

Gleichstromgeoelektrische Untersuchungen eines mit aeroelektromagnetischen Messungen kartierten Süßwasservorkommens im Sahlenburger Watt unter Berücksichtigung von Äquivalenzfällen.

Helmut Rodemann(1), Eva Brost(3), Jörn Schünemann(1), Ursula Noell(2), Bernhard Siemon(2), Franz Binot(1), Achim Sauer (3)

1. GGA-Institut, Stilleweg 2, D-30655 Hannover, 2. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Stilleweg 2, D-30655 Hannover, 3. ehemals GGA-Institut

Schlagworte: Geoelektrik, Hubschrauber-Elektromagnetik, Süßwasserlinse, Cuxhaven, Sahlenburger Watt

Zusammenfassung

Im Sahlenburger Watt an der Nordseeküste westlich von Cuxhaven wurde im Rahmen einer aerogeophysikalischen Erkundung mit dem Hubschrauber-Messsystem der BGR eine Süßwasserlinse kartiert. Ergänzend wurden zwei Geoelektrik-Profile im Watt und entlang der Küste vermessen. Die Auswertung fand unter Berücksichtigung von Äquivalenzfällen für geschichtete Halbraummodelle statt und Mess- und Parameterfehler wurden diskutiert. Es zeigte sich eine recht gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Hubschrauber-Elektromagnetik und mehrdimensionale Modellrechnungen ergaben keine prinzipiellen Unterschiede zu den eindimensionalen Inversionsmodellen.

Summary

In the Sahlenburg mud-flat at the North Sea coast to the west of the city of Cuxhaven a freshwater lens was mapped using BGR's helicopter-borne geophysical system. In addition, two geoelectric profiles were measured within the tidal flats and along the shore. The data evaluation with respect to layered half-space models laid emphasis on the discussion of both equivalent models and data and parameter errors. The inversion models showed a fairly good agreement with those obtained from helicopter-borne electromagnetic data. Multi-dimensional modelling revealed no principal differences to the one-dimensional inversion results.

Einführung

Als Süßwasserlinsen werden hier örtlich abgegrenzte Süßwasservorkommen in einem Salzwasseraquifer bezeichnet. Süßwasserlinsen treten normalerweise unter Inseln auf, wo die lokale Grundwasserneubildung das Meerwasser verdrängt. WORZYK (1995) untersuchte beispielsweise ein Süßwasservorkommen unter der Insel Borkum mit geoelektrischen Tiefensondierungen. TRONICKE

et al. (1999) und SENGPIEL & MEISER (1981) kartierten eine Süßwasserlinse unterhalb von Spiekeroog mit geoelektrischen und Radarverfahren bzw. mit der Hubschrauber-Elektromagnetik. Das Watt ist eine Fläche im Küstenbereich des Gezeitenmeeres, die bei Hochwasser überflutet und bei Niedrigwasser ganz oder teilweise vom Wasser freiläuft. Es kann durch ein viel verzweigtes Rinnensystem (Priele) durchzogen sein (MURAWSKI, 1983). Die Süßwasserlinse im Bereich des Sahlenburger Watts westlich von Cuxhaven, die auch strandnahe, von KURTZ (2004) ausführlich beschriebene Grundwasseraustritte im Wattenmeer aufweist, ist Gegenstand geophysikalischer Untersuchungen.

Im Rahmen einer aerogeophysikalischen Erkundung der Küstenaquifere zwischen Weser- und Elbemündung im Jahre 2000 mit dem Hubschrauber-Messsystem der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) wurde die Verbreitung dieser Süßwasserlinse kartiert (SIEMON & BINOT, 2003). Das GGA-Institut führte zwei Jahre später geoelektrische Sondierungen mit dem Schlumberger-Verfahren durch (BROST et al., 2003). Die geoelektrischen Messungen sollten dazu dienen, einen Vergleich mit den Hubschraubermessungen zu ermöglichen.

Profilbeschreibung

Die geoelektrischen Tiefensondierungen erfolgten entlang von zwei Profilen (Abb. 1). Das erste Profil verlief im Watt westlich von Sahlenburg in nordwestlicher Richtung und hatte eine Länge von 2 km. Die Auslagerichtung der 14 Schlumberger-Messungen betrug 58 Grad (also senkrecht zur Profilrichtung) und die Auslagenlänge ($AB/2$) zumeist 200 m. Das zweite Profil entlang eines Küstenweges verlief ungefähr in NS-Richtung und war 1,5 km lang. Die Auslagerichtung variierte zwischen 8 und 35 Grad, also etwa parallel zur Profilrichtung. An den sieben Messpunkten des Profils wurden $AB/2$ Längen zwischen maximal 400 und 600 m ausgelegt. In naher Umgebung der Profile befinden sich verschiedene Bohrungen.

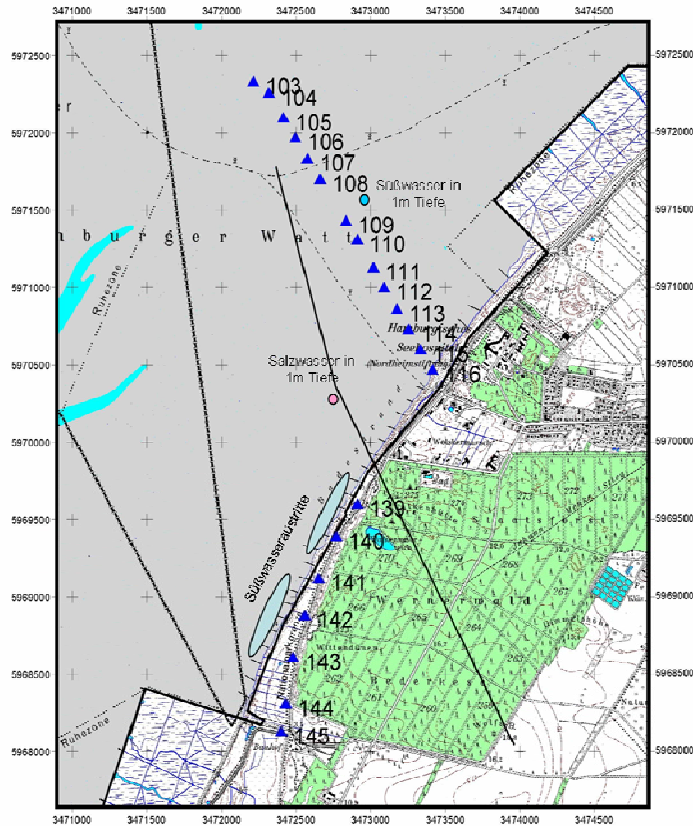


Abb. 1: Lage der Profile und Nummerierung der Geoelektrik-Messpunkte. Blauer Kreis: Süßwasser in 1m Tiefe; roter Kreis: Salzwasser in 1 m Tiefe. Die hellblauen Linsen vor dem Ufer kennzeichnen Süßwasseraustritte. Die östliche schwarze Linie gibt den ungefähren Verlauf des in Abb. 2 dargestellten Profils wieder. Profil 1: Messpunkte 103 – 116, Profil 2: Messpunkte 139 – 145. Die beiden anderen schwarzen Linien markieren Hamburgisches Territorium. Bei dem dargestellten Gebiet grenzt der Altenwalder Geestrücken direkt an das Watt. Östlich vom Punkt 116 befindet sich der Ort Sahlenburg.

Fig. 1: Position of the profiles and numbering of the geoelectric sites. Blue circle: fresh water in 1m depth; red circle: salt water in 1 m depth. The light blue lenses at the shore symbolize fresh water outflows. The eastern black line represents the approximate course of the profile shown in fig. 2. Profile 1: points 103 – 116, profile 2: points 139 – 145. The two other black lines mark Hamburg territory. In the displayed area the Altenwalder Geestrücken is in immediate contact with the mud-flat. East of the point 116 the village Sahlenburg is located.

Geologische Situation

Der Altenwalder Geestrücken verläuft von SE nach NW und reicht bei Sahlenburg mit einem Steilkloiff direkt an das Watt heran. Er besteht aus glazialen Sanden und Kiesen mit einzelnen Lagen von Geschiebemergeln. Im Bereich des Wattenmeers sind die Lockergesteine der Geest von Wattedimenten der jungen Nordsee bedeckt. Diese bestehen überwiegend aus marinen Feinsanden, die im Messgebiet etwa 10 m mächtig werden können (LINKE, 1979). An der Basis kann geringmächtig Torf oder Schluff auftreten. Eine von der Küstenlinie etwa 1000 m ins Watt hineinreichende ca. 1,5 m dicke torfüberdeckte Kleischicht (schluffiger Ton) liegt in etwa 1 - 2 m Tiefe (Abb. 2). Der Klei ist für Grundwasser wenig durchlässig; er trennt hydraulisch das Meerwasser vom Süßwasser.

Das auf der Geest durch Versickerung des Niederschlages gebildete Grundwasser bewegt sich von der Geest Richtung Watt. Das neu gebildete Grundwasser schiebt sich dem hydraulischen Gradienten folgend unter der Kleischicht Richtung NW und tritt nur teilweise als Geestrandquelle zutage. Nach ca. 1 km endet die Kleischicht, und das Grundwasser vermischt sich mit dem Meerwasser. Am Rand der Kleischicht steigt das Süßwasser auf. Es konnte mit einer 1m tiefen Bohrung gewonnen werden (blauer Punkt in Abb. 1).

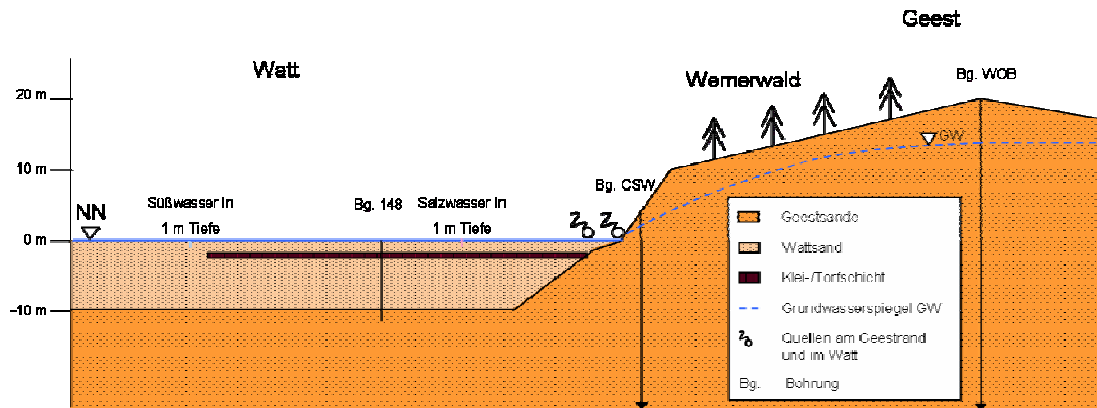


Abb. 2: Schematische Darstellung des geologischen Aufbaus (basierend auf: SINDOWSKI, 1969, LINKE, 1979 und eigenen Bohrungen, 20-fach überhöht)

Fig. 2: Diagram of the geological structure (based on: SINDOWSKI, 1969, LINKE, 1979 and own boreholes, 20 times exaggerated)

SCHNEIDER (1988) gibt folgende Wertebereiche für den spezifischen Widerstand für die verschiedenen hydrogeologischen Einheiten der Insel Baltrum an:

- Trockener Dünensand: 200-2000 Ωm
- Süßwassersand: 45-130 Ωm
- Brackwassersand: 10-45 Ωm
- Salzwassersand: 3-10 Ωm

Der spezifische Widerstand von Salzwasser mit 3,5% Salzgehalt (Nordsee) beträgt bei 20°C 0.2 Ωm (WESTERN-ATLAS, 1985). Diese Werte zeigen, dass geoelektrische Verfahren gut geeignet sind, die Aquifersalinität zu erkunden.

Hubschrauber-Messungen

Das von der BGR beflogene Messgebiet „Cuxhaven“ hat eine Ausdehnung von ungefähr 22 km x 24 km und ist um ca. 18° von N gegen E gedreht (SIEMON, 2005). Die Hubschrauber-elektromagnetischen (HEM) Messungen mit fünf verschiedenen Frequenzen (384 Hz, 1830 Hz, 8610 Hz, 41300 Hz, 192600 Hz) liefern Informationen über die Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes in unterschiedlichen Tiefen. Die Ergebnisse können als Widerstandskarten oder Vertikalschnitte präsentiert werden. Die Karte der Abb. 3 zeigt den scheinbaren spezifischen Widerstand bei einer Messfrequenz von 1830 Hz (SIEMON et al., 2001). Im Bereich des Sahlenburger Watts ist landeinwärts eine Erhöhung der spezifischen Widerstände zu erkennen, die durch ein Süßwasservorkommen zu deuten ist. Die Ausdehnung von etwa 5 km Länge und 1,5 km Breite stimmt gut mit der bei LINKE (1979) angegebenen Kleischicht überein. Die Mächtigkeit der Süßwasserlinse kann auf Basis der HEM-Ergebnisse auf 30 – 40 m abgeschätzt werden.

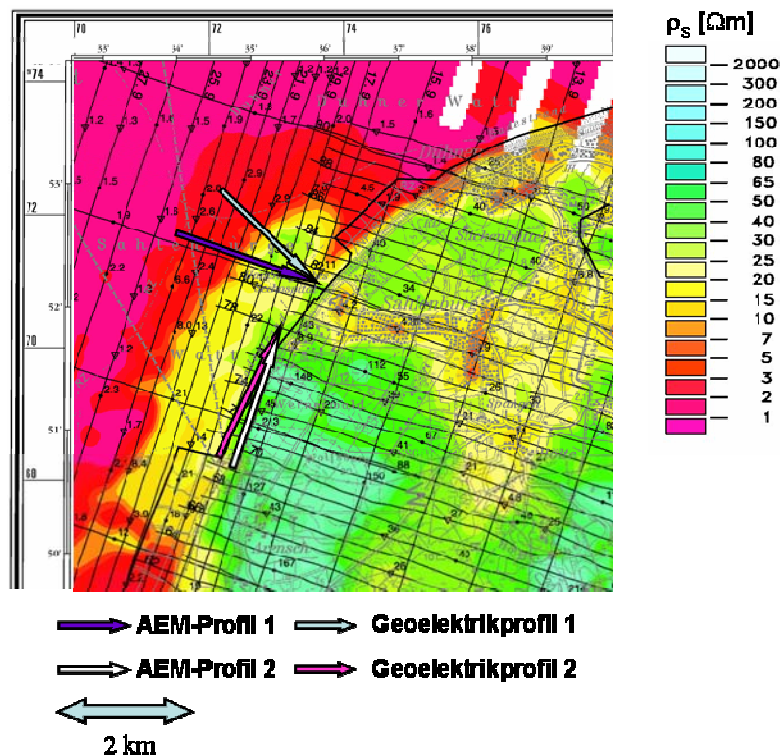


Abb. 3: Flächenhafte Verteilung der scheinbaren spezifischen Widerstände ρ_s , abgeleitet aus HEM-Messungen, im NW des Messgebiets „Cuxhaven“ (SIEMON et al., 2001). Der violette und der weiße Pfeil zeigen die Lage der HEM-Profilabschnitte (Abb. 6a & 7a), die beiden anderen Pfeile geben die Lage der Geoelektrikprofile im Watt (blau, Abb. 6b,c) und am Ufer (rot, Abb. 7b,c) wieder. Am linken und oberen Rand sind Rechts- und Hochwerte sowie Länge und Breite in Minuten angegeben.

Fig. 3: Distribution of the ρ_s values (ρ_s =apparent resistivity) in the NW of the survey area "Cuxhaven" derived from helicopter-borne measurements (SIEMON et al., 2001). The purple and the white arrows show the location of the HEM profiles (Fig. 6a & 7a). The blue and the red ones show the location of the geoelectric profiles (Fig. 6b,c & 7b,c). Scales: Local coordinates and longitude and latitude in minutes.

Geoelektrik-Messungen

Die geoelektrischen Sondierungen wurden in Voll-Schlumberger-Auslage durchgeführt: Über zwei Elektroden (A und B) wird ein Strom in den Boden eingespeist, und an den Sonden (M und N) in der Mitte der Auslage wird eine Potentialdifferenz gemessen. Aus der gemessenen Spannung, der Stärke des eingespeisten Stromes und unter Berücksichtigung eines für die Aufstellung charakteristischen Geometriefaktors, wird der scheinbare spezifische Widerstand des Untergrundes als Funktion der Auslagenlänge ($AB/2$) berechnet und als Sondierungskurve dargestellt (Abb. 4 & 5), s. TELFORD et al. (1998). Die Auswertung und Interpretation der Daten erfolgte sowohl mit Hilfe von Hilfskurven (im Folgenden als Handauswertungen bezeichnet) als auch mit dem im GGA-Institut als Weiterentwicklung des Marquardt-Inversionsprogramms INGESO (MUNDRY & DENNERT, 1981) konzipierten 1D-Inversionsprogramms GKF2 (RODEMANN & REITMAYR, 1996, 1998). Das Marquardt-Verfahren, das auch zur Inversion der HEM-Daten verwendet wird, ist eine Kombination der Methode des steilsten Abstiegs und der Newton-Methode (WEIDELT, 1989) und wird auch als gedämpfte Methode der kleinsten Quadrate bezeichnet.

Bei einer Inversion wird in einem automatisierten Iterationsprozess eine Modellkurve so lange an die Kurve der Messwerte angepasst, bis eine bestimmte Fehlergrenze unterschritten ist. Das erforderliche Startmodell kann beim von uns benutzten Programm GKF2 wahlweise durch die Eingabe eines Schichtmodells mit den Parametern h (Mächtigkeiten) und ρ (spezifische elektrische Widerstände) oder automatisch durch das Programm (durch Ermittlung von Extrema und Wendepunkten, mit oder ohne Eingabe der Anzahl der Schichten) erstellt werden. Ausgewählte Parameter können festgehalten werden oder dürfen nur innerhalb eines bestimmten Bereichs variieren. Außerdem kann das Programm so eingestellt werden, dass die Abfolge der Mächtigkeiten ein Mindestmaß übersteigt (Mächtigkeit = Faktor \times Hangendes; ist der Faktor zu klein, ergeben sich Dünnschichtfälle, bei denen die beiden Parameter Mächtigkeit und spezifischer Widerstand nicht mehr getrennt voneinander bestimmt werden können (MUNDRY, 1985)). Für die Größe „Faktor“, die für die Bezeichnung einer Schicht als „dünn“ zutrifft, gibt FLATHE den Wert Faktor ≤ 1 an. Jedoch ergeben sich auch schon für größere Werte stark anwachsende Parameterfehler.

Für das Abweichungsmaß können folgende Größen verwendet werden:

Logarithmische Least-Squares-Abweichung,

Lineare Least-Squares-Abweichung (L2-Norm, „soft bounds“)

Maximum-Norm-Abweichung (L^∞ -Norm, „hard bounds“).

Die Inversion wird durch Gewichtungsfaktoren für die Messwerte gesteuert, die z.B. abhängig vom reziproken Quadrat des Messfehlers sein können (INMAN, 1975). Die Wahl der Schichtzahl ist bei der Auswertung oft kritisch. Im Allgemeinen wird zwar die Anpassung mit größerer Schichtzahl besser, die Zahl der Schichten sollte aber möglichst gering sein, da sich mit Vergrößerung der Schichtzahl auch die Parameterfehler vergrößern.

Die Parameterfehler (oder Parameter-Vertrauensbereiche) sind sehr wichtig im Zusammenhang mit dem in der Geoelektrik oft kritischen Problem der „äquivalenten Modelle“ (MUNDRY, 1985). Ausgangspunkt sind gemessene ρ_s -Messwerte mit ihren jeweils zugehörigen gemessenen oder geschätzten Messfehlern. Auf diese Weise wird ein Fehlerschlauch definiert. Am Ende einer erfolgreichen Inversion liegt ein Parametersatz der besten Approximation vor. Ihm entspricht eine theoretische ρ_s -Kurve, die vollständig im Fehlerschlauch verläuft. Man sucht nun Modelle mit entsprechenden ρ_s -Kurven, die ebenfalls vollständig im Fehlerschlauch verlaufen. Alle diese Modelle lösen die Inversionsaufgabe gleich gut; sie alle sind äquivalent.

Nachdem möglichst viele dieser Äquivalenzfälle gefunden wurden, kann man die Parameterfehler als die maximale relative Abweichungen der äquivalenten Parameter von der Bestapproximation berechnen. Hierzu sollten nicht nur einzelne Parameter betrachtet werden, sondern Kombinationen mehrerer Parameter. In der Praxis führen Raster-Variationen von Kombinationen je zweier Parameter schon zu relativ guten Ergebnissen (Parameter-Kombinations-Methode). Bessere Ergebnisse erhält man bei Benutzung der Wendepunkt-Extrema-Methode, die jedoch nicht auf alle Messkurven anwendbar ist (RODEMANN & MÜLLER, 2000). Die Parameterfehler haben eine ähnliche Bedeutung wie Messfehler bei einfachen Messungen. Sie sind ein Maß für die mögliche Schwankungsbreite des jeweiligen Parameters. Die Aussage: Der spezifische Widerstand beträgt $100 \Omega\text{m} \pm 10\%$ und ist dabei wesentlich detaillierter und belastbarer als die Aussage: $100 \Omega\text{m}$. Das Intervall des ρ_s -Werts mit einem ρ_s -Messfehler wird bei der Rechnung in die Parameter-Intervalle transformiert. Manchmal kann ein vergrößerter Anpassungsfehler in Kauf genommen werden, um die Parameterfehler entsprechend zu verkleinern.

Bei der Auswertung der Messdaten mit dem Programm GKF2 kann ein sog. Astausgleich durchgeführt werden. Mehrere Äste, d.h. Versätze in den Sondierungskurven, können entstehen, wenn der Sondenabstand aufgrund zu kleiner Messspannungen bei großen Auslagen vergrößert werden muss. Die Ursache hierfür kann beispielsweise an geometrischen Messfehlern oder an lokalen Widerstandsinhomogenitäten im Untergrund liegen. Bei einer Versetzung der Sonden kann es aufgrund von kleinräumigen lateralen Variationen des spezifischen Widerstands im Boden zu Messwertänderungen kommen. Um eine durchgehende Messkurve zu erhalten, wird normalerweise der vordere Teil der Sondierungskurve an den hinteren Teil angeglichen, da man annimmt, dass bei einem kleinen Sondenabstand die beiden Potential-Sonden eher auf einer lokalen

Widerstandsanomalie stehen und so einen Versatz des Widerstandsniveau verursachen, als bei größerer Aufstellungsweite (REPSOLD, 1991, WORZYK, pers. Mitt.).

Messfehler, Anpassungsfehler und Parameterfehler

Die verwendete Geoelektrik-Apparatur des GGA-Instituts erlaubt zusammen mit einem selbstentwickelten Messwert-Erfassungsprogramm die Erfassung der scheinbaren spezifischen Widerstände ρ_s zusammen mit statistischen Messfehlern. Bei kleinen Auslagen ($AB/2 < 1000$ m) liegen diese Messfehler zumeist im Bereich zwischen 0.1% und 1%. Erfahrungsgemäß zeigen die ρ_s -Kurven jedoch eine deutlich stärkere Streuung von ρ_s - von einem $AB/2$ Wert zum nächsten (Abb. 4 & 5). Mögliche Gründe sind Fehler in der nicht perfekten geometrischen Anordnung der Elektroden ($AB/2$, $MN/2$, A, B, M und N liegen nicht auf einer Linie), in kleinräumige Variationen des elektrischen Widerstands oder in unterschiedlichen elektrischen Ankopplungen von Sonden und Elektroden (RODEMANN & WORZYK, 1996). Zusätzlich spielen wahrscheinlich systematische Restfehler nach der Kalibrierung eine Rolle. All diese Effekte führen schließlich zu einem größeren Messfehler (typisch 3%, z.T. deutlich größer).

Die Kenntnis der Messfehler ist deshalb sehr wichtig, da man damit Fehler der berechneten Modellparameter abschätzen kann. Dafür wurden die Messdaten geglättet und mit dem Messfehler von 3% kombiniert.

Im Folgenden werden Anpassungs- und Parameterfehler für 2- und 3-Schicht-Modelle anhand von zwei Beispielen diskutiert. Die in den Tabellen 1 und 2 (unten) verwendeten Bezeichnungen bedeuten: q : verbleibende Abweichung von Mess- und Modellkurve (lineare Abweichungsquadrate), ep_1 bis ep_3 : Parameterfehler der Schichtwiderstände ρ_1 bis ρ_3 (Maximum-Norm), eh_1 und eh_2 : Parameterfehler der beiden Schichtmächtigkeiten h_1 und h_2 (alle Angaben in %).

Beispiel 1: Punkt 103 (Profil 1)

Die Geoelektrik-Messdaten am Punkt 103 des Profils 1 im Watt (siehe Abb. 1) sind mit 2- und 3-Schicht-Modellen invertiert worden. Abb. 4 zeigt die Daten und das Inversionsmodell für den 3-Schichtfall sowie die hieraus berechnete synthetische Sondierungskurve. Es handelt sich bei diesem Beispiel um einen so genannten Maximumfall, bei dem die 3. Schicht wegen der technisch bedingten Begrenzung der maximalen Auslage ($AB/2 = 200$ m) praktisch nicht erfasst wurde. Weiterhin ist das Verhältnis der Schichtmächtigkeiten h_2/h_1 kleiner als 2 und damit die 2. Schicht elektrisch dünn. Bei einer 2-Schicht-Auswertung ergibt sich eine maximale Abweichung $q=5\%$, die Parameterfehler sind relativ klein ($<10\%$, Tab. 1). Bei einer 3-Schicht-Auswertung ist der Anpassungsfehler mit $q=3\%$ zwar kleiner, für die Parameterfehler ergeben sich jedoch erheblich größere Werte, besonders für die dünne 2. Schicht, bei der sie 30% überschreiten können (Tab. 1).

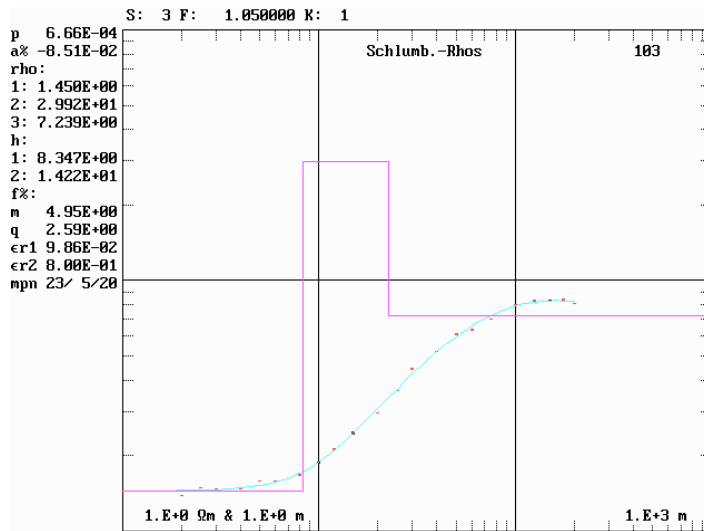


Abb. 4: Sondierungskurve (ρ_s -Kurve) mit Messdaten (rote Fehlerbalken) und Modelldaten (blaue Kurve) des 3-Schicht-Inversionsmodells (violette Linie) am Punkt 103 von Profil 1 (vgl. Abb. 1)

Fig. 4: Measured sounding curve (ρ_s -curve, red error bars) with model data (blue curve) derived from the 3-layer-inversion model (pink line) at site 103 of profile 1 (cf. Fig. 1)

Tabelle 1: Anpassungs- und Parameterfehler für 2- und 3-Schicht-Modelle am Punkt 103 von Profil 1

Fehler [%]	2-Schicht-Auswertung	3-Schicht-Auswertung
q	5	3
$\epsilon\rho_1$	3	3
$\epsilon\rho_2$	5	>30
$\epsilon\rho_3$	-	15
eh_1	8	7
eh_2	-	>30

Beispiel 2: Punkt 109 (Profil 1)

Bei diesem Beispiel besitzt die ρ_s -Kurve keine untere Asymptote. Damit sind ρ_1 und h_1 der Deckschicht ähnlich unbestimmt wie bei einem Dünnschichtfall und ρ_1 wurde deshalb auf den Wert 1,2 Ωm festgehalten. Eine 2-Schicht-Auswertung führt hier auf den relativ großen Anpassungsfehler von $q=13\%$. Die Parameterfehler sind relativ groß, besonders bei der 1. Schicht (Tab. 2). Die 3-Schicht-Auswertung ergibt wieder einen verkleinerten Anpassungsfehler $q=7\%$. Die 3. Schicht ist wie beim Punkt 103 praktisch nicht erfasst. Auch hier resultieren relativ große Parameterfehler (Tab. 2).

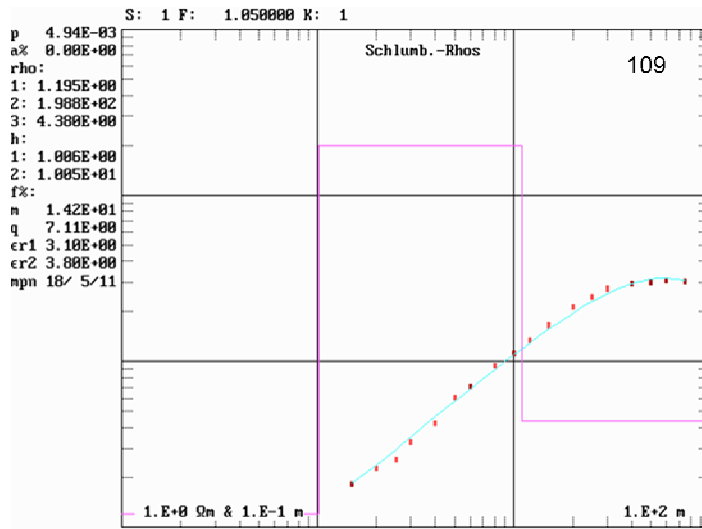


Abb. 5: Sondierungskurve (ρ_s -Kurve) mit Messdaten (rote Fehlerbalken) und Modelldaten (blaue Kurve) des durch Inversion gefundene Modells (violette Linie) am Punkt 109 von Profil 1 (vgl. Abb. 1)

Fig. 5: Measured sounding curve (ρ_s -curve, red error bars) with model data (blue curve) derived from the inversion model (pink line) at site 109 of profile 1 (cf. Fig. 1)

Tabelle 2: Anpassungs- und Parameterfehler für 2- und 3-Schicht-Modelle am Punkt 109 von Profil 1

Fehler [%]	2-Schicht-Auswertung	3-Schicht-Auswertung
q	13	7
$\epsilon\rho_1$	16	22
$\epsilon\rho_2$	7	>30
$\epsilon\rho_3$	-	>30
eh_1	18	23
eh_2	-	>30

Man erkennt an diesen Beispielen, dass die 2-Schicht-Modelle zu größeren Anpassungsfehlern führen, jedoch mit kleineren Parameterfehlern verbunden sind. Hier muss der Benutzer entscheiden, welche Genauigkeitsmaße wichtiger sind. Bei nicht signifikanter Verringerung des Anpassungsfehlers bei Erhöhung der Schichtzahl (z. B. kleiner als 25%) sollte man die kleinere Schichtzahl verwenden. Bei den 3-Schicht-Fällen laufen die Parameterfehler zum Teil aus dem Suchbereich des Rasters, wobei je 2 Parameter gleichzeitig variiert wurden. Bei beiden Profilen waren die Anpassungsfehler für die Handauswertung größer als die entsprechenden Werte für Inversionsrechnungen. Bei Profil 2 ergeben sich bezüglich der Anpassungsfehler und Parameterfehler ähnliche Resultate.

Vergleich von geoelektrischen und HEM-Ergebnissen

Profil 1

Bei dem Profil 1 durch das Watt (Abb. 6) fällt eine laterale Zweiteilung bei den spezifischen Widerständen auf. Im nordwestlichen Bereich bis zum Punkt 108 ergibt sich bei der 3-Schicht-Auswertung der Geoelektrikdaten eine obere Schicht mit niedrigen spezifischen Widerständen (Wattsedimente mit Salzwassergehalt). Die 2. Schicht dürfte von Brackwasser beeinflusst sein, während die 3. Schicht Salzwasser enthalten könnte. Der Bereich um die Profilpunkte 108 und 109 könnte eine Übergangszone zwischen Salzwasser und Süßwasser sein. Ab dem Punkt 109 landwärts finden wir bei der 1. Schicht sehr niedrige spezifische Widerstände (Salzwasser) und erhöhte spezifische Widerstände in der 2. Schicht. Dies deutet auf die gesuchte Süßwasserlinse hin. Die variierenden spezifischen Widerstände der 3. Schicht könnten auf Sanden mit Ton- und Schlufflagen hindeuten. Nach oben durch die Klei- und Torfschicht begrenzt (nach SE hin), tritt das leichtere Süßwasser erst nach dem Verschwinden dieser Schicht im Watt wieder hervor. Diese Schicht ist dünn und deshalb geoelektrisch nicht erkennbar. Die Kleischicht verhindert auch in umgekehrter Richtung das Eindringen des Salzwassers in den darunter liegenden Süßwasserbereich.

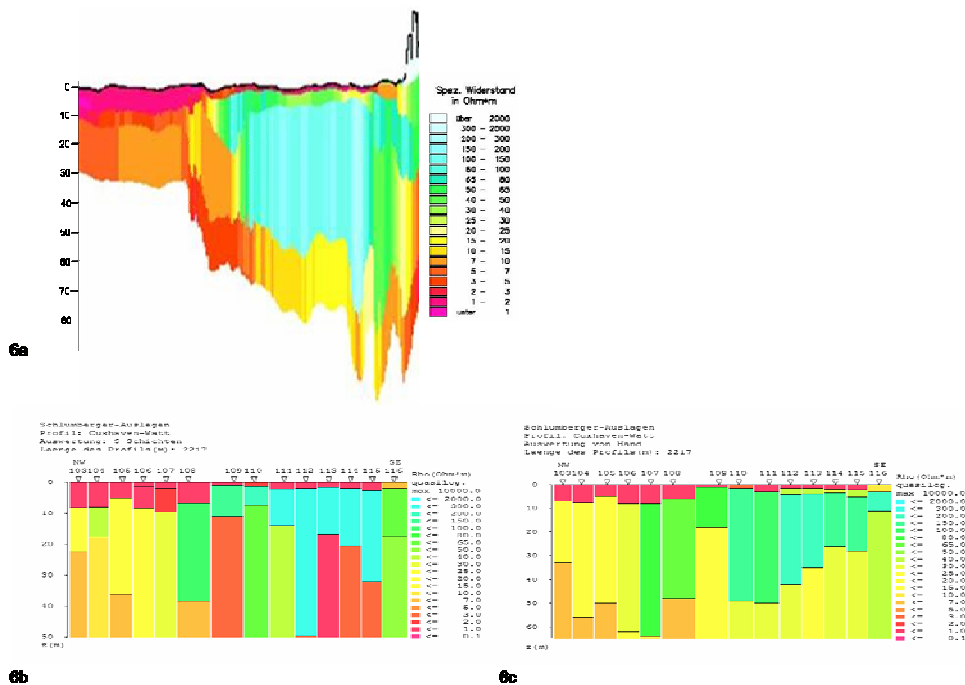


Abb. 6: Vergleich von HEM-Inversionen (a) mit Ergebnissen von Geoelektrik-Inversionen mit 3 Schichten (b) sowie den Resultaten der Handauswertung (c) für Profil 1 (Watt, vgl. Abb. 3).

Fig. 6: Comparison of HEM inversions (a) with results of geoelectric inversions with 3 layers (b), and results of curve fitting (c) along profile 1 (tidal flats, cf. Fig. 3)

Die fehlenden unteren Asymptoten bei den Messkurven der Punkte 109 und 110 deuten darauf hin, dass die Mächtigkeit der obersten Schicht sehr gering ist (die minimalen AB/2-Werte sind hier zu groß). Dies passt mit dem Befund zusammen, dass in diesem Bereich das Süßwasser bereits mit einer 1 m tiefen Bohrung gewonnen werden konnte (siehe blauen Bohrpunkt in Abb. 1). Bei den Modellen der Handauswertung ist die gut leitende (salzhaltige) Deckschicht dünner. Außerdem ergibt sich ein niedrigerer Widerstandswert für die 2., schlechter leitende Schicht, die Süßwasser repräsentiert. Bei einem Vergleich mit den HEM-Inversionsergebnissen (Abb. 6a) wird deutlich, dass beide Verfahren ein ähnliches Ergebnis liefern. Sowohl die Ausdehnung längs des Profils, als auch die Mächtigkeit der obersten Schicht stimmen in beiden Fällen relativ gut überein.

Profil 2

Bei allen 7 Punkten des Ufer-Profiles (Profil 2, vgl. Abb. 3) weisen die ρ_s -Kurven im Prinzip auf einen Vierschichtfall hin, dessen oberste Schicht relativ hohe spezifische Widerstände besitzt, was auf trockene Geestsande deutet (Abb. 7). Es folgt eine Wechsellagerung mit der besser leitenden 2. Schicht (Sande mit Ton- und Schlufflagen) mit einer schlechter leitenden 3. Schicht (Süßwasser führende Geestsande) und einer wieder besser leitenden 4. Schicht (Salzwasserbereich). Eine Intrusion von Salzwasser in den Geestbereich könnte ebenfalls existieren (SIEMON, 2005). Die Widerstandsmodelle des Profils 2 weichen deutlich von denen des Profils 1 ab. Auf Profil 1 ist eine ausgeprägte laterale Widerstandsvariation erkennbar (2D/3D-Struktur), bei Profil 2 ist das nicht der Fall.

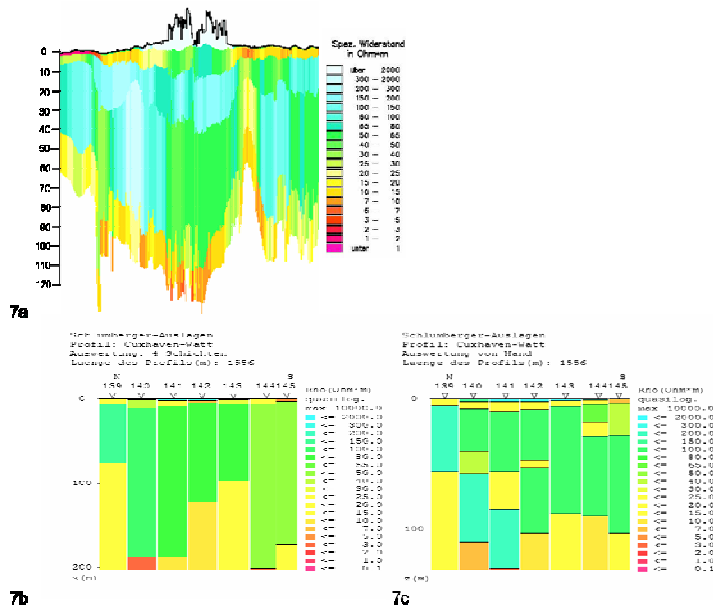


Abb. 7: Vergleich der HEM-Ergebnisse (a) für das Profil 2 (Ufer) mit den Geoelektrik-Inversionsergebnissen mit 4-Schichten (b). Bei den Handauswertungen (c) wurden bis zu 6 Schichten verwendet.

Fig. 7: Comparison of HEM inversion results (a) along profile 2 (shore) with geoelectric models with 4 layers. Up to 6 layers were used for curve fitting (c).

Die Grenze zur untersten Schicht ist bei beiden Geoelektrik-Auswertungen ähnlich. Die spezifischen Widerstände bei den Punkten 139 bis 141 sind bei der Handauswertung höher und entsprechen damit eher den Resultaten der HEM-Auswertung.

Quantitativer Vergleich von Geoelektrik- und HEM-Modellen

Für beide Profile ist die Übereinstimmung der geoelektrischen mit den HEM-Resultaten aufgrund des visuellen Vergleichs recht gut. Für einen quantitativen Vergleich wurde für das geoelektrische und das aereoelektrische Watt-Profil der Schnittpunkt bestimmt. Es wurden zur Vereinfachung (angenäherte Rotationssymmetrie) Geoelektrik- und HEM-Daten (5-Schicht-Fälle) mit entsprechender Distanz vom Schnittpunkt betrachtet. Die nach lateraler Mittelung der HEM-Daten gewonnenen Mächtigkeiten und spezifischen Widerstände wurden mit den Modellparametern der Geoelektrik verglichen sowie in eine Vorwärtsrechnung eingespeist. Es ergaben sich z. T. deutliche Abweichungen, deren Ursachen noch geklärt werden sollen. So können u.a. Anisotropien des spezifischen Widerstands hierfür verantwortlich sein. Bei diesem Vergleich wurde die Handauswertung nicht in Betracht gezogen, weil, wie erwähnt, die dabei auftretenden Abweichungen zu den Messkurven relativ groß waren.

Mehrdimensionale Modellrechnungen

An der Geometrie der Anomalie, wie sie sich aus den HEM-Ergebnissen ergibt (Ellipsenform, s. Abb. 3), ist erkennbar, dass es sich um eine zwei- bzw. dreidimensionale Struktur handelt. Entsprechende Vorwärtsrechnungen mit vorhandener Software (RODEMANN et al., 2004) wurden für die Punkte 103 und 109 aus dem Profil 1 durchgeführt. Dabei wurde das 3D-Programm 8h2 (RODEMANN et al., 2004) mit automatischer Gitterkonstruktion und das Vorwärtsprogramm Dreid (Autor: SPITZER, Uni Freiberg) verwendet. Es ergab sich, dass die mehrdimensionalen Modellrechnungen zu keinen signifikant anderen Ergebnissen führten. Es ist aber anzunehmen, dass sich dies bei wesentlich größeren Auslagen ändern würde. Die Abweichungen von der Messkurve haben ihren Grund in den verwendeten 2-Schicht-Auswertungen. 3-Schicht-Auswertungen verbessern, soweit durchgeführt, die Übereinstimmung. Das Programm 8h2 eignet sich auch zu Inversionsrechnungen. Einen Überblick über weitere Inversionsalgorithmen gibt GÜNTHER (2004). Die folgende Abb. 8 zeigt einen Vergleich einer 1D-Inversion und einer 2D-Anpassung aufgrund von 1D-Inversionen, beides für einen 2-Schicht-Fall.

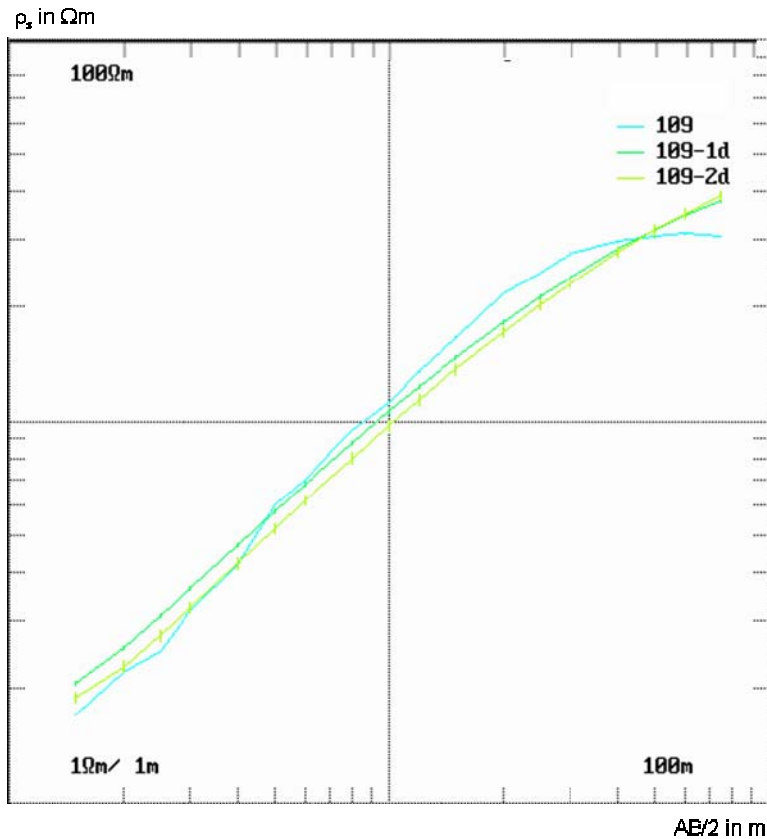


Abb. 8: Vergleich der gemessenen Sondierungskurve (blau) am Punkt 109 mit zwei 2-Schicht-Auswertungen. Die grüne Kurve (109-1d) ist das Resultat der 1D-Inversion mit festgehaltenem oberem spezifischen Widerstand. Die hellgrüne Kurve (109-2d) ist das Resultat einer 2D-Vorwärtsrechnung. Dabei wurde für jeden Punkt des 1. Profils eine 1D-Inversion (2-Schichtfälle) durchgeführt. Die resultierenden spezifischen Widerstände und Mächtigkeiten wurden gerundet. Die Widerstandsverteilung in Form eines 2D-Gitters wurde in das erwähnte Programm 8h2 eingegeben.

Fig. 8: Comparison of the measuring curve (blue) at point 109 with two 2-layer-calculations. The green curve (109-1d) is the result of the 1D-inversion with fixed upper resistivity. The light green curve (109-2d) resulted from a 2D-forward calculation. For each point of the first profile a 1D-inversion (2-layer cases) was performed. The resulting resistivity and thickness values were rounded. The resistivity distribution in the form of a 2D-mesh was input into the mentioned program 8h2.

Die Widerstandsverteilung aus den 1D-Inversionen wurde für das Startmodell der 2D-Rechnung des 1. Profils verwendet. Im Vergleich zu den Messkurven ergibt sich für die 1D-Inversion eine maximale Abweichung von 24% und ein Wert für die kleinsten Abweichungsquadrate (lsq) von 13%. Die 2D-Auswertung mit der Kombination der 1D-Inversionen ergibt andererseits eine maximale Abweichung

von 21% und eine l_{sq} -Abweichung von 14%. Man erkennt, dass die Ergebnisse nicht stark voneinander abweichen. Die 1D-Inversion scheint damit schon ein recht gutes Ergebnis zu liefern. 3D-Rechnungen ergab keine deutlichen Unterschiede.

Ausblick

Die Untersuchungen einer Süßwasserlinse im Watt mit Hubschrauber-Elektromagnetik und Gleichstrom-Geoelektrik haben gezeigt, dass die Resultate der beiden geophysikalischen Methoden recht gut übereinstimmen und sich damit gegenseitig ergänzen und stützen. Die Resultate stimmen auch mit den beschriebenen hydrogeologischen Ansichten überein. Die Frage der Anisotropie des spezifischen Widerstandes konnte durch die einfache Gegenüberstellung der Daten allerdings nicht ausreichend beantwortet werden, vgl. den Abschnitt „Quantitativer Vergleich von Geoelektrik- und HEM-Modellen“. Hierzu ist eine gleichzeitige Inversion (joint inversion) nötig, die mindestens für die Geoelektrik eine entsprechende Vorwärtsrechnung erforderlich macht. Hierzu existieren bereits Arbeiten (z.B. WEIDELT, 1999, YIN & WEIDELT, 1999). Es wird angestrebt, eine solche gleichzeitige Inversion durchzuführen, auch weil im GGA-Institut eine solche „joint inversion“ von Seismik- und Geoelektrik-Daten geplant ist. Bei der BGR sind Arbeiten zu einer gemeinsamen Inversion von TEM (Transient-Elektromagnetik) und HEM geplant.

Für eine weitere detaillierte Auswertung der Geoelektrik-Messungen auf dem Sahlenburger Watt besteht nach unserer Meinung z. Zt. keine Notwendigkeit, weil aus den HEM-Daten bereits hinreichend gute Informationen über die laterale und vertikale Ausdehnung der Versalzenungen und der Süßwasserlinsen gewonnen werden konnten. Sinnvoll wäre es jedoch, mit Hilfe von Geoelektrik-Langauslagen die Unterkante der Süßwasserlinse sicherer zu bestimmen.

Danksagung

Die Autoren danken Herrn Hans-Joachim Rehli (BGR) für seine kompetente und tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Messungen. Dem Naturschutzbeauftragten des Niedersächsischen Wattenmeeres danken wir für die Genehmigung zum Vermessen der Wattprofile. Der Kurverwaltung Cuxhaven und der Forstverwaltung Midlum danken wir für die technische Unterstützung.

Literatur

BROST, E., BINOT, F., NOELL, U., SAUER, J., SUCKOW, A. & SIEMON, B. (2003): Eine Süßwasserlinse im Wattenmeer. Abstract, Tagungsband zur 63. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 23.-28.2.2003, Jena.

GÜNTHER, T. (2004): Inversion methods and resolution analysis for the 2D/3D reconstruction of resistivity structures from DC measurements, Dissertation, TU Freiberg.

INMAN, J. R. (1975): Resistivity inversion with ridge regression, *Geophysics*, 40, p. 798f.

- KURTZ, S. (2004): Grundwasseraustrittsstellen im Sahlenburger Watt: Methoden zur Beprobung von Fluiden und Bilanzierung des Grundwasserausstroms. Diplomarbeit, Universität Bremen, FB Geowissenschaften, Bremen.
- LINKE, G. (1979): Ergebnisse geologischer Untersuchungen im Küstenbereich südlich Cuxhaven – Ein Betrag zur Diskussion holozäner Fragen, Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet, Band 13, Hrsg: Niedersächsisches Landesinstitut für Marschen- und Wurtenforschung, Wilhelmshaven.
- 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.
- MURAWSKI, H. (1983): Geologisches Wörterbuch, Enke Verlag, Stuttgart.
- REPSOLD, H. (1991): GEOKURZ, Geoelektrik in wenigen Worten, Eine kurze Anleitung für die Interpretation geoelektrischer Tiefensondierungen, Eigenverlag, Isernhagen-Kirchhorst.
- RODEMANN, H., BROST, E. & WORZYK, P. (2004): Gleichstromgeoelektrik über dem Baruther Maar, 11. Arbeitsseminar --Hochauflösende Geoelektrik-- 5.-7.10.2004, Tagungsband, Kloster Nimbschen bei Leipzig.
- RODEMANN, H. & MÜLLER, W. (2000): Ansätze zur Abschätzung von Geoelektrik Parameterfehlern (Maximum Norm), Protokoll für das Kolloquium Erdmagnetische Tiefenforschung, 20.-24.3.2000, Altenberg.
- RODEMANN, H. & REITMAYR, G. (1996): Zwei Auswerteprogramme für DC-Geoelektrik, in: BAHR, K & JUNGE, A. (Hrsg.) Protokoll über das 16. Kolloquium --Elektromagnetische Tiefenforschung-- auf 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.
- RODEMANN, H. & WORZYK, P. (1996): Einige Fehler bei der Schlumberger-Geoelektrik, in: BAHR, K & JUNGE, A. (Hrsg.) Protokoll über das 16. Kolloquium --Elektromagnetische Tiefenforschung-- auf Burg Ludwigstein, 9.4.-12.4.1996. Göttingen / Frankfurt/Main.
- SCHNEIDER, H. (1988): Die Wassererschließung, Erkundung, Bewirtschaftung, und Erschließung von Grundwasservorkommen in Theorie und Praxis, 3. neubearbeitete Auflage, Vulkan-Verlag, Essen
- SENGPIEL, K.-P. & MEISER, P. (1981): Locating the fresh water / salt water interface on Spiekeroog Island by airborne EM resistivity/depth mapping. Geol. Jb., C29.
- SIEMON, B. (2005): Ergebnisse der Aeroelektromagnetik zur Grundwassererkundung im Raum Cuxhaven-Bremerhaven, Zeitschrift für angewandte Geologie, Hannover.
- SIEMON, B. & BINOT, F. (2003): Aeroeophysikalischen Erkundung von Salzwasserintrusionen und Küstenaquiferen im Gebiet Bremerhaven-Cuxhaven – Verifizierung der AEM-Ergebnisse. In: HÖRDT,

- A. & STOLL, J. (Hrsg.): Protokoll über das 19. Kolloquium „Elektromagnetische Tiefenforschung“, 1.-5.10.2001, Burg Ludwigstein, 319-328.
- SIEMON, B., VOß, W., RÖTTGER, B., REHLI, H.-J., PIELAWA, J. (2001): Forschungsvorhaben -- Detaillierte aerogeophysikalische Landesaufnahme-- (DAGLA), Messgebiet Cuxhaven, Technischer Bericht 121236, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- SINDOWSKI, K.-H. (1969): Erläuterungen zu Blatt Altenwalde Nr. 2117, Geologische Karte von Niedersachsen 1:25000, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover.
- TELFORD, W.M., GELDART, L.P. & SHERIFF, R.E. (1998): Applied Geophysics, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- TRONICKE, J., BLINDOW, N., GROSS, R., LANGE, M. A. (1999): Joint application of surface electrical resistivity- and GPR-measurements for groundwater exploration on the island of Spiekeroog - northern Germany. *Journal of Hydrology*, 223, 44-53.
- WEIDELT, P. (1989): Interpretationstheorie geophysikalischer Daten, Vorlesungsskript, WS 88/89, Institut für Geophysik und Meteorologie, TU Braunschweig.
- WEIDELT, P. (1999): 3-D Conductivity models: implications of electrical anisotropy, in *Three-Dimensional Electromagnetics*, p. 119-137, ed. Oristaglio, M. & Spies, B., *Geophysical Developments*, 7, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.
- WESTERN-ATLAS (1985): Log interpretation chart. Houston (Atlas Wireline Services); p. 27
- WORZYK, P. (1995): Geoelektrische Tiefensondierungen auf der Insel Borkum. Untersuchungen zur Veränderung der Süßwasserlinse im Ostland, NLF-Bericht 111751.
- YIN, C. & WEIDELT, P. (1999): Geoelectrical fields in a layered Earth with arbitrary anisotropy, *Geophysics*, 64, 426-434.