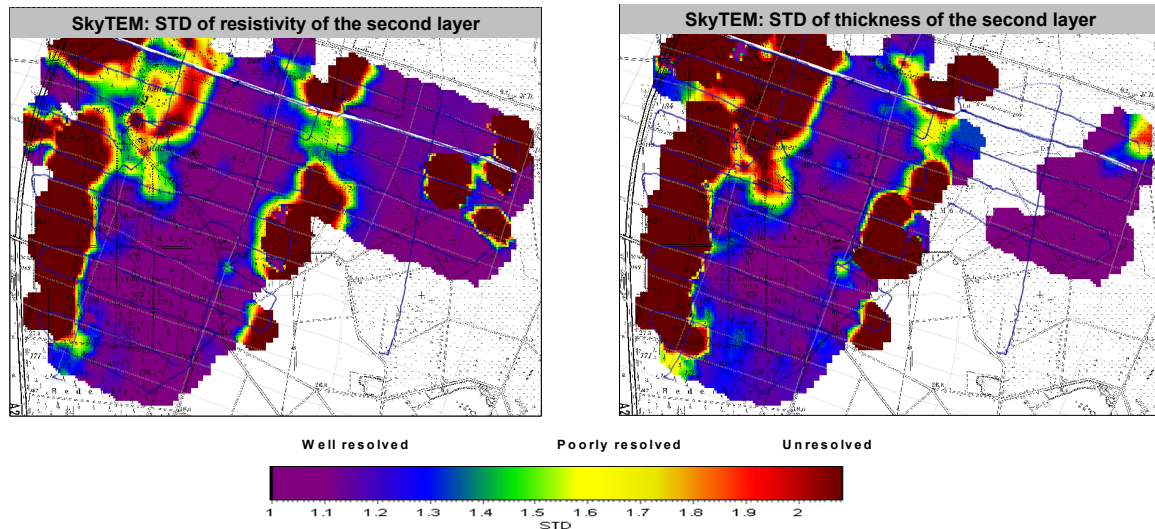
In den SkyTEM-Daten zeichnet sich zwischen 0 m und 20 m die Tonschicht in der Rinne schon ab, im Gegensatz zur HEM, wo sie nur andeutungsweise zu sehen ist. Zwischen 40 m und 80 m wird bei beiden Methoden die Tonschicht deutlich. Sie scheint zwischen 60 m und 80 m bei der HEM breiter zu sein als bei der SkyTEM. Doch aufgrund der geringeren Eindringtiefe kann die Unterkante der Rinne mit HEM nicht aufgelöst werden. Das EM-Feld ist in der gut leitenden Tonschicht stecken geblieben.



**Abbildung 8:** Die Widerstandskarten stellen den über einen Tiefenabschnitt gemittelten spezifischen Widerstand dar.



Um die Inversionsergebnisse richtig zu beurteilen ist es deshalb wichtig, die Signifikanz der einzelnen Modellparameter zu betrachten. In Abbildung 9 ist am Beispiel der SkyTEM die Standardabweichung von spezifischem Widerstand und Mächtigkeit der zweiten Schicht dargestellt.



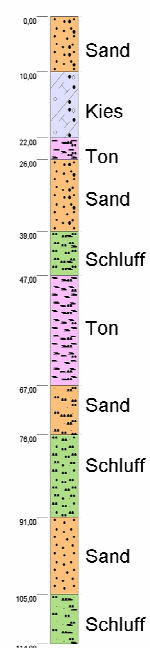
**Abbildung 9:** Signifikanz-Karten helfen dabei, die einzelnen Modellparameter zu beurteilen.

Innerhalb der Rinne entspricht diese der Lauenburger Schicht. Sowohl spezifischer Widerstand als auch Mächtigkeit sind hier gut bestimmt. Der spezifische Widerstand hat eine Standardabweichung unter 10%, die Mächtigkeit unter 20%. Auch östlich der Rinne ist die zweite Schicht eine gut leitende Schicht, deren spezifischer Widerstand gut bestimmt ist. Dort, wo die Daten mit einem Zwei-Schicht-Fall angepasst wurden, gibt es per Definition keine Mächtigkeit der zweiten Schicht. Westlich der Rinne ist die zweite Schicht eine oberflächennahe etwas schlechter leitende Schicht. Hier sind sowohl spezifischer Widerstand, als auch die Mächtigkeit schlecht bestimmt.

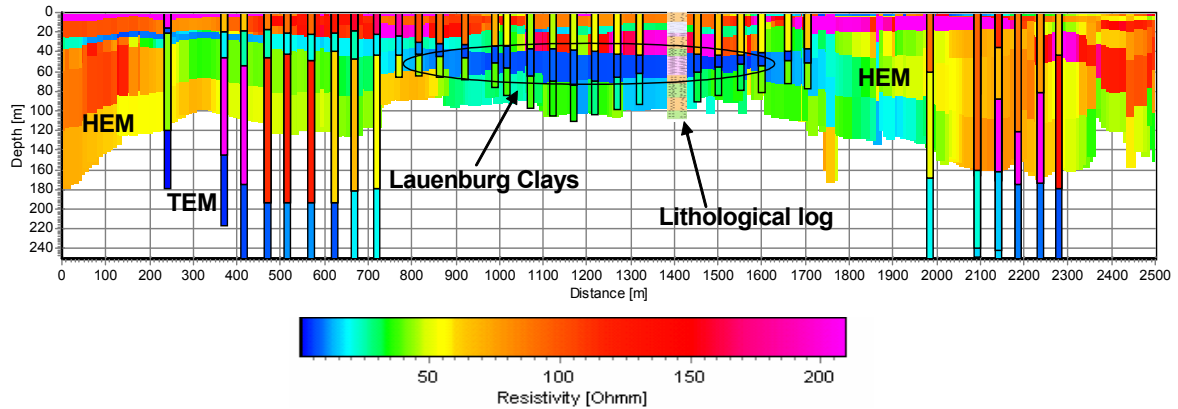
## Zusammenfassung

HEM und TEM stimmen in der Lokalisierung der Lauenburger Schichten innerhalb der Rinne überein. Die spezifischen Widerstände liegen bei beiden Methoden zwischen 5  $\Omega\text{m}$  und 10  $\Omega\text{m}$ . Die Sektion in Abbildung 11 zeigt, dass HEM zusätzlich eine gut leitende Schicht in 20 m Tiefe detektiert. Diese Schicht wird durch Bohrungen und Widerstands-Logs bestätigt, bei der HEM allerdings als zu mächtig wiedergegeben (Abbildung 10 und Abbildung 11). Mit den TEM-Methoden kann die Basis der Lauenburger Schichten deutlicher bestimmt werden. Zusätzlich wird außerhalb der Rinne eine leitfähige Schicht in ca. 180 m Tiefe sichtbar.

**Abbildung 10:** Geologisches Profil in der Nähe der TEM-Sektion (Lage s. Abb. 4).



Aufgrund der abschirmenden Wirkung der leitenden Tonschicht konnten die Stromsysteme beider Methoden nicht zur Basis der Rinne bei ca. 300 m durchdringen. Es sind weitere TEM-Messungen mit höherem Sendemoment geplant.



**Abbildung 11:** Vergleich der 1D-Inversionsergebnisse von TEM (umrahmte Säulen) und HEM (Hintergrund).

## 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.

SCHÜNEMANN, J. & STEUER, A. (2006): Geoelektrische Tiefensondierung über der Cuxhavener Rinne. Protokoll über das 21. Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Haus Wohldenbergl, 3.10.-7.10.2005, Hildesheim.

SIEMON, B., STUNTEBECK, C., SENGPIEL, K.-P., RÖTTGER, B., REHLI, H.-J. & EBERLE, D.G. (2002): Investigation of hazardous waste sites and their environment using the BGR helicopter-borne geophysical system. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, **7**, 4, 169-181.

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.

SØRENSEN, K. & AUKEN, E. (2004): SkyTEM – a new high-resolution helicopter transient electromagnetic system. Exploration Geophysics, **35**, 191-199.

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).