

Einsatz der Aeroelektromagnetik zur geologischen Kartierung

Siemon, B.¹⁾, Jordan, H.²⁾, Sengpiel, K.-P.³⁾ und Voß, W.³⁾

- 1) Geophysik GGD, Hannover
jetzt: Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben, Hannover
- 2) Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover
- 3) Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Zusammenfassung

Im Rahmen eines von der BGR bearbeitete ein FuE-Vorhaben „Pilotstudie zu einer aerogeophysikalischen Landesaufnahme“ fanden 1999/2000 aerogeophysikalischen Messungen nordwestlich des Harzes im Messgebiet „Rhüden – Lutter a. B.“ statt. Das Messgebiet umfasst eine Fläche von etwa 200 km², von denen etwa die Hälfte eine bis zu 50 m mächtige Quartärbedeckung aufweist.

Auf Basis der AEM-Inversionsergebnisse lassen sich aufgrund ausreichender Widerstandskontraste verschiedener mesozoischer Schichten im Messgebiet die (Quartär-abgedeckte) Geologie mit den flach bis halbsteil einfallenden Schichten in den Horizontal- und Vertikalschnitten klar erkennen. Dabei treten besonders die harten Kalksteine des Unteren Muschelkalk und der Oberkreide sowie die Sandsteine der Unterkreide (Hilssandstein) durch hohe spezifische Widerstände ($\rho > 200 \Omega\text{m}$) und die weichen Tonsteine des Oberen Buntsandstein (Röt) und des Unteren Jura sowie die Mergelsteine des Mittleren Keuper und der Oberkreide (Coniac) durch niedrige spezifische Widerstände ($\rho < 20 \Omega\text{m}$) hervor. Aufgrund der Zuordnung der Gesteinsschichten zu den Modellschichten des spezifischen Widerstandes war es möglich, die durch mächtige Quartärablagerungen verhüllten Störungszonen zu kartieren.

1. Einleitung

Zu den wesentlichen Vorzügen der Aerogeophysik zählt vor allem die schnelle, großflächige und berührungslose Erkundung des Erduntergrundes mit simultan registrierenden Verfahren, wobei vorzugsweise die Methoden Elektromagnetik, Magnetik und Radiometrie zum Einsatz kommen. Zu den Haupteinsatzzielen zählte die Rohstofferkundung in oftmals schwer zugänglichen und meist dünn besiedelten Gebieten, wobei der Schwerpunkt der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) seit Ende der 80er Jahre in der Grundwassererkundung liegt (Sengpiel und Fluche, 1992; Sengpiel und Siemon, 1997).

Sowohl in der Messtechnik als auch in den Auswerteverfahren sind inzwischen Verbesserungen erzielt worden, die eine präzisere Erkundungen des Untergrundes gestatten und neue Anwendungsmöglichkeiten für die Aerogeophysik eröffnen, z. B. die Erkundung von Atlasten (Siemon, et al., 2000). Zur Demonstration weiterer Möglichkeiten führte die BGR ein Forschungsvorhaben „Pilotstudie zu einer detaillierten aerogeophysikalischen Landesaufnahme“ durch. Die Befliegungen fanden im Juli 1999 und im Mai/Juni 2000 in unterschiedlichen geologischen Regionen Niedersachsens statt.

Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse vor, die mit dem neuen aeroelektromagnetischen (AEM) Messsystem der BGR im nordwestlichen Harzvorland erzielt worden sind. In diesem etwa 200 km² großen Messgebiet sind die geologischen Verhältnisse i. a. gut erforscht; in Bereichen mit bis zu 50 m mächtigen Quartärbedeckung trifft dies jedoch nicht mehr zu. Daher zielte die Befliegung dieses Messgebiets neben der Demonstration der Anwendbarkeit der AEM-Methode zur geologischen Kartierung insbesondere auch auf den Nachweis des Verlaufs der den Harzblock begrenzenden Störungszonen ab, die für die Geologische Landesaufnahme im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung (NLFb) von Interesse sind.

2. Messgebiet

Als Testareal für eine geologisch-strukturelle Erkundung einer teilweise von Quartär bedeckten Region wurde das Gebiet „Rhüden – Lutter a. B.“ (ca. 200 km²) auf Vorschlag des NLFb ausgewählt. Es liegt nordwestlich des Harzes innerhalb eines durch die Städte Seesen, Goslar, Salzgitter und Bockenheim umgebenen Bereichs (Abb. 1), in dem die Städte Rhüden im westlichen und Lutter am Barenberge im östlichen Teil des Messgebiets als Namensgeber gewählt wurden.

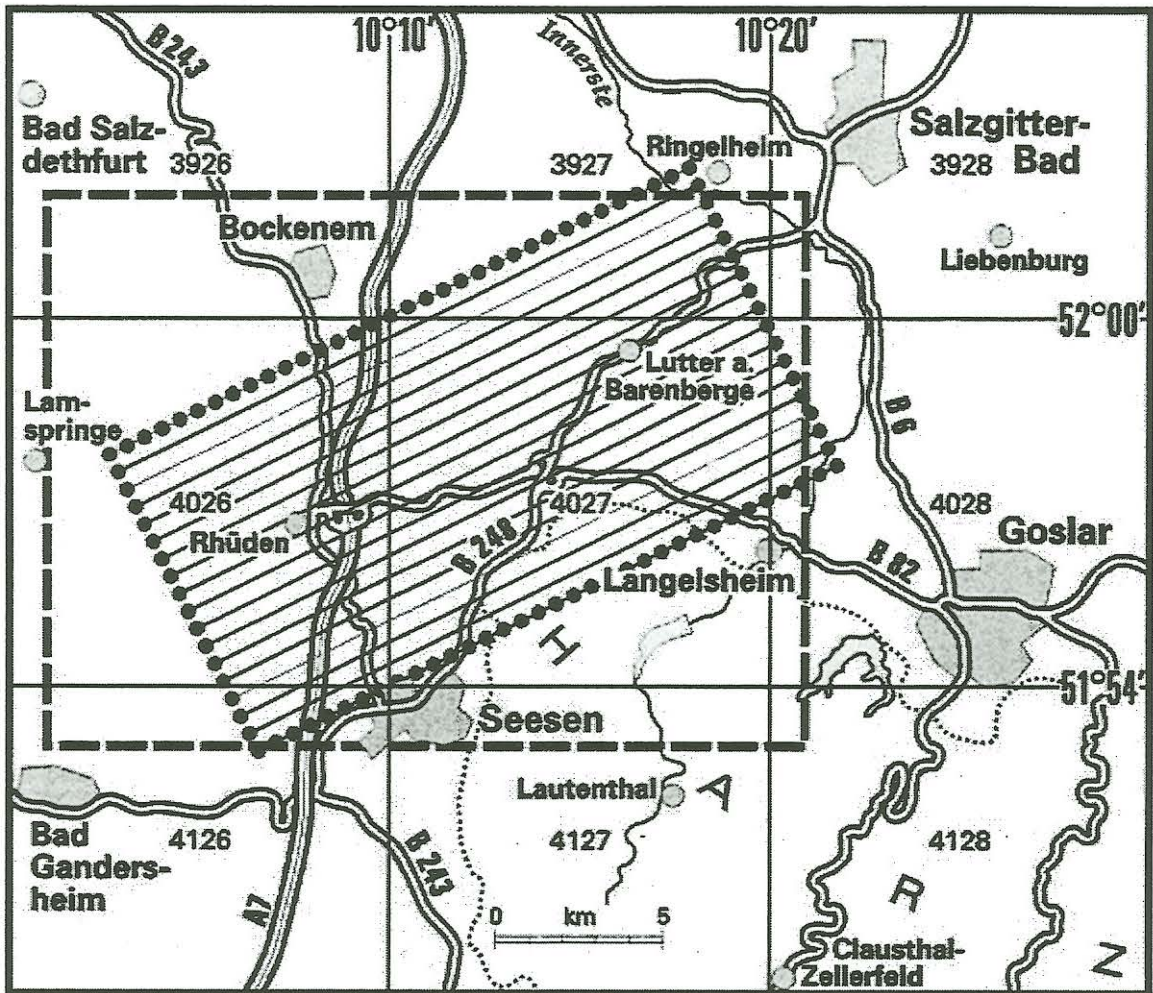


Abb. 1: Lage des Messgebiets „Rhüden – Lutter a. B.“ mit Kartenrahmen der Abb. 2 und 4.

Die Abb. 2 zeigt die Geologie im Messgebiet, die von der Nordwestecke des Harzes (Paläozoikum, zwischen Langelsheim und Seesen) sowie von den girlandenförmig gestalteten mesozoischen Schichten des Vorlandes geprägt ist. Zwei Faltenstrukturen sind klar zu erkennen: Der Rhüdenener Sattel im Westen und der Lutterer Sattel im Osten, beide mit einem Salzkissen im Kern. Unklar war bisher die tektonische Abgrenzung der Harz-Scholle. Ihren Westrand scheint eine vom Nettetal nachgebildete Bruchstörung zu markieren, die Harznordrandstörung scheint sich in die Nordflanke des Rhüdenener Sattels fortzusetzen. Verlauf und Ausbildung dieser Störungen sind durch mächtige Quartär-Sedimente überdeckt.

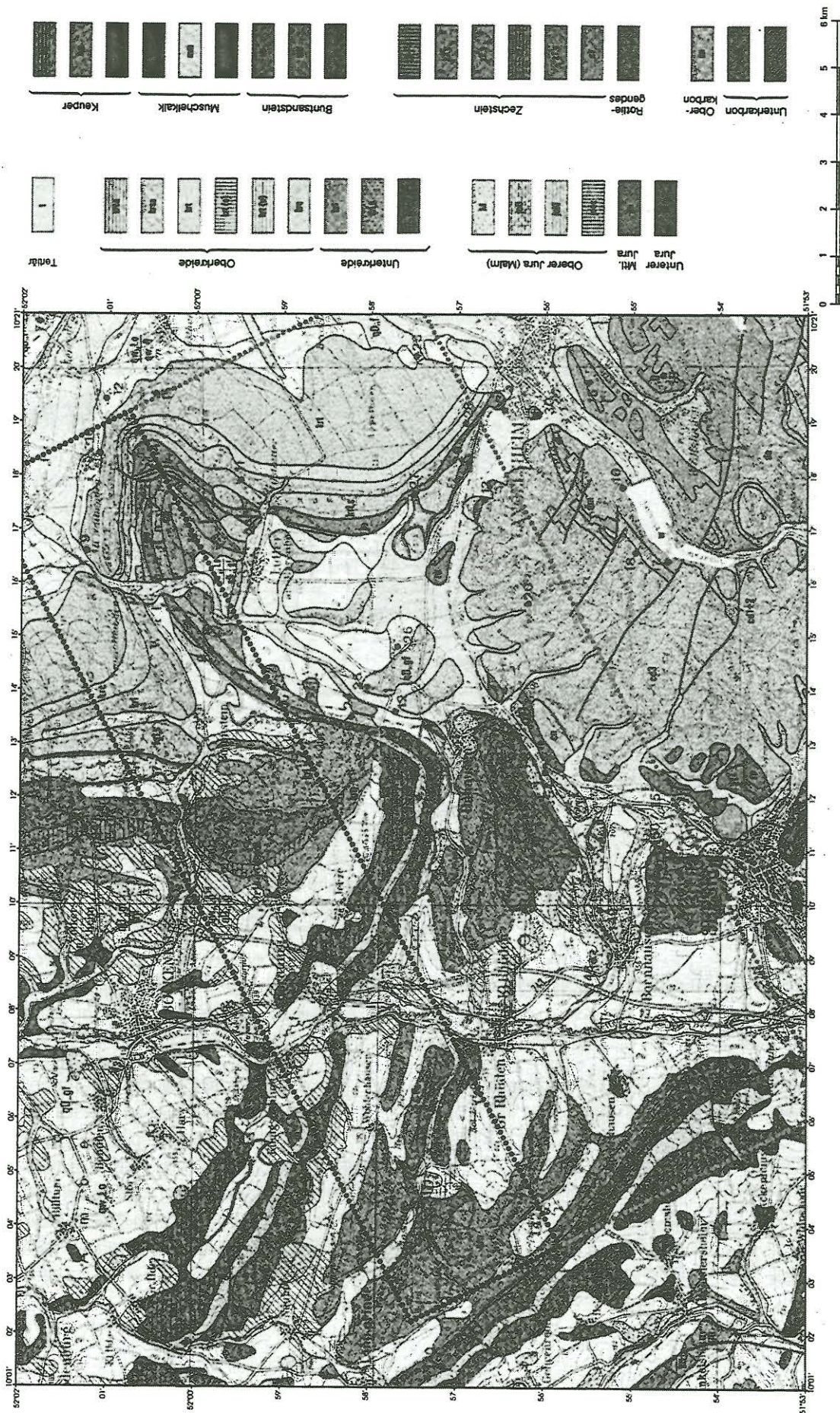


Abb. 2: Geologische Karte für das Messinggebiet „Rhüden – Lutter a. B.“, erstellt auf Grundlage der beiden Geologischen Wanderkarten Leinebergland (Jordan, 1989) und Braunschweiger Land (Look, 1984), die von J. Pielawa, BGR, zu einer gemeinsamen Karte für das Messinggebiet kombiniert wurden. Punktiert eingezeichnet sind die beflogenen Areale von 1999 (kleines Rechteck) und 2000 (Gesamtfläche).

3. Hubschauber-Messsystem der BGR

Das aerogeophysikalische Messsystem (Abb. 3) besteht aus einem Hubschrauber, einer Flugsonde und einer Bodenstation. Im Hubschrauber sind neben dem Gammastrahlenspektrometer die Navigationsinstrumente, die Höhenmesser, eine Videokamera sowie die analogen und digitalen Aufzeichnungsgeräte untergebracht. In der Bodenstation befinden sich die Referenzinstrumente zur Erfassung der variablen Anteile von Luftdruck, Magnetfeld und GPS. Das AEM-System, das Cäsium-Magnetometer, ein Laserhöhenmesser und das Positionierungssystem (GPS/ GLONASS) sind in der Flugsonde integriert, die 40 m unterhalb des Hubschraubers nachgeschleppt wird. Der Abstand der Flugsonde zum Erduntergrund beträgt im Mittel 30 – 40 m, die Geschwindigkeit liegt bei 100 – 160 km/h, was bei einer Aufzeichnungsrate von 10 Hz auf einen mittleren Messpunktabstand von 3 – 4 m führt. Das Messprinzip ist von Siemon und Sengpiel (1996), die prinzipiellen Neuerungen am AEM-System, das mit fünf Messfrequenzen arbeitet (Tab. 1), sind von Sengpiel (1996) beschrieben worden. Die Modifikationen fanden im Wesentlichen in den vergangenen drei Jahren im Rahmen eines Forschungsvorhabens der BGR zur aerogeophysikalischen Altlastenerkundung (Siemon et al., 2000) statt.

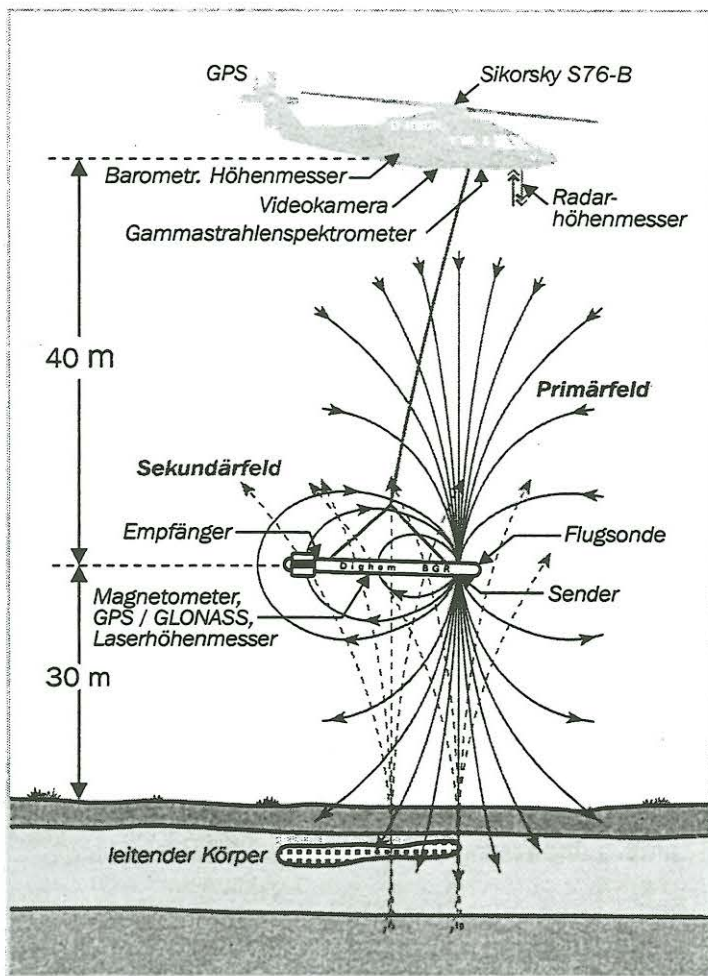


Abb. 3: Prinzipskizze des Hubschrauber-Messsystems der BGR.

Tabelle 1: Spulenparameter des AEM-Sensors der BGR mit fünf Frequenzen.

Parameter	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
Messfrequenz [Hz]	384	1831	8612	41 330	192 600
Spulenabstand [m]	6,87	6,73	6,59	6,68	6,64
Spulenkonfiguration	horizontal koplanare Rechteckspulen				

4. Datenerfassung und -verarbeitung

Die BGR führte im Messgebiet „Rhüden – Lutter a. B.“ zwei reguläre Messflüge im Juli 1999 und einen verkürzten Messflug im November 1999 durch. Die Fortführung der Befliegung musste aufgrund der Nichtverfügbarkeit des BGR-Piloten in 1999 ausgesetzt werden. Im Juni 2000 wurde daher das gesamte Messgebiet nochmals befliegen. Hierzu waren sieben Messflüge notwendig.

Die Bearbeitung der AEM-Daten begann mit der Transformation der gemessenen Spannungswerte in mV für die Inphase- und Quadrature-Komponenten (R, Q) zu den fünf Messfrequenzen (siehe Tab. 1) in die in ppm-skalierten Werte des relativen sekundären Magnetfeldes. Diese ppm-Werte sind anschließend für jede einzelne Messfrequenz in die Parameter eines homogenen Halbraums (Siemon, 1996) und auf Basis aller verfügbarer Messfrequenzen in die Parameter eines geschichteten Halbraums (Siemon und Sengpiel, 1997) invertiert worden. Dieses Verfahren erwies sich auch in Regionen mit komplizierter aufgebauten Erduntergrund als sehr praktikabel (Sengpiel und Siemon, 1998).

Eine Nachbearbeitung der Daten aus 1999 war notwendig, da die während des Fluges mehrmals durchgeführte Kalibrierung des AEM-Sensor bei der höchsten Messfrequenz ($f_5 = 192\ 600$ Hz) aus bisher nicht genau bekannten Ursachen verfälscht wurde. Folglich ergaben sich falsche Amplituden für die Inphase- und Quadrature-Komponente. Für die Auswertung der Daten aus 2000 konnte auf Kalibrierfaktoren zurückgegriffen werden, die bei der Überfliegung von Meerwasser gewonnen wurden. Aufgrund von Temperatureffekten, die das in großer Höhe bestimmte Nullniveau (Referenzspannung ohne Sekundärfeldeinfluss) gegenüber dem in der (wärmeren) Messflughöhe veränderte (Siemon, 1999), konnten die Daten der höchsten Messfrequenz nur bedingt für die Auswertung herangezogen werden. Während die Transformation in scheinbare spezifische Widerstände noch zu brauchbaren Ergebnissen führte, traf dies nicht mehr für die Mehrfrequenzinversion zu, so dass bei dieser auf die Verwendung der Daten der höchsten Messfrequenz verzichtet wurde. Bei diesen 1D-Inversionen mit vier Frequenzen wurde für alle Messprofile ein einheitlicher Startmodelltyp verwendet, welcher, basierend auf den $\rho_a(z_p)$ -Vertikalsektionen des scheinbaren spezifischen Widerstandes (Sengpiel und Siemon, 2000), aus vier horizontalen Schichten aufgebaut war. Die Abbruchschranke für die iterative Anpassung der Modell- an die Felddaten lag bei 10%.

5. Darstellung der Inversionsergebnisse

Die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit bzw. deren Kehrwert, dem spezifischen Widerstand, im Messgebiet wird in Form von Farb- bzw. Graustufenkarten und -schnitten präsentiert. In den Übersichtskarten ist der Parameter scheinbarer spezifischer Widerstand (ρ_a) als Konturplot für jeweils eine Messfrequenz, z. B. für $f_3 = 8600$ Hz (Abb. 4), sowie der Verlauf der Fluglinien (51 Mess- und 13 Kontrollprofile) dargestellt. Die mittleren Tiefen liegen für diese Frequenz je nach Leitfähigkeit des Untergrundes bei etwa 10 – 60 m.

Die Vertikalschnitte längs eines Messprofils zeigen die 1D-Inversionsmodelle des spezifischen Widerstandes, z. B. für Profil 3.1 (Abb. 5). Die Profile sind jeweils um $61,5^\circ$ gegenüber N gedreht (WSW-ENE-Profile) und haben eine Länge von 22 km. Aus der Zeitachse unterhalb der Grafik (jeweils 10 s Markierungen) ist zu entnehmen, dass für das Abfliegen des Profils nur etwas mehr als 10 Minuten benötigt wurden. Von den etwa 6000 Messpunkten pro Fluglinie ist jeder zweite für Inversion herangezogen worden. Die Graustufensäulen, die die Inversionsmodelle charakterisieren, werden bezüglich der Geländehöhe in m NN nebeneinander aufgetragen. Die Zuordnung der Graustufen ist aus nebenstehendem Keil zu entnehmen. Modelloberkante ist jeweils das durch die Topographie vorgegebene Niveau. Dieses ergibt sich aus der Höhe des EM-Sensors (schwarze Linie) in m NN, berechnet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der mittleren effektiven Kabellänge, minus der vom EM-Sensor aus mit einem Laserhöhenmesser erfassten Höhe über Grund. Über Waldgebieten wird der Laserstrahl auch an Baumkronen oder -ästen reflektiert, so dass in diesen Bereichen eine ausgefranste Topographie erscheint. Folglich tritt der Wald in der Inversion als eine extrem schlechtleitende Deckschicht ($\rho > 2000 \Omega\text{m}$) auf. Die unterste Schicht (Substratum) ist jeweils ein homogener Halbraum, der durch eine Farbschicht mit willkürlich gewählter Mächtigkeit wiedergegeben wird.

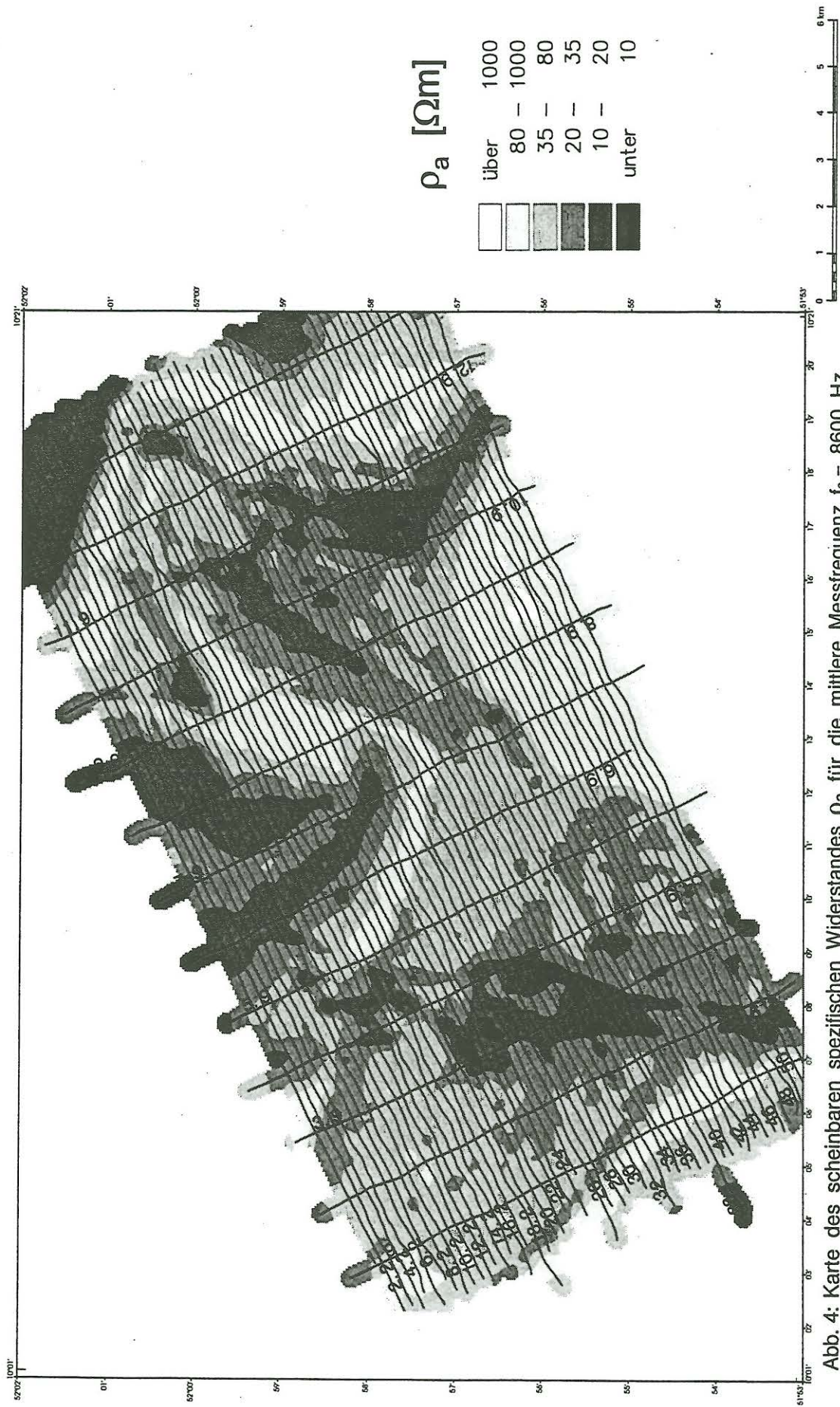


Abb. 4: Karte des scheinbaren spezifischen Widerstandes ρ_a für die mittlere Messfrequenz $f_3 = 8600$ Hz, abgeleitet aus den im Juni 2000 gewonnenen Datensatz (vgl. Abb. 2).

Aus den 1D-Inversionsmodellen lassen sich ρ/z -Karten herstellen, die die spezifischen Widerstände einer Modellschicht in Farbe bzw. Graustufen repräsentieren, denen die zugehörige Schichtmächtigkeit (in m) oder die Lage einer Schichtgrenze (in m NN) als Isolinienplan überlagert ist (vgl. Abb. 7). Diese Karten geben die Widerstandsverteilung im Erduntergrund markanter wieder als die entsprechenden ρ_a -Karten.

6. Zuordnung der Inversionsergebnisse zur Geologie

Die Zuordnung der AEM-Ergebnisse zur Geologie erfolgte zunächst anhand der Karten des scheinbaren spezifischen Widerstandes (ρ_a -Karten) für die fünf Messfrequenzen, die mit abnehmender Frequenz größere Tiefen erschließen. Die ρ_a -Karten für die mittleren Frequenzen (vierte bis zweite) sehen recht ähnlich aus. Daher ist es ausreichend, die ρ_a -Karte für die dritte Frequenz zu betrachten (Abb. 4). In ihr sind viele Feinstrukturen zu erkennen, insbesondere dann, wenn diese senkrecht zu den Profilen verlaufen, die sich gut mit der Quartär-abgedeckten Geologie korrelieren lassen. So kann im Westen die Untergliederung im Muschelkalk und Buntsandstein und im Osten die der Kreide in den ρ_a -Karten beobachtet werden, die mit der Gesteinshärte bzw. mit dem Tongehalt in Zusammenhang steht.

Die genauere Zuordnung der spezifischen Widerstände zur Geologie erfolgte auf Basis der 1D-Inversionsergebnisse. In die Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes wurden zunächst die bekannten lithologischen Strukturen eingetragen, wie z. B. in Profil 3.1 am Nordrand des Messgebiets (vgl. Abb. 5). Es zeigte sich, dass eine Zuordnung dieser Strukturen zu den spezifischen Widerständen möglich war (Abb. 6) und somit die meist schräg einfallenden Schichten bis in 50 – 100 m Tiefe in den Vertikalschnitten verfolgt werden konnten. Dabei treten besonders die harten Kalksteine des Unteren Muschelkalk und der Oberkreide sowie die Sandsteine der Unterkreide (Hilssandstein) durch hohe spezifische Widerstände ($\rho > 200 \Omega\text{m}$) und die weichen Tonsteine des Oberen Buntsandstein (Röt) und des Unteren Jura sowie die Mergelsteine des Mittleren und Unteren Keuper und der Oberkreide (Coniac) durch niedrige spezifische Widerstände ($\rho < 20 \Omega\text{m}$) hervor. Liegen große Widerstandskontraste vor, wie beispielsweise zwischen den Tonsteinen des unteren Jura ($\rho < 15 \Omega\text{m}$) und den Sandsteinen der Unterkreide (Hilssandstein $\rho > 200 \Omega\text{m}$), so läßt sich diese lithologischen Schichtgrenze von der Erdoberfläche bis in große Tiefen in den Vertikalschnitten des spezifischen Widerstandes klar verfolgen (z. B. in Abb. 5 bei Profil-km 14). Natürlich zeichnen sich schräg einfallende lithologische Schichten in den 1D-Inversionsmodellen normalerweise mit zunehmender Tiefe in verschiedenen Modellschichten ab (Sengpiel und Siemon, 2000), so dass der Verlauf der lithologischen Schichten in den Vertikalschnitten stufenförmig erscheint (z. B. in Abb. 5 bei Profil-km 16).

Anhand der Karten und Schnitte und unter Berücksichtigung der in Abb. 6 zusammengetragenen Erkenntnisse war es möglich, nicht nur die Verbreitung der mesozoischen Schichten unter Quartärbedeckung zu kartieren, sondern auch die im Messgebiet vorhandenen Störungszonen nachzuzeichnen. Von besonderem Interesse ist hierbei die Nettetal-Störung, die den Harzblock nach Westen begrenzt und deren Verlauf bisher nur vermutet werden konnte, da sie vollständig vom Quartär überdeckt ist. Diese Störungszone erwies sich als komplex gebauter Grabenbruch unter 20 – 50 m mächtigen Kiessanden (Abb. 7).

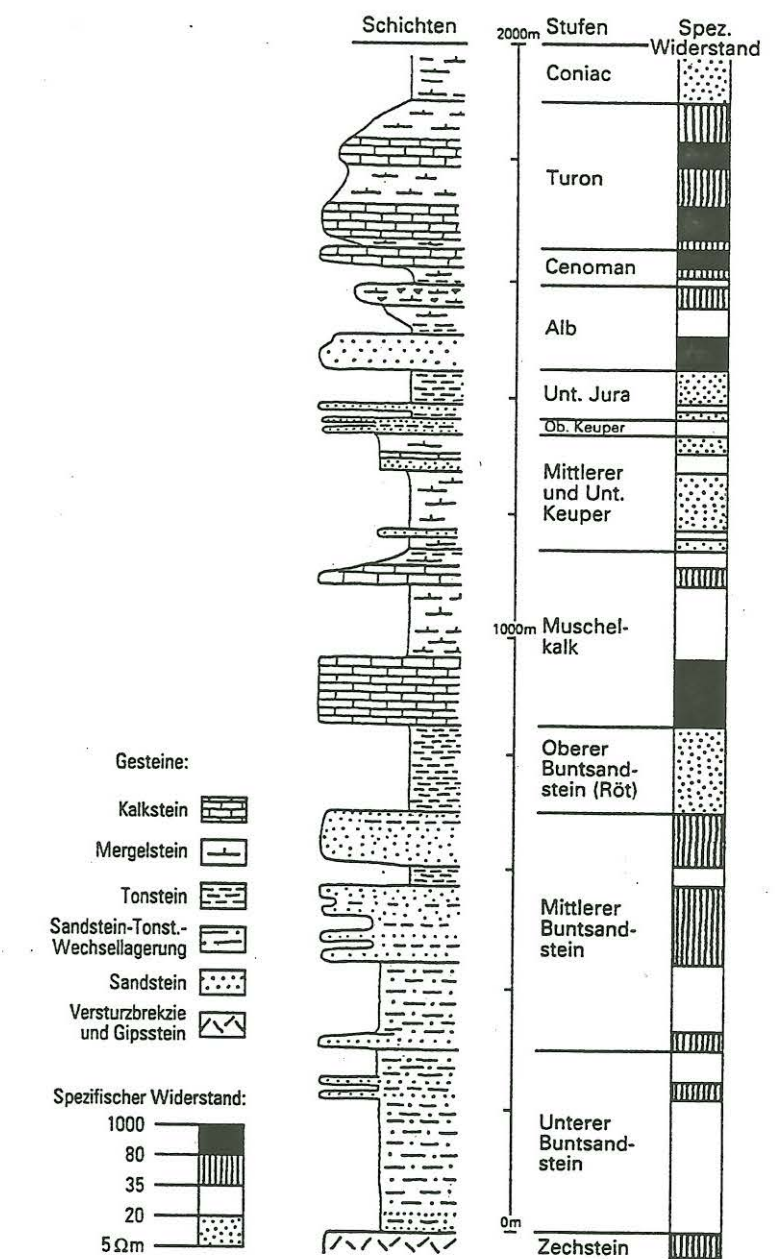
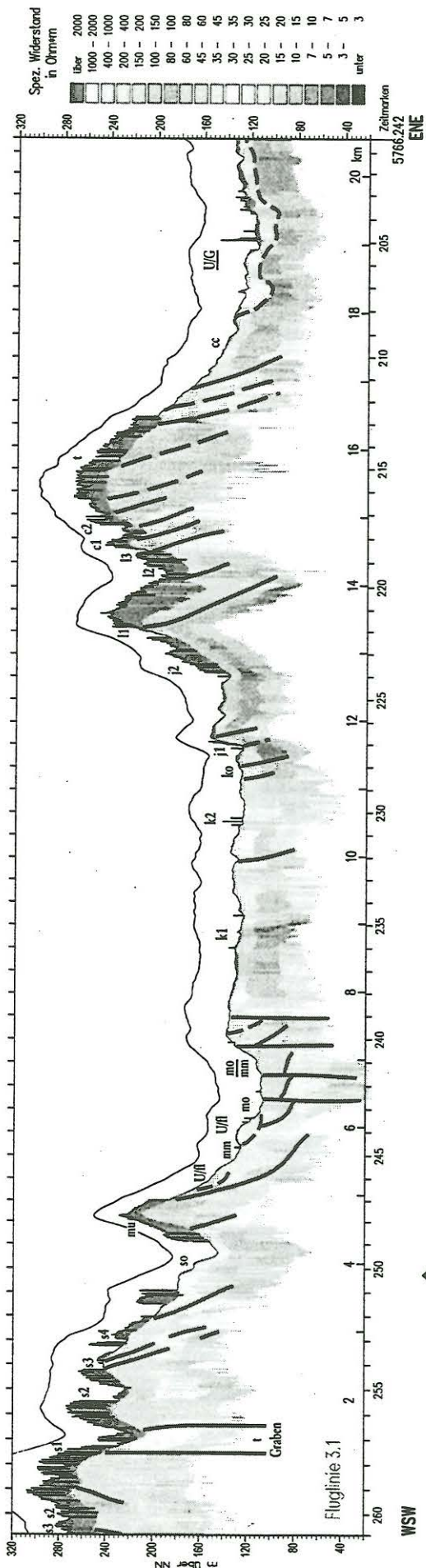


Abb. 6: Gegenüberstellung der mesozoischen Schichten im Messgebiet „Rhüden – Lutter a. B.“ und der aus den AEM-Daten abgeleiteten spezifischen Widerstände.

◀ Abb. 5: Vertikalsektion des spezifischen Widerstandes für Profil 3.1, das im Juli 1999 beflogen wurde, mit der geologischen Zuordnung der Schichtenabfolge. An jeden Messpunkt wurden aus den AEM-Daten der vier verwendeten Frequenzen f_{1-4} (vgl. Tab. 1) die 1D-Inversionsmodelle mit vier Schichten berechnet und bezüglich der Topographie nebeneinandergestellt.

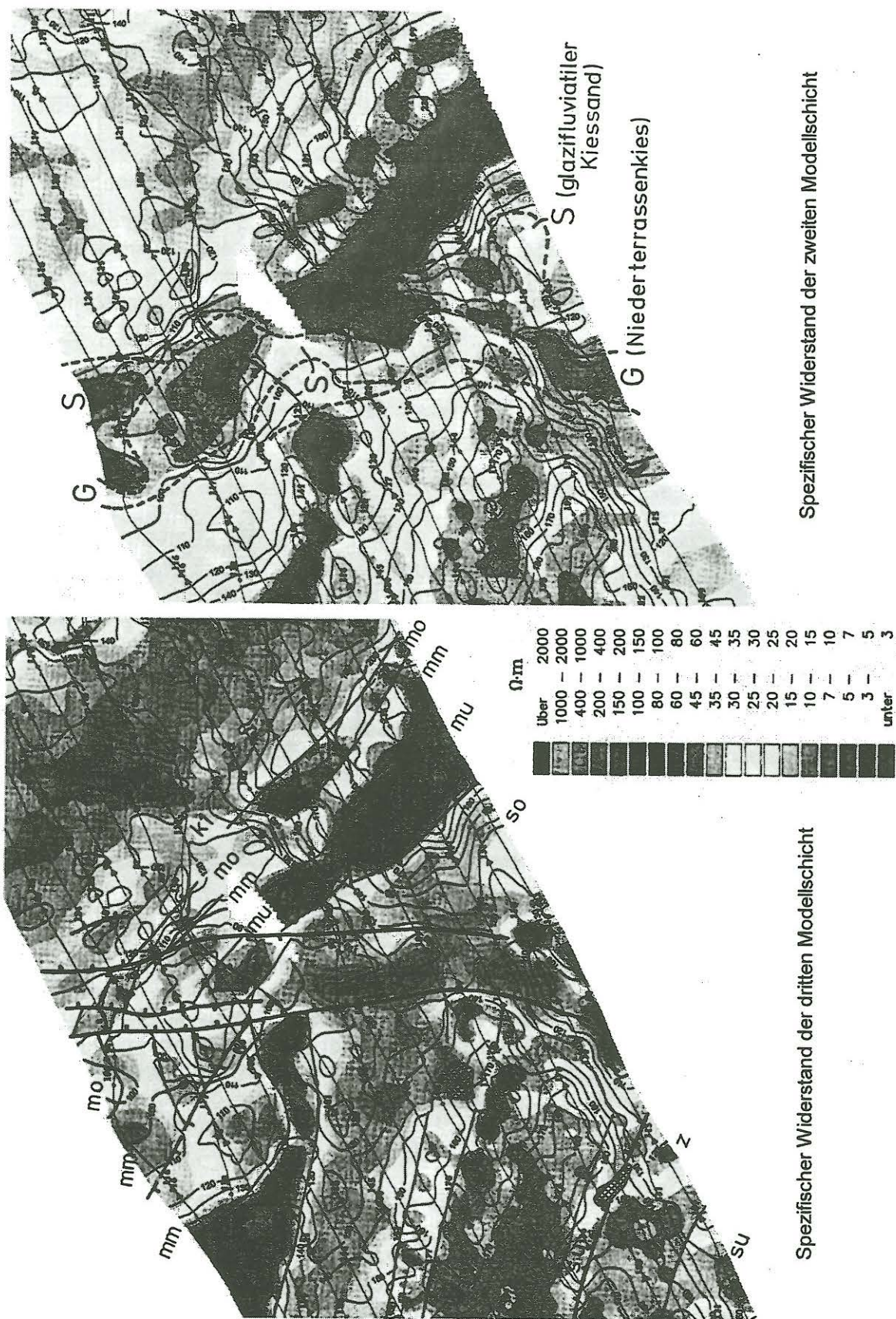


Abb. 7: Ausschnitte aus den ρ/z -Karten für die zweite und dritte Modellschicht im Bereich der Nettetal-Störung, die den Verlauf dieser Störungszone dokumentieren. Dargestellt sind die spezifischen Widerstände der jeweiligen Schicht (Graustufen) und die dazwischenliegende Schichtgrenze (Isolinien) sowie die geologischen Signaturen. Als Basis dienten die in 1999 gewonnenen Daten.

Literatur

- Jordan, H., 1979. Geologische Wanderkarte – Leinebergland. Hrsg.: Verkehrsverein Leinebergland und Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover, 2. Aufl. 1989.
- Look, E., 1984. Geologische Wanderkarte - Braunschweiger Land. Hrsg.: Stadt Königslutter, Naturhistorische Gesellschaft Hannover und Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover.
- Sengpiel, K.-P., 1996. Neue Konzepte bei der Entwicklung einer EM-Flugsonde der BGR für fünf Frequenzen. In: Bahr, K. und Junge, A. (Hrsg.): Protokoll Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Burg Ludwigstein.
- Sengpiel, K.-P. und Fluche, B., 1992. Application of airborne electromagnetics to groundwater exploration in Pakistan. Z. dt. geol. Ges., 143, 254-261.
- Sengpiel, K.-P. und Siemon, B., 1997. Hubschrauberelektromagnetik zur Grundwassererkundung in der Namib-Wüste / Namibia. Z. angew. Geol., 44, 3, 130-136.
- Sengpiel, K.-P. und Siemon, B., 1998. Examples of 1-D inversion of multifrequency AEM data from 3-D resistivity distributions. Exploration Geophysics, 29, 133-141.
- Sengpiel, K.-P. und Siemon, B., 2000: Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration. Geophysics (pub. online 19.07.2000).
- Siemon, B. 1996. Neue Verfahren zur Berechnung von scheinbaren spezifischen Widerständen und Schwerpunktstiefen in der Hubschrauberelektromagnetik. In: Bahr, K. und Junge, A. (Hrsg.): Protokoll Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Burg Ludwigstein, 89–100.
- Siemon, B., 1999. Pilotstudie zu einer aerogeophysikalischen Landesaufnahme – Auswertung eines Testfluges. Bericht der Geophysik GGD, Hannover.
- Siemon, B. und Sengpiel, K.-P., 1997. Optimierung der Meß- und Auswertetechniken der Hubschrauber-geophysik zur Erkundung von Altlasten. Protokollband zum 4. DGG-Seminar „Umweltgeophysik“, Neustadt/Weinstraße.
- Siemon, B., Stuntebeck, C., Sengpiel, K.-P., Röttger, B, und Rehli, H.-J., 2000. Was bringt eine aerogeophysikalische Altlastenerkundung mit dem Hubschrauber-Messsystem der BGR ? Protokollband zum 6. DGG-Seminar „Umweltgeophysik“, Neustadt/Weinstraße (im Druck).