

Geophysikalische Verfahren zur Erkundung und Charakterisierung von Grundwasserleitern in quartären Rinnen

Helga Wiederhold · Hanna-Maria Rumpel · Esben Auken · Bernhard Siemon · Wolfgang Scheer · Reinhard Kirsch

Eingang des Beitrages: 25. 6. 2007 / Eingang des überarbeiteten Beitrages: 20. 11. 2007 / Online veröffentlicht: 17. 4. 2008
© Springer-Verlag 2008

Kurzfassung Am Beispiel der eiszeitlichen Ellerbeker Rinne werden geophysikalische Verfahren zur Erkundung und Charakterisierung von Grundwasserleitern in Lockerse-dimenten aufgezeigt. Fünf seismische Profile bilden auf einem 25 km langen Abschnitt der bis über 2 km breiten Rinne deren Form, ihre interne Struktur und ihre Einbettung in das Umgebungsmaterial ab. Mit einer transientelektromagnetischen Messung vom Hubschrauber aus wird eine flächendeckende Verteilung der spezifischen elektrischen Widerstände in bis zu 300 m Tiefe ermittelt. Der Grundwasserleiter in der Rinne lässt sich dabei klar von den tertiären Tonen abgrenzen. Eine gute Übersicht über die Beschaffenheit der Grundwasserdeckschichten liefert bis in 100 m Tiefe schnell und flächendeckend – ebenfalls vom Hubschrauber aus – ein im Frequenzbereich arbeitendes elektromagnetisches Verfahren. Durch die Kombination der Verfahren unter Ein-

beziehung von Bohrungen und geologischem Fachwissen ergibt sich eine gut abgesicherte Interpretation.

Geophysical methods for investigation and characterization of groundwater resources in buried valleys

Abstract Geophysical methods for the investigation and characterization of groundwater resources in porous media are shown using the subglacial Ellerbeker Rinne as an example. Five seismic sections illustrate the shape, internal structure and surrounding hydrostratigraphy of 25 km of this buried valley that, in some places, is more than 2 km wide. Data from the transient electromagnetic airborne survey reveal the distribution of electrical resistivity down to a depth of 300 m. The groundwater-saturated channel in the valley is clearly distinguishable from the Tertiary clays. A good and fast overview on the character of the confining beds down to 100 m depth was provided by the frequency-domain helicopter-borne electromagnetic method. A reliable interpretation was obtained by combining the different methods with borehole information and expert geological knowledge.

Keywords buried subglacial valley · seismic · airborne electromagnetics · groundwater protection · Ellerbeker Rinne

Einleitung: eiszeitliche Rinnen des Quartärs – Entstehung, Verbreitung und Bedeutung für die Wasserversorgung

In den Kaltzeiten des Quartärs waren weite Teile Nordeuropas von mächtigem Inlandeis bedeckt. Besonders während der ersten großen Vereisungsphase, der Elster Kaltzeit, entstanden in den Lockergesteinsgebieten des Nordwesteuro-

Dr. H. Wiederhold (✉), Dr. H.-M. Rumpel
Leibniz Institut für Angewandte Geophysik
Stilleweg 2, 30655 Hannover
E-Mail: helga.wiederhold@gga-hannover.de,
hanna-maria.rumpel@gga-hannover.de

Ph.D. E. Auken
University of Århus, HydroGeophysics Group
Høegh-Gulbergs Gade 2, 8000 Århus C, Dänemark
E-Mail: esben.auken@geo.au.dk

Dr. B. Siemon
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Stilleweg 2, 30655 Hannover
E-Mail: bernhard.siemon@bgr.de

Dipl.-Geol. W. Scheer, Dr. R. Kirsch
Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein
Hamburger Chaussee 25, 24220 Flintbek
E-Mail: wscheer@lanu.landsh.de, rkirsch@lanu.landsh.de

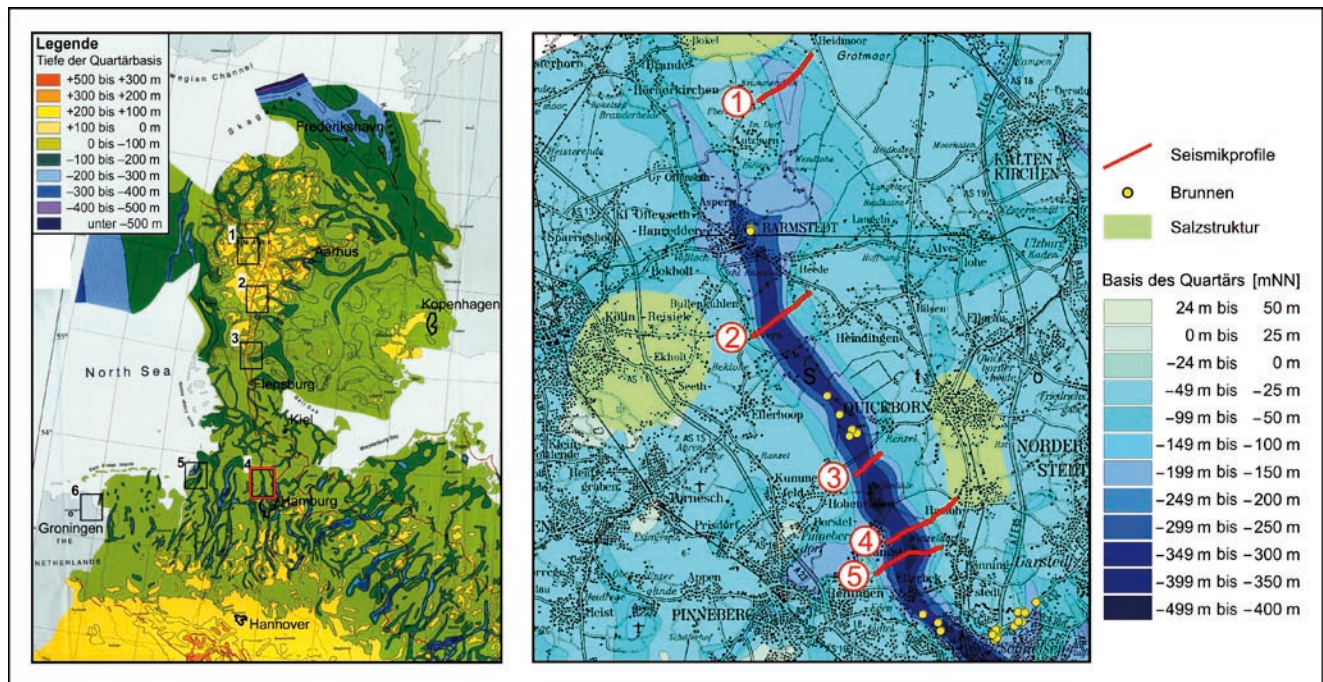


Abb. 1 Links: Rinnenverteilung (Stackebrandt et al. 2001); Rechts: Lage des Projektgebietes Ellerbek Rinne mit Tiefenlage der Quartärbasis im Projektgebiet, reflexionsseismische Messprofile (mit Nummer) sowie Förderbrunnen der Wasserwerke (gelb).

päisichen Sedimentationsraums ausgedehnte eiszeitliche Rinnensysteme, die nach heutiger Kenntnis überwiegend durch Schmelzwässer unterhalb der Gletscherbasis ausgeräumt wurden (Ehlers 1994).

Die räumliche Ausdehnung der Rinnen variiert, erreicht aber häufig Dimensionen von vielen Kilometern in der Länge bei durchschnittlichen Breiten von zwei bis vier Kilometern und Tiefen von mehreren hundert Metern. Heute sind die meisten dieser Strukturen mit unterschiedlichen Sedimenten vollständig wieder verfüllt und an der Geländeoberfläche nicht mehr zu erkennen. Die Rinnenfüllung kann dabei aus Geschiebemergeln, Tonen, Schluffen, Sanden und Kiesen bestehen, wobei der interne Schichtenaufbau innerhalb der Rinne oft sehr wechselhaft ist.

Die in den Rinnen verbreiteten, tiefen Grundwasserleiter werden häufig von hydraulisch gering durchlässigen Deckschichten überlagert und stellen dann gut geschützte Speicher für die Gewinnung von Trinkwasser dar.

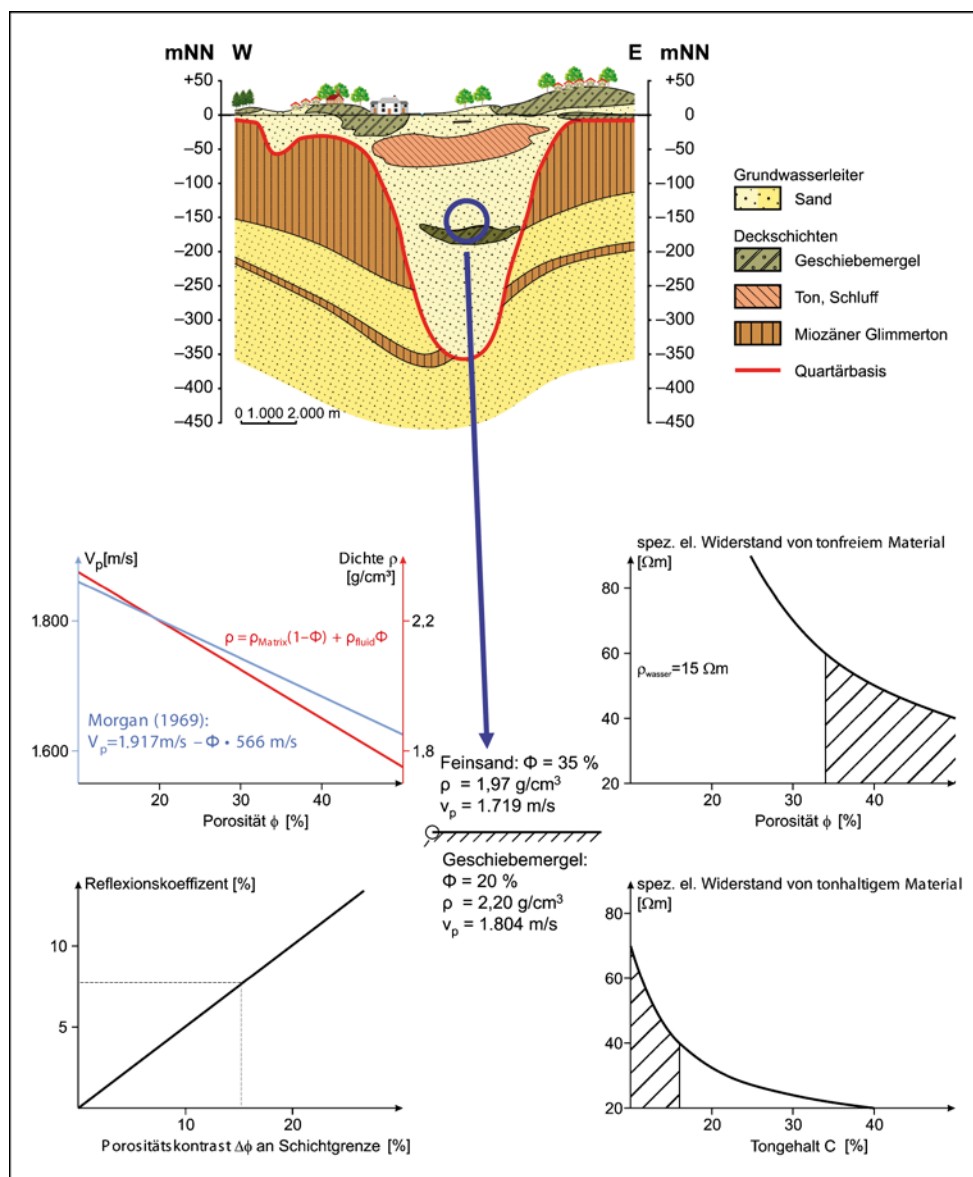
Abbildung 1 gibt einen Überblick über die Verbreitung der Rinnen in Nordeuropa sowie die Lage des Projektgebietes Ellerbek Rinne. Hier sowie in fünf weiteren Projektgebieten in Dänemark, der Bundesrepublik Deutschland sowie den Niederlanden wurden im Rahmen des Projekts BurVal beispielhaft eiszeitliche Rinnen hydrogeologisch und geophysikalisch untersucht (BurVal Working Group 2006). Das Projektgebiet liegt im dicht besiedelten westlichen Grenzgebiet zwischen Hamburg und Schleswig-Holstein. Aus der in Nordwest-Südost-Richtung durch das Gebiet

verlaufenden Rinne (dargestellt durch die Tiefenlage der Quartärbasis) wird von drei Wasserwerken Grundwasser gefördert. Die Ellerbek Rinne verläuft durch ein Gebiet, in dem oberflächennahe Grundwasserleiter durch intensive Landwirtschaft häufig stark anthropogen belastet sind. Hier stellen die besser geschützten tiefer gelagerten Grundwasserleiter der eiszeitlichen Rinnen eine Alternative für die Trinkwasserversorgung dar. Eine detaillierte Übersicht über das nutzbare Grundwasserdargebot ist in LANU (2004) zusammengestellt.

Der hydrogeologische Aufbau ist im schematischen Schnitt in Abbildung 2 dargestellt. Die eiszeitlichen Sedimente schneiden in den zentralen Teilen der Rinne bis über 400 m tief in die Abfolge von Tonen und Sanden des Jungtertiärs ein. Da die eiszeitlichen Wasserleiter der Rinne an den Flanken eine direkte hydraulische Anbindung an die umgebenden tertiären Wasserleiter haben, quert das in den tertiären Wasserleitern in Richtung Südwest fließende Grundwasser die Rinne nahezu im rechten Winkel.

Die tieferen Bereiche der eiszeitlichen und tertiären Wasserleiter weisen Grundwasser mit hoher Mineralisierung auf. So ist die Grenze zwischen Süß- und Salzwasser im mittleren und südlichen Teil der Rinne in Tiefen von ca. 200 bis 250 m unter Gelände ausgebildet. In Bereichen, in denen eine Druckentlastung durch Exfiltration in überlagernden flacheren Grundwasserleitern oder durch eine Grundwasserentnahme stattfindet, steigt diese Grenze lokal deutlich an.

Abb. 2 Schematischer geologischer Schnitt und Änderung geophysikalischer Parameter an einer Schichtgrenze zwischen Sand (Porosität = 35 %) und Geschiebemergel (Porosität = 20 %). Rechts: spezifischer elektrischer Widerstand, für den Sand berechnet nach dem Gesetz von Archie als Funktion der Porosität, für den Geschiebemergel berechnet als Funktion des Tongehaltes nach Sen et al. (1988). Es ergibt sich an dieser Schichtgrenze keine nennenswerte Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes. Links: seismische Geschwindigkeit für Kompressionswellen (nach Morgan 1969) und Dichte (ρ) als Funktion der Porosität, daraus abgeleitet der Reflexionskoeffizient an der Schichtgrenze. An dieser Schichtgrenze, an der die Porosität von 35 % auf 20 % abnimmt, werden 6,4 % der einfallenden seismischen Energie reflektiert; die Schichtgrenze ist mit reflexionsseismischen Verfahren erkennbar.



Geophysikalische Erkundung von Lockersedimenten

Die Erkundung von Lockersedimenten wie z. B. im Bereich quartärer Rinnen ist eine Herausforderung für die Geophysik (z. B. Kirsch 2006a). Rasch wechselnde Ablagerungsbedingungen der Sedimente, insbesondere unter glazialen Einfluss, können zu horizontal und vertikal kleinräumigen Änderungen von Mineralzusammensetzung und Korngrößenverteilung führen, woraus sich ebenso kleinräumige Änderungen der physikalischen Sedimentparameter ergeben.

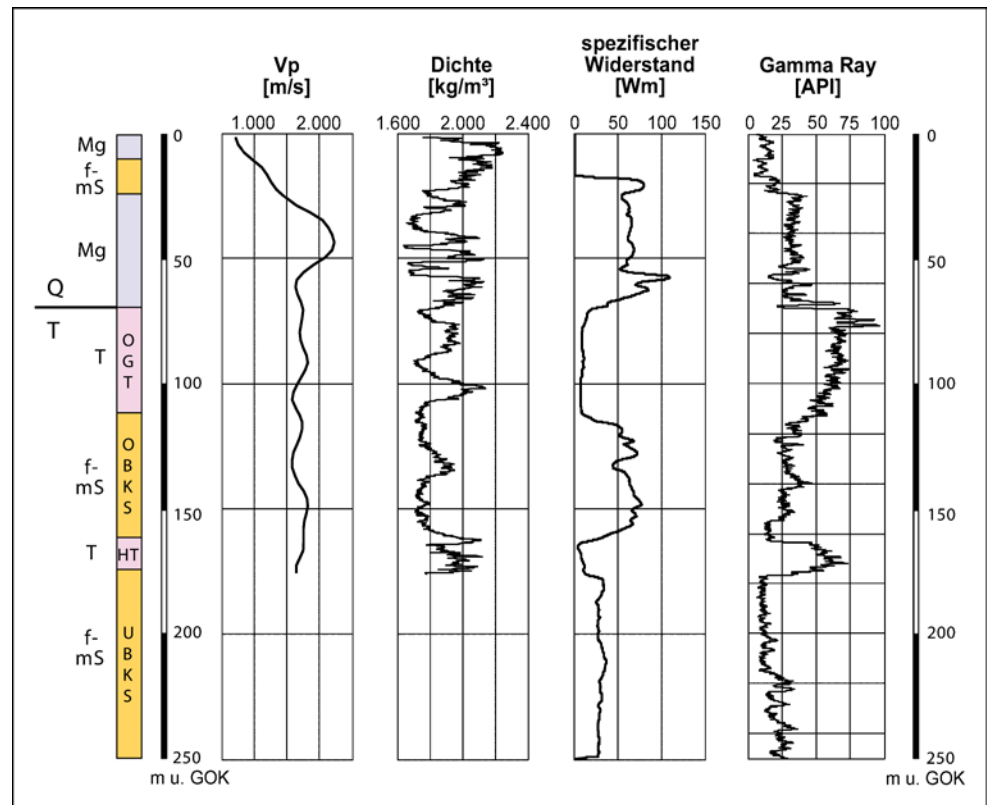
Die für eine geophysikalische Erkundung wichtigsten Sedimentparameter sind Porosität und Tongehalt, aus denen sich Dichte, Ausbreitungsgeschwindigkeit seismischer Wellen und der spezifische elektrische Widerstand ableiten. Bei den im Bereich quartärer Rinnen anzutreffenden Unter-

grundmaterialien Sand, Geschiebemergel und Ton können Porosität und Tongehalt weite und sich überschneidende Wertebereiche annehmen.

Sande werden im Allgemeinen eine geringere totale Porosität als Tone aufweisen (Hölting & Coldewey 2005). Die Porosität von Geschiebemergel als Sand/Ton-Gemisch wird unterhalb der Porosität von Sanden liegen, da die Tonminerale im Porenraum des Sandes eingelagert sind und diesen weiter reduzieren. Dies gilt insbesondere für stark kompaktierten Geschiebemergel, aber auch kompaktierte Tone können geringe Porosität aufweisen. Eine weite Spanne des Wertebereichs ergibt sich auch beim Tongehalt von Geschiebemergeln, der zwischen 3 % und 40 % liegen kann (Agster 1996).

Die Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes ρ von der Porosität ϕ wird für tonfreies Material wie

Abb. 3 Ergebnisse einer Bohrlochvermessung (Bohrung 3912/14, GOK 12 mNN). Von links nach rechts: Bohrprofil (Mg = Geschiebemergel, S = Sand [f = fein, m = mittel], T = Ton, Q = Quartär, T = Tertiär, OGT = Oberer Glimmerton, OBKS = Obere Braunkohlensande, HT = Hamburger Ton, UBKS = Untere Braunkohlensande); seismische Intervallgeschwindigkeit V_p ; Dichte; spezifischer elektrischer Widerstand (Mittelwert aus kleiner (ES16) und großer (ES64) Normale); Gamma-Ray-Log.



z.B. Sande durch das Gesetz von Archie beschrieben, für das gilt:

$$[1] \quad \rho_{\text{Sediment}} = \rho_{\text{Porenwasser}} \cdot F$$

mit F als Formationsfaktor, der im Wesentlichen von der Porosität bestimmt wird

$$[2] \quad F = a \cdot \phi^{-m}$$

mit a , m = Materialkonstanten; bei Sanden gilt i. A. $a = 1$ und $m = 1,3$ (Schön 1996). Bei tonhaltigem Material wie z.B. dem Geschiebemergel hängt der spezifische elektrische Widerstand ebenfalls von der Porosität und vom spezifischen Widerstand des Porenwassers ab, zusätzlich aber auch stark von der Kationenaustauschkapazität des Materials (Sen et al. 1988). Die Kationenaustauschkapazität ist wiederum nahezu linear mit dem Tongehalt verknüpft (Günzel 1994).

Dichte und seismische Geschwindigkeit sind ebenfalls von der Porosität abhängig. Das Produkt beider Größen ist die akustische Impedanz, die wiederum den Reflexionskoeffizienten der einfallenden seismischen Welle bedingt. Bei senkrechtem Einfall auf eine Schichtgrenze gilt für den Reflexionskoeffizienten R :

$$[3] \quad R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1}$$

mit ρ_1 , ρ_2 = Dichte der hangenden bzw. liegenden Schicht und V_1 , V_2 = seismische Geschwindigkeit der hangenden bzw. liegenden Schicht.

In Abbildung 2 ist eine fiktive Schichtgrenze zwischen Feinsand und Geschiebemergel im Untergrund dargestellt. Die Porosität von Feinsand wurde mit 35%, die des Geschiebemergels mit 20% angenommen. Nimmt man für den Geschiebemergel einen geringen Tongehalt (unter 10%) an, dann haben beide Materialien einen ähnlichen spezifischen elektrischen Widerstand (ca. $60 \Omega m$), d.h. mit geoelektrischen oder elektromagnetischen Verfahren wird diese Schichtgrenze kaum bestimmbar sein. Für eine eindeutige Materialansprache sollten die gemessenen spezifischen Widerstände also deutlich höher (Sand, Kies) oder deutlich niedriger (Ton) als $60 \Omega m$ sein. Reale Daten aus dem Messgebiet zeigt Abbildung 3.

Im Gegensatz zu den Widerstandsverfahren kann sich die angenommene Schichtgrenze bei reflexionsseismischen Messungen klarer abzeichnen. Ändert sich die Porosität an der Schichtgrenze wie angenommen um 15%, dann werden 7,9% der einfallenden seismischen Energie reflektiert werden. Dies sind gute Voraussetzungen für eine reflexionsseismische Kartierung dieser Schichtgrenze, und zwar unabhängig davon, ob die Porosität im Liegenden zu- oder abnimmt.

Geophysikalische Charakterisierung quartärer Rinnen

Im Zusammenhang mit der Nutzung quartärer Rinnen für die Wasserversorgung können geophysikalische Messungen einen Beitrag zu folgenden Fragestellungen liefern:

- die Geometrie einer Rinne: laterale Ausdehnung und Tiefenerstreckung
- das Innere der Rinne: Grundwasserleiter und -trennschichten
- Grundwasserdeckschichten

Im Projekt BurVal ergab sich die Gelegenheit, eine Vielzahl geophysikalischer Verfahren auf ihre Anwendbarkeit zu testen. Im Folgenden werden nur die Verfahren dargestellt, deren Ergebnisse *direkte* Aussagen zu den genannten Fragestellungen liefern. Es handelt sich hierbei um reflexionsseismische Messungen sowie um aerelektromagnetische Kartierungen im Frequenzbereich und im Zeitbereich. Hintergründe zu diesen Verfahren liefern z. B. Rabbel (2006), Siemon (2006), Christiansen et al. (2006), BurVal Working Group (2006).

Die Geometrie einer Rinne: laterale Ausdehnung und Tiefenerstreckung

Durch die subglaziale Erosion, die zur Rinnenbildung führte, ist die natürliche Schichtung des jungtertiären Untergrundes unterbrochen. Die Rinne ist anschließend mit quartärem oder umgelagerten tertiärem Material verfüllt worden. Da die Dichte von sedimentärem Material von der Dichte des Matrixmaterials, der Korngrößenverteilung und den Ablagerungsbedingungen beeinflusst wird, kann ein Dichteunterschied zwischen Rinnenfüllung und Umgebungsmaterial erwartet werden. Dieser Dichteunterschied ist relativ gering, führt aber zu einer messbaren Schwereanomalie, durch die eine Lokalisierung der Rinne möglich ist. Die Ellerbeker Rinne deutet sich im Wesentlichen als negative Schwereanomalie an (Gabriel et al. 2003). Je nach Dichtekontrast zwischen Rinnenfüllung und Umgebungsmaterial kann sich eine Rinne aber auch als positive Schwereanomalie abzeichnen (Poulsen & Christensen 1999, Gabriel 2006).

Ein detailliertes Abbild des Untergrundes liefert eine reflexionsseismische Vermessung, die im Bereich der Ellerbeker Rinne durch das GGA-Institut im Rahmen des Projektes BurVal erfolgte. Die Rinnenstruktur zeichnet sich auf allen Profilen klar ab (Abb. 4). Die Tiefe der Rinnenbasis nimmt von Norden (ca. 200 m) nach Süden hin zu (ca. 400 m). Die Rinne ist in die tertiären Braunkohlensande eingeschnitten; es kann von einer hydraulischen Verbindung zwischen den Rinnenwasserleitern und den Wasserleitern der Braunkohlensande ausgegangen werden (LANU 2004).

Die Rinnenbasis zeigt, insbesondere im südlichen Bereich der Ellerbeker Rinne, teilweise ein ausgeprägtes Relief. Dies deutet darauf hin, dass die Rinnenstruktur nicht

in einem einzigen Erosionsereignis entstanden ist, sondern dass die einmal vorgezeichnete Rinne in mehreren aufeinander folgenden Phasen (bei mehreren Eisvorstößen) als Abflusskanal für Schmelzwasser diente. Entsprechend inhomogen kann dadurch der innere Aufbau beschaffen sein, wie es sich z. B. im Profil 4 darstellt. Während im östlichen Teil der Rinne eine nahezu sölhige Schichtfolge vorherrscht, ist die Lagerung im westlichen Teil chaotisch mit ausgeprägten Rutschungs- bzw. Senkungsstrukturen. Als mögliche Erklärung kommt ein großer Toteisblock in Betracht, bei dessen Abtauen es zu einem Nachrutschen der Sedimente im Hangenden kam.

Während auf den nördlichen Profilen die tertiären Schichten außerhalb der Rinne nahezu sölhig gelagert sind, steigen sie im südlichen Teil nach Osten hin an. Dies ist eine Folge des Aufstiegs des nahe gelegenen Salzstocks Quickborn.

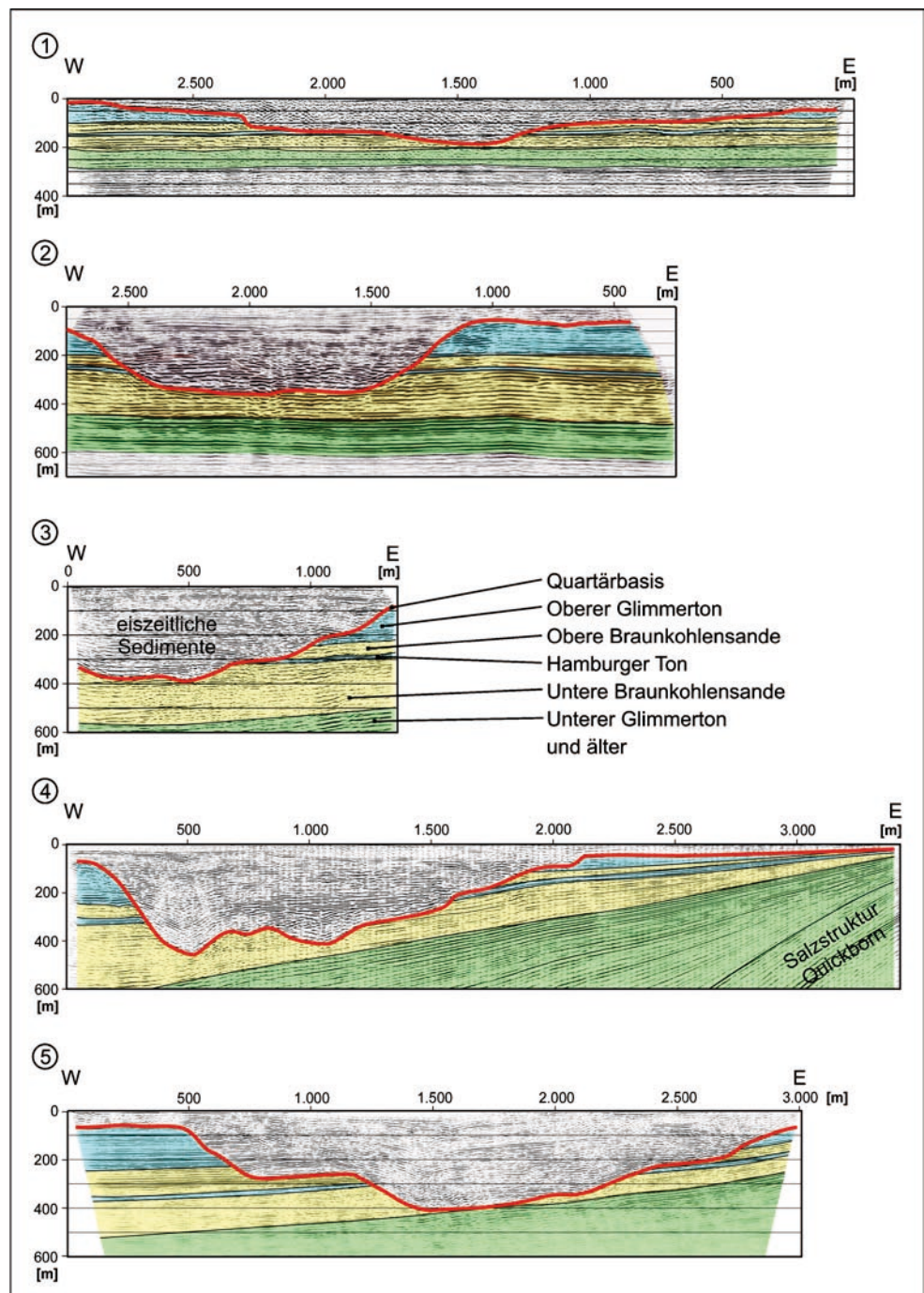
Im Bereich der Rinne wurde eine Befliegung mit dem SkyTEM-System durchgeführt. Bei dieser Entwicklung der HydroGeophysics Group der Universität Aarhus (Sørensen & Auken 2004) handelt es sich um ein transientelektromagnetisches Messsystem, dass von einem Hubschrauber in ca. 20 m Höhe über Gelände geschleppt wird. Das Ergebnis nach Auswertung der Messungen ist die Verteilung der spezifischen elektrischen Widerstände unterhalb der Fluglinie bis in eine Tiefe von ca. 300 m. Liegt ein hinreichend dichtes Raster an Messlinien vor, so kann die flächenhafte Verteilung des spezifischen Widerstandes für einen vorgegebenen Tiefenbereich dargestellt werden (Abb. 5). Für den Tiefenbereich von 180–200 m zeichnen sich außerhalb der Rinnen die tertiären Tone durch niedrige spezifische Widerstände (dunkelblau) ab, während innerhalb der Rinne Sande und Geschiebemergel mit höheren spezifischen Widerständen (rot bis hellblau) vorherrschen. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, den Verlauf einer Rinne aufgrund der flächenhaften Verteilung der spezifischen elektrischen Widerstände zu kartieren.

Das Innere der Rinne: Grundwasserleiter und -trennschichten

Aus reflexionsseismischen Messungen kann ein Abbild des Rinnenquerschnitts gewonnen werden (Abb. 4), es lassen sich ebenfalls die Schichtung innerhalb und außerhalb der Rinne darstellen. Eine Ansprache der Schichten ist im Außenraum der Rinne über die Ergebnisse von Aufschlussbohrungen möglich, da diese Schichten flächenhaft verteilt und weitgehend homogen sind. Der Bereich innerhalb der Rinne ist häufig derart inhomogen aufgebaut, dass die in einer Aufschlussbohrung erfassten Schichten nur über geringe Entfernungen durchgängig sind, die Ergebnisse der Bohrung sind daher nur über kurze Distanzen extrapolierbar.

Eine Möglichkeit der Materialansprache innerhalb der Rinne ergibt sich über den spezifischen elektrischen Wider-

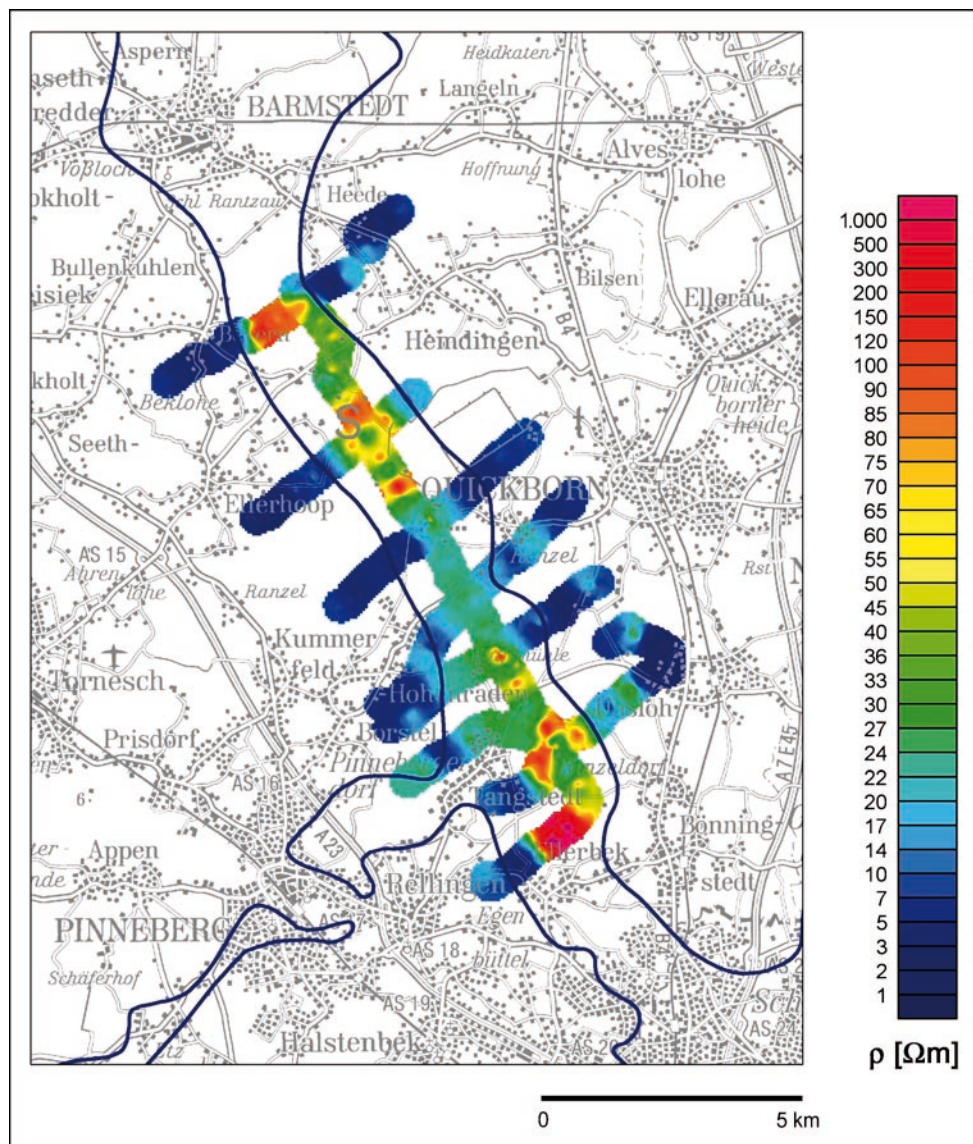
Abb. 4 Reflexionsseismische Profile aus dem Bereich der Elerbeker Rinne (zur Lage siehe Abb. 2), die Materialansprache außerhalb der Rinne erfolgte durch die Ergebnisse von Aufschlussbohrungen. Messparameter der Seismik: seismische Quelle, hydraulischer Vibrator MHV-2.7, Signalfrequenzen („Sweep“) 50–200 Hz, Vibrationspunkt- und Geophonpunkt-abstand jeweils 5 m, der Spur-abstand (CMP-Abstand) in den abgebildeten Profilen beträgt 2,5 m bzw. 5 m in Profil 2.



stand, zumindest wenn die Widerstandswerte deutlich oberhalb oder deutlich unterhalb von $60 \Omega\text{m}$ liegen. Die Widerstandsverteilung des Untergrundes für kleinere Tiefenbereiche kann durch geoelektrische Sondierungen, für größere Tiefen ($> 100\text{m}$) bevorzugt durch transientelektromagnetische Messungen (TEM) bestimmt werden. Größere Flächen können hierbei mit dem SkyTEM-Verfahren abgedeckt werden. Abbildung 6 zeigt ein so gewonnenes Widerstands-Tiefenprofil, das mit einem seismischen Profil (Nr. 4 in Abb. 4) überlagert wurde. Man erkennt innerhalb der

Rinne ausgeprägte sandige Bereiche mit hohen spezifischen elektrischen Widerständen sowie Bereiche, in denen eine eindeutige Materialansprache aufgrund von Überschneidung der spezifischen elektrischen Widerstände von sandigem und tonhaltigem Material schwierig ist (gelb-grün). Zusätzlich zeichnet sich oberhalb der sandigen Bereiche mit hellblauer Färbung eine Tonlage ab (vermutlich Lauenburger Ton). Im westlichen und östlichen Bereich außerhalb der Rinne ist, ebenfalls hellblau kodiert, eine tertiäre Tonlage erkennbar. Die tertiären Schichten steigen nach Osten hin

Abb. 5 Kartierung der spezifischen elektrischen Widerstände mit dem SkyTEM-System für den Tiefenbereich 180–200 m u. NN; dunkelblau: niedrige spezifische elektrische Widerstände, in diesem Fall tertiäre Tone außerhalb der Rinne; hellblau bis rot: mittlere (Geschiebemergel) bis hohe (Sand) elektrische Widerstände innerhalb der Rinnenfüllung; durchgezogene Linie: Quartärbasis 100 m u. NN. Information zur Messtechnik: Transient-elektromagnetisches System der Fa. SkyTEM (Aarhus); bei einer Fluggeschwindigkeit von 20–40 km/h beträgt der Messpunktabstand 30–50 m.



an und dünnen aus. Ab etwa Profilmeter 2.900 ist sogar eine tiefere Schicht mit niedrigem spezifischem Widerstand zu erkennen, die vermutlich mit dem Unteren Glimmerton korreliert. Aufgrund der größeren Tiefe und der zunehmenden Mächtigkeit der darüberliegenden elektrisch gut leitfähigen Schicht kann diese nach Westen hin nicht mehr mit dem angewandten elektromagnetischen Verfahren erfasst werden. Im Osten wird die Schicht der unteren Braunkohlensande zwischen den Glimmertonen gut aufgelöst. Aufgrund der guten Kenntnis des allgemeinen hydrogeologischen Bildes (LANU 2004) kann diese Schicht als Ton angesprochen werden, die alternative Deutung als salzwasserführender Sand ist nahezu ausgeschlossen.

Durch eine transientelektromagnetische Vermessung kann die Verteilung von tonhaltigem und sandigem Material innerhalb der Rinne sowie im Außenraum kartiert werden.

Durch Kombination mit reflexionsseismischen Messungen, durch die die Begrenzung der Rinnen erkennbar wird, lässt sich eine erhöhte Sicherheit bei der Interpretation erlangen.

Schutz des Grundwassers: die Beschaffenheit der Grundwasserdeckschichten

Als Grundwasserdeckschichten werden die geologischen Schichten oberhalb des Grundwasserleiters bezeichnet. Niederschlagswasser muss durch diese Schichten versickern, um zur Grundwasserneubildung beizutragen. Während dieser Versickerung kann eine Reinigung des eventuell kontaminierten Wassers durch mikrobiellen Abbau oder Sorptionsprozesse an Tonpartikeln erfolgen. Als Maß für das Schutzvermögen kann die Verweilzeit des Sickerwassers in den Deckschichten betrachtet werden. Ein Grundwasser-

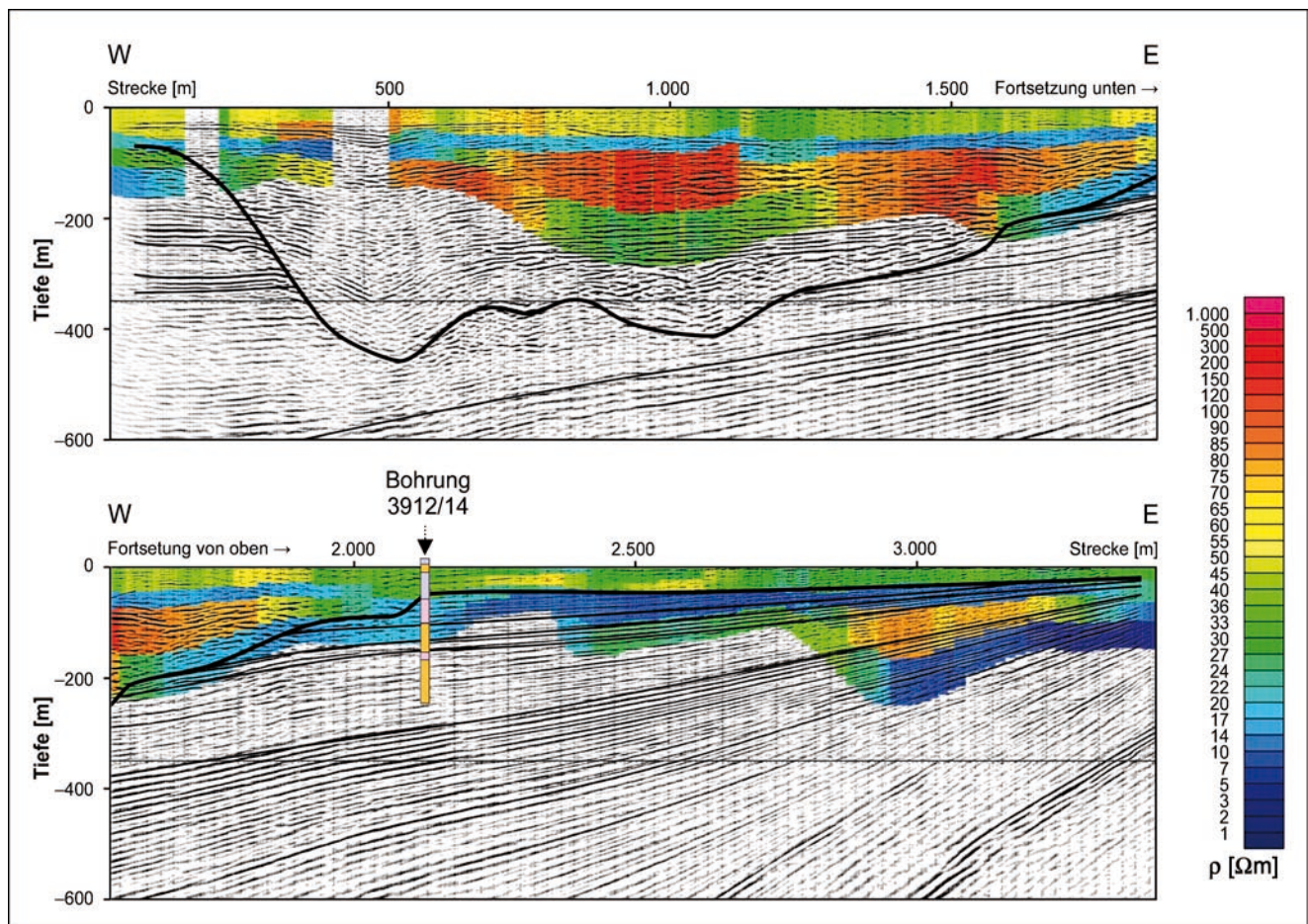


Abb. 6 Ergebnis der SkyTEM-Befliegung: Verteilung der spezifischen elektrischen Widerstände entlang eines reflexionsseismischen Profils (Profil 4 in Abb. 4); orange bis rot: Sand mit hohen spezifischen elektrischen Widerständen (Grundwasserleiter); hellblau: tonige Deckschicht mit niedrigem spezifischen elektrischen Widerstand; grün bis gelb: Schluff bzw. Geschiebemergel mit mittleren spezifischen elektrischen Widerständen; dunkelblau außerhalb der Rinne: tertiäre Tone (Oberer Glimmerton, Hamburger Ton und ganz im Osten auch Unterer Glimmerton). Die Bohrung 3912/14 (Abb. 3) ist auf den Schnitt projiziert; sie liegt etwa 70 m südöstlich des Profils.

leiter gilt als gut geschützt, wenn die Versickerungszeit mehr als 10 Jahre beträgt (Hölting et al. 1995).

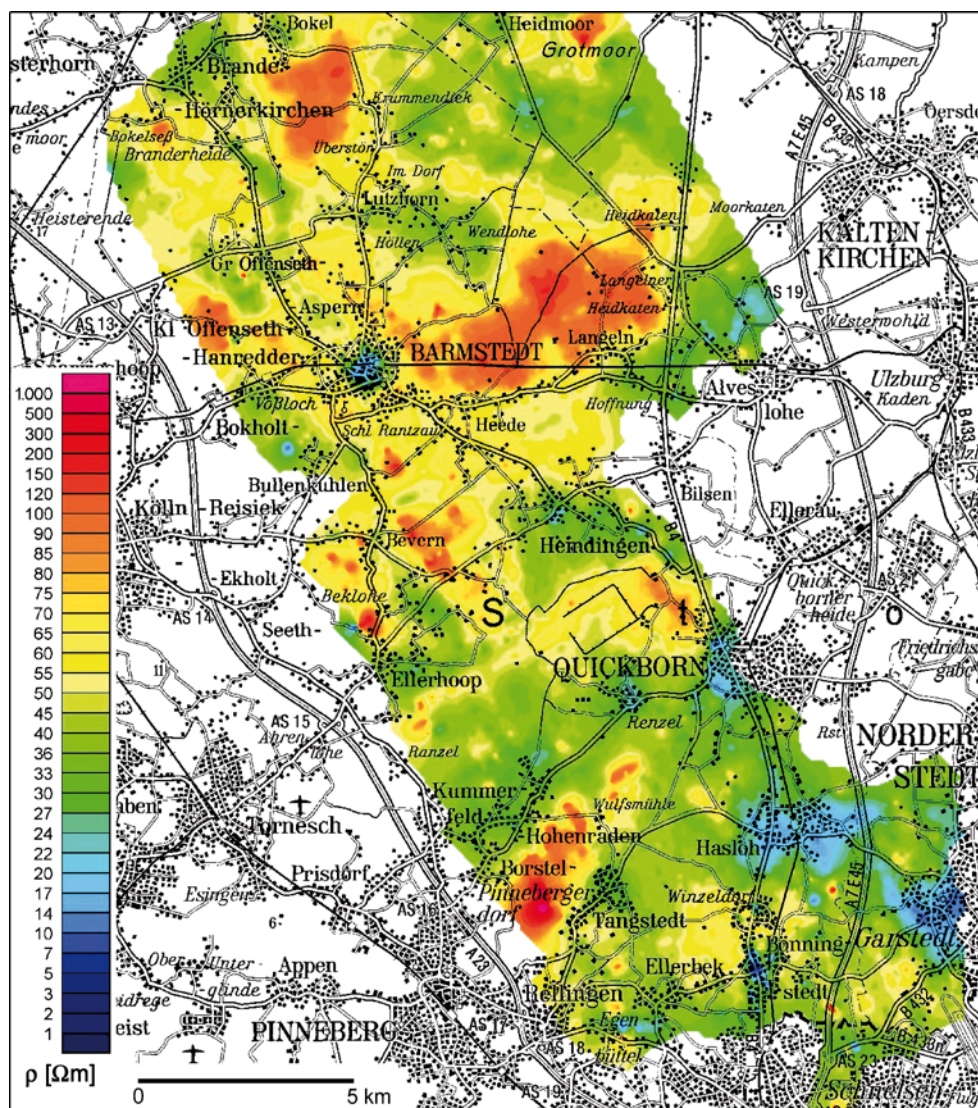
Die Versickerungszeit ergibt sich aus Mächtigkeit und hydraulischer Durchlässigkeit der Deckschichten. Hierbei sind insbesondere Schichten aus tonhaltigem Material aufgrund ihrer geringen hydraulischen Durchlässigkeit von Bedeutung. Geophysikalische Konzepte zur Charakterisierung der Grundwasserdeckschichten basieren daher meistens auf der Kartierung von tonhaltigen bzw. sandigen Bereichen innerhalb der Grundwasserdeckschichten.

Tonhaltige Materialien haben, im Vergleich zu tonfreien Sanden, einen geringeren spezifischen elektrischen Widerstand. Dabei kann es allerdings, wie bereits angeführt, zu Überlappungen der Widerstandswerte kommen. Trotzdem haben sich Widerstandsverfahren zur Kartierung der Verteilung tonhaltiger Ablagerungen in den Grundwasserdeckschichten bewährt (Kirsch 2006b). Für flächendeckende Messungen kommen insbesondere mobile Elek-

trodensysteme wie das Pulled Array Continuous Electrical Sounding – PACES (HydroGeophysics Group University of Århus, Sørensen et al. 2005) oder elektromagnetische Airborne-Systeme in Frage.

Aufgrund seiner hohen Fluggeschwindigkeit eignet sich das Hubschraubermesssystem der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Siemon 2006) gut für derartige schnelle Übersichtsmessungen. Die Messungen erfolgten im Bereich der Ellerbecker Rinne auf parallelen Fluglinien von 250 m Abstand, sodass eine flächenhafte Interpolation der gemessenen Widerstandswerte möglich ist (Siemon et al. 2006). In Abbildung 7 ist die so bestimmte Verteilung der spezifischen elektrischen Widerstände in einer Tiefe von 0 mNN dargestellt. Die Geländehöhen liegen in dem Gebiet zwischen 4 und 30 mNN. Die roten Bereiche mit hohen spezifischen Widerständen sind sandig ausgeprägt mit hoher hydraulischer Durchlässigkeit, während die grünen Bereiche Tonlagen mit geringen spezifischen

Abb. 7 Ergebnis einer Befliegung mit dem Hubschrauber-berelektromagnetik-System der BGR; dargestellt ist die Verteilung der spezifischen elektrischen Widerstände im Tiefenniveau von 0 mNN (die Geländehöhen in dem Gebiet liegen zwischen 4 und 30 mNN); es lassen sich sandige (rot) und tonhaltige (gelb-grün) Bereiche voneinander abgrenzen. Information zur Messtechnik: Aeroelektromagnetisches Messsystem der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover); das System der Fa. Fugro Airborne Surveys (Kanada) arbeitet mit 5 Frequenzen im Bereich von 0,38 bis 133 kHz. Bei einer Fluggeschwindigkeit von 140 km/h beträgt der Messpunktabstand 4 m.



Widerständen und geringer hydraulischer Durchlässigkeit anzeigen. Durch eine derartige Kartierung von tonigen und sandigen Bereichen ist zwar noch keine Quantifizierung der Versickerungszeit möglich, es lassen sich aber Bereiche mit hohem und mit geringerem Schutzpotenzial der Grundwasserdeckschichten voneinander abgrenzen.

Zusammenfassung

Im nordeuropäischen Tiefland entstanden während der Vereisungsphasen des Pleistozäns weit verbreitete, tiefe Rinnensysteme. Die überwiegend durch subglaziale Schmelzwässer ausgeräumten Hohlformen wurden später mit unterschiedlichen, oft gut permeablen Sedimenten wieder verfüllt und sind heute in der Landschaft nicht mehr zu erkennen. Durch ihre oft große räumliche Ausdehnung

können die Gesteine der eiszeitlichen Rinnen bedeutende, potenzial nutzbare Grundwasserspeicher darstellen.

Schichtgrenzen im Quartär und in tertiären Lockersedimenten lassen sich trotz relativ geringer Impedanzkontraste (Produkt aus seismischer Geschwindigkeit und Dichte) mit reflexionsseismischen Verfahren gut abbilden. In den reflexionsseismischen Profilen zeichnet sich der Querschnitt quartärer Rinnen als Unterbrechung der regulären Schichtung meistens klar ab, es lassen sich auch Schichten innerhalb der Rinne auflösen. Allerdings ist mit reflexionsseismischen Verfahren keine direkte Materialansprache möglich.

Diese kann mit Widerstandsverfahren erfolgen, da tonhaltiges Material einen geringeren spezifischen elektrischen Widerstand hat als Sande und Kiese. Es ergibt sich allerdings als Einschränkung der eindeutigen Materialansprache ein Überlappungsbereich der spezifischen elektrischen Widerstände von Feinsanden und Geschiebemergel mit geringem

Tongehalt. Beide Materialien weisen spezifische elektrische Widerstände im Bereich um die 60 Ω m auf.

Für die schnelle Kartierung von sandigen und tonigen Bereichen bieten sich hubschraubergestützte („airborne“) elektromagnetische Verfahren an. Verfahren im Frequenzbereich, wie sie von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe eingesetzt werden, liefern mit 140 km/h einen hohen Messfortschritt, sodass große Flächen abgedeckt werden können. Sie sind in ihrem Eindringvermögen allerdings beim derzeitigen Stand der Technik auf den oberflächennahen Untergrund bis etwa 100 m beschränkt. Die Frequenzbereichsverfahren eignen sich daher gut für Übersichtsmessungen, z. B. zur Bestimmung der Beschaffenheit der Grundwasserdeckschichten.

Transientelektromagnetische Verfahren können einen größeren Tiefenbereich abdecken. Mit dem SkyTEM-Verfahren lassen sich Eindringtiefen von bis zu 400 m erreichen, die Fluggeschwindigkeit ist aber auf 20–40 km/h beschränkt. Dieses Verfahren ist daher zur gezielten Messung, z. B. entlang vorhandener seismischer Profile oder zur Abdeckung kleinerer Flächen geeignet. Es konnte gezeigt werden, dass sich so innerhalb einer quartären Rinne sandige Bereiche (also der Grundwasserleiter) von tonigen Bereichen klar unterscheiden lassen.

Danksagung Wir danken dem Seismik-Messtrupp des Leibniz Instituts für Angewandte Geophysik für die Durchführung der Reflexionsseismischen Messungen, der Helikopter-Gruppe der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe sowie der SkyTEM Aps. und der KMN koopmann helicopter GmbH für die Durchführung der airborne Elektromagnetik Vermessungen und Anja Wolf (LANU) für GIS und graphische Arbeiten.

Das Projekt BurVal wurde teilfinanziert von der Europäischen Union im Rahmen des INTERREG IIIB Nordsee Programms (project ID 1-16-31-7-35-03).

Literatur

- Agster, G.: Untersuchungsprogramm zur Ermittlung des nutzbaren Grundwasserdargebotes im schleswig-holsteinischen Nachbarraum zu Hamburg (Südost-Holstein); Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, Flintbek (1996)
- BurVal Working Group: Groundwater resources in buried valleys – a challenge for geosciences. - 314 S.; Leibniz Institute for Applied Geosciences, Hannover (2006)
- Christiansen, A. V., Auken, E., Sørensen, K.: The transient electromagnetic method. - In: Kirsch, R. (Hrsg.): Groundwater geophysics, a tool for hydrogeology: 179–225; Springer, Heidelberg (2006)
- Ehlers, J.: Allgemeine und historische Quartärgeologie. - 358 S.; Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart (1994)
- Gabriel, G.: Gravity investigation of buried Pleistocene subglacial valleys. - Near Surface Geophysics **4**, 315–326 (2006)
- Gabriel, G., Kirsch, R., Siemon, B., Wiederhold, H.: Geophysical investigation of buried Pleistocene subglacial valleys in Northern Germany. - J. of Applied Geophysics **53**, 159–180 (2003)
- Günzel, F.: Geoelektrische Untersuchung von Grundwasserkontaminationen unter Berücksichtigung von Ton- und Wassergehalt auf die elektrische Leitfähigkeit des Untergrundes; PhD thesis Ludwig-Maximilians-Universität München (1994)
- Hölting, B., Coldewey, W. G.: Hydrogeologie. - 326 S.; Elsevier GmbH, München (2005)
- Hölting, B., Härtlé, T., Hohberger, K.-H., Nachtigall, K. H., Villinger, E., Weinzierl, W., Wrobel, J.-P.: Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. - Geologisches Jahrbuch **C63**, 5–24 (1995)
- Kirsch, R. (Hrsg.): Groundwater geophysics, a tool for hydrogeology. - 510 S.; Springer, Heidelberg (2006a)
- Kirsch, R.: Groundwater protection – vulnerability of aquifers. - In: Kirsch, R. (Hrsg.): Groundwater geophysics, a tool for hydrogeology: 459–471; Springer, Heidelberg (2006b)
- LANU (Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein): Endbericht zum Untersuchungsprogramm zur Ermittlung des nutzbaren Grundwasserdargebotes im schleswig-holsteinischen Nachbarraum zu Hamburg (Südwest-Holstein) – bearbeitet von Otto, R., Reum, R., Scheer, W., Angermann, H., Wolters, W.; Flintbek (2004)
- Morgan, N. A.: Physical properties of marine sediments as related to seismic velocities. - Geophysics **34**, 529–545 (1969)
- Poulsen, L. H., Christensen, N. B.: Hydrogeophysical mapping with the transient electromagnetic sounding method. - European J. of Environmental and Engineering Geophysics **3**, 201–220 (1999)
- Rabbel, W.: Seismic methods. - In: Kirsch, R. (Hrsg.): Groundwater geophysics, a tool for hydrogeology: 23–83; Springer, Heidelberg (2006)
- Schön, J. H.: Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics; Pergamon Press, New York (1996)
- Sen, P. N., Goode, P. A., Sibbit, A.: Electrical conduction in clay bearing sandstones at low and high salinities. - J. Appl. Phys. **63**, 4832–4840 (1988)
- Siemon, B.: Electromagnetic methods – frequency domain. - In: Kirsch, R. (Hrsg.): Groundwater geophysics, a tool for hydrogeology: 155–178; Springer, Heidelberg (2006)
- Siemon, B., Eberle, D., Rehli, H.-J., Voß, W., Pielawa, J.: Airborne geophysical investigation of buried valleys – survey area Ellerbeker Rinne, Germany, 2005/2006. - 148 S.; BGR Report, Hannover (2006)
- Sørensen, K., Auken, E.: SkyTEM – a new high-resolution helicopter transient electromagnetic system. - Exploration Geophysics **35**, 191–199 (2004)
- Sørensen, K. I., Auken, E., Christensen, N. B., Pellerin, L.: An integrated approach for hydrogeophysical investigations: new technologies and a case history. - In: Butler, D. K. (Hrsg.): Near-surface geophysics: 585–605; Society of Exploration Geophysicists, Tulsa (2005)
- Stackebrandt, W., Ludwig, A. O., Ostaficzuk, S.: Base of Quaternary deposits of the Baltic Sea depression and adjacent areas. - Brandenburgische Geowiss. Beitr. **1/2001**, 13–19 (2001)