

Altlastenerkundung unter Einsatz von Radiomagnetotellurik, Induzierter Polarisation und Bohrprobenuntersuchungen

S. Recher, M. Hönig, B. Tezkan, F.M. Neubauer

Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität zu Köln,
 Albertus-Magnus-Platz, D-50923 Köln
 Sonderforschungsbereich 419



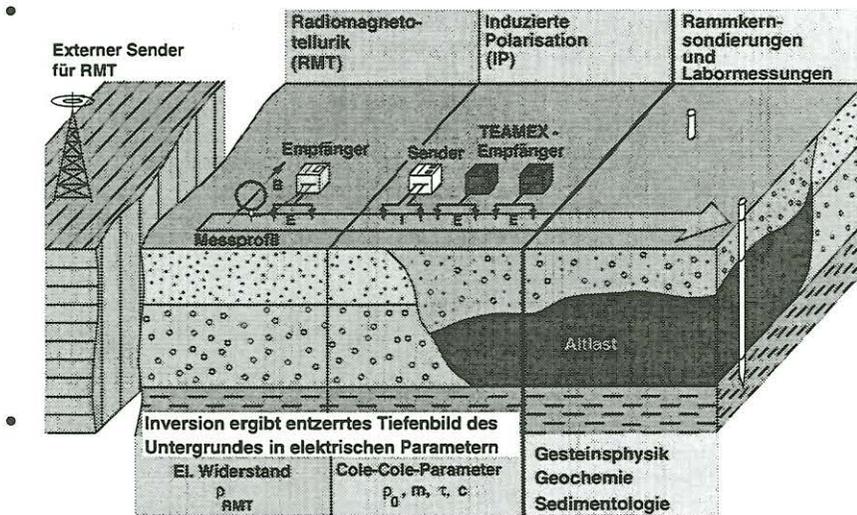
Einführung

Im Sonderforschungsbereich 419 werden die Umweltprobleme eines industriellen Ballungsraumes am Beispiel von Nordrhein-Westfalen untersucht. Auf der Basis von naturwissenschaftlichen und medizinischen Analysen, Simulationen und Prognosen werden unter Berücksichtigung von sozialen, ökonomischen und rechtlichen Aspekten Lösungsansätze zur Verbesserung der Lebensqualität erarbeitet, die nach Möglichkeit auch auf andere Ballungszentren anwendbar sind.

Naturwissenschaftliche Arbeiten sollen zum einen den derzeitigen Stand der Schadstoffbelastungen von Luft, Grundwasser und Böden aufzeigen, zum anderen mit Simulationen Aussagen zum zukünftigen Status machen können.

Teilprojekt A1: Schematische Darstellung

- Zielsetzung: Zerstörungsfreie Sondierung und Kartierung von Altlasten und Altstandorten nach dem Material des Untergrundes mit elektromagnetischen Verfahren



- Zusammenhang zwischen elektrischen Parametern und Charakteristika des Untergrundmaterials durch Cluster- und Korrelationsanalyse

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte im Teilprojekt A1-SFB 419

Das Teilprojekt A1 beschäftigt sich mit der Lokalisierung von Altstandorten, wie zum Beispiel Deponien für Hausmüll, Industrieabfälle oder Bauschutt. Dazu soll mit elektrischen und elektromagnetischen Verfahren nicht nur die laterale wie vertikale Struktur der

Deponien erkundet werden, sondern nach Möglichkeit soll auch deren meist heterogener Aufbau analysiert werden.

Die Erkundung der Deponien erfolgt dabei in drei Schritten. Zunächst wird mit der Radiomagnetotellurik (RMT)-Methode die Deponie mittels elektromagnetischer Sondierung untersucht. Diese Methode hat sich in der Deponieerkundung bereits bewährt [Tezkan(1996), Zacher(1996)]. Die Datenauswertung der RMT-Messungen zeigt ein Bild der Verteilung des spezifischen Widerstands im Untergrund und liefert einen ersten Überblick über die laterale und vertikale Erstreckung des Deponiekörpers.

In einem zweiten Schritt wird die Deponie mit Induzierter Polarisation (IP) vermessen. Unter Verwendung des Cole-Cole-Modells bei der Auswertung der IP-Daten erhält man nicht nur ein Bild der Widerstandsverteilung des Untergrunds sondern auch Bilder zu weiteren physikalischen Parametern. Diese Parameter sind materialspezifisch und bieten daher die Möglichkeit die Deponieinhaltsstoffe zu charakterisieren.

Um die Ergebnisse der RMT- und IP-Auswertungen zu überprüfen und zu kalibrieren, werden an einigen ausgesuchten Lokationen auf und um die Deponie herum Rammkernsondierungen durchgeführt. Die daraus gewonnenen Bodenproben werden im Labor auf die sedimentologischen, geochemischen und physikalischen Eigenschaften hin untersucht. Dabei wird insbesondere die Art der Frequenzabhängigkeit der Leitfähigkeit im niederfrequenten Bereich des IP-Effektes und im RMT-Frequenzbereich geklärt, um sie anschließend bei der Modellierung von elektromagnetischen Daten berücksichtigen zu können. Die drei Arbeitsschritte sind in der Abbildung 1 nochmals zusammengefasst.

Meßgebiet

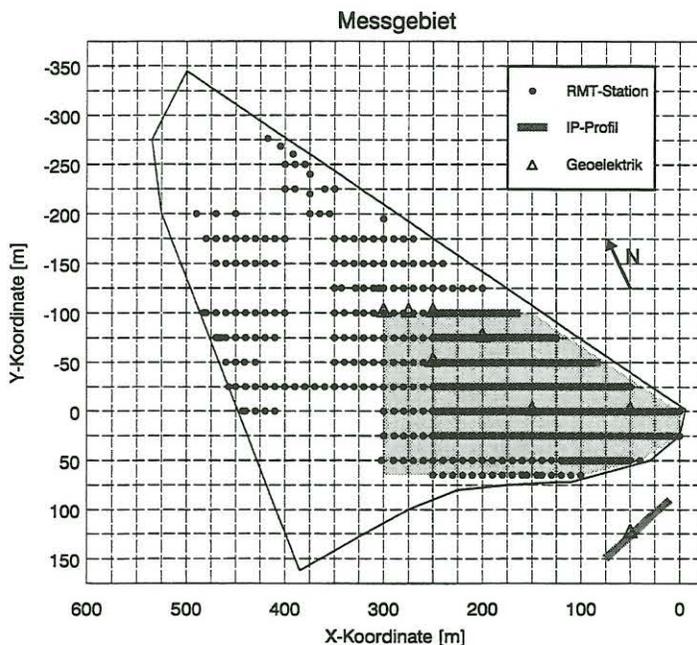


Abbildung 2: IP und RMT Meßlokationen. Die durchgezogene Linie kennzeichnet das Untersuchungsgebiet. Die hellgrau unterlegte Fläche kennzeichnet das Meßgebiet, auf dem sich im weiteren RMT, IP und Bohrungen konzentrieren.

Als erstes Untersuchungsgebiet ist eine Altablagerung im Kölner Stadtgebiet ausgewählt worden. Es handelt sich um eine ehemalige Kiesgrube, die bereits während der Auskiesungsphase mit Straßenaushub, Haus- und Sperrmüll und Industrieabfällen verfüllt worden ist. Da es weder Grubenrand- noch Grundwasserabdichtungen bei dieser Deponie gibt, bietet sich die Möglichkeit, auch Bohrproben bis unter die Deponieunterkante gewinnen zu können. In Längs- und Querrichtung erstreckt sich das Untersuchungsgebiet

über eine Fläche von ca. 650m × 400m. Aufgrund von meterhohen Erdwällen um die Deponie herum sowie zum Teil sehr starkem Bewuchs konnte nur ein Teil der Deponiekante bzw. der Deponiefläche geophysikalisch erkundet werden. Die Abbildung 2 zeigt die Überdeckung der Deponie mit RMT- (●) und IP-Profilen (—) und die Stellen zusätzlicher Schlumberger-Geoelektrik-Sondierungen (△).

Radiomagnetotellurik

Das Messverfahren zu Radiomagnetotellurik ist analog zur klassischen Magnetotellurik. Als Quellen der elektromagnetischen Felder werden jedoch künstliche Radiosender im Frequenzbereich von einigen kHz bis maximal 1MHz benutzt. Bei der Messung wird das elektrische Feld in Senderrichtung und senkrecht dazu das magnetische Feld bestimmt (mit dem hier verwendeten Messgerät ist es - im Gegensatz zur Magnetotellurik - nur möglich die Nebendiagonalelemente des Impedanztensors zu bestimmen.). Mit der jeweiligen Messfrequenz erhält man damit die Messparameter für den scheinbaren Widerstand und die Phase. Da diese Parameter für mehrere Frequenzen an einer Stelle gemessen werden, ist eine Aussage über die Widerstandsverteilung des Untergrunds mit der Tiefe möglich.

Um ein- und zweidimensionale Widerstandsmodelle des Untergrundes zu bekommen, werden die scheinbaren Widerstände und Phasen entlang eines Messprofils mit Hilfe von Inversionsprogrammen aus der Magnetotellurik ausgewertet.

Auf der hier vorgestellten Deponie sind 320 RMT-Sondierungen durchgeführt worden. An jeder Station wurden zu acht Frequenzen (wobei je zwei Frequenzen ein Paar bilden, deren Sender nahezu senkrecht aufeinander stehen) zwischen 16.0 kHz und 234.0 kHz scheinbare Widerstände und Phasen bestimmt. Die Interpolation eines Messparameters

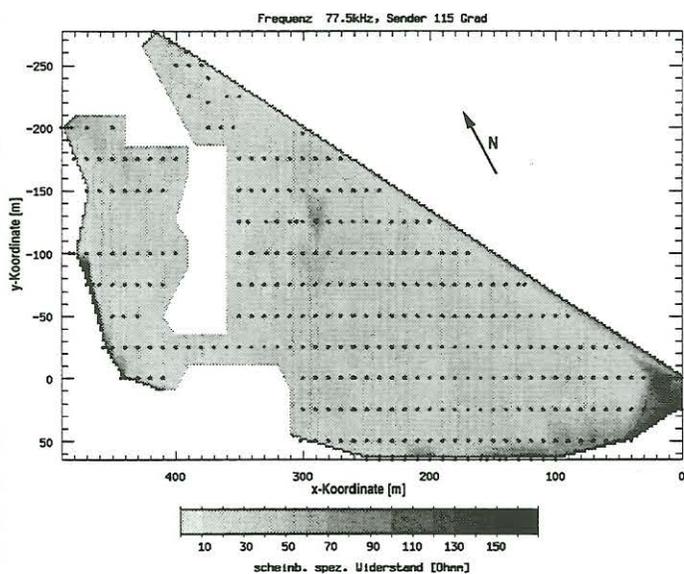


Abbildung 3: Flächenhafte Darstellung des scheinbaren Widerstands für die Frequenz 77.5 kHz

zwischen allen Stationen für eine bestimmte Frequenz ergibt eine Karte des scheinbaren Widerstands bzw. der Phase für das gesamte Messgebiet. In der Abbildung 3 ist die Verteilung des scheinbaren Widerstands für die Frequenz 77.5 kHz dargestellt. Im südöstlichen Messbereich kann man beim Übergang von hohen Widerstandswerten zu relativ niedrigen Werten die Deponiekante verfolgen. Aus den bereits erwähnten Gründen ist die Kante nur an wenigen Stellen in den Widerstands- und Phasenwerten sichtbar.

Für die IP-Messungen ist nach der RMT-Kampagne ein kleiner Bereich vom Untersuchungsgebiet ausgewählt worden. Wegen der besseren Zugänglichkeit und auch der Möglichkeit, über die Deponiegrenze hinweg messen zu können, ist dazu der südöstliche Bereich (insgesamt 350m x 150m) der gesamten Meßfläche ausgesucht worden. Fig. 4 und 5 zeigen für dieses ausgewählte Gebiet noch einmal die flächenhafte Verteilung des scheinbaren Widerstandes und der dazugehörigen Phase für die Frequenz 207kHz. Die leichte Variation des scheinbaren Widerstands im Bereich der Deponie deutet auf die Inhomogenität des Mülls oder auch auf variierende Mächtigkeiten von Deckschicht und Müllkörper hin. Diese Variation macht sich besonders deutlich in den Widerstandswerten für die höheren Frequenzen, da wegen steigender Messfrequenz die Eindringtiefe der elektromagnetischen Welle geringer wird und Bodenschichten unmittelbar unter der Geländeoberkante an Bedeutung gewinnen, insbesondere die Deckschicht der Deponie. Dies kann man in Abbildung 4 im Vergleich zur Abbildung 3 erkennen. Die Phasen der Stationen auf der Deponie zeigen den für die Deponie erwarteten Wert über der 45°-Marke (Stellt man sich einen 2-Schichtfall vor mit einer schlecht leitenden Deckschicht (Deponieabdeckung) über einem gut leitenden Halbraum (Deponiematerial), so liegen die Phasen über 45°).

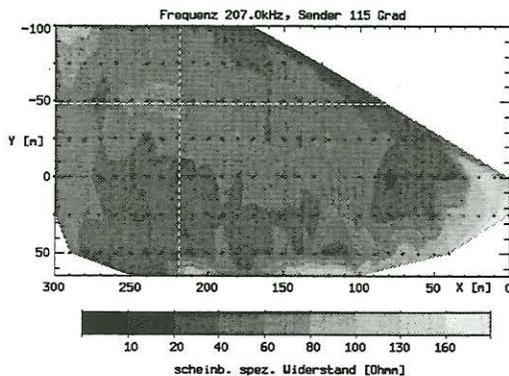


Abbildung 4: Flächenhafte Darstellung des scheinbaren Widerstands für die Frequenz 207.0 kHz (Ausschnitt aus dem gesamten Messgebiet, siehe Abb. 2).

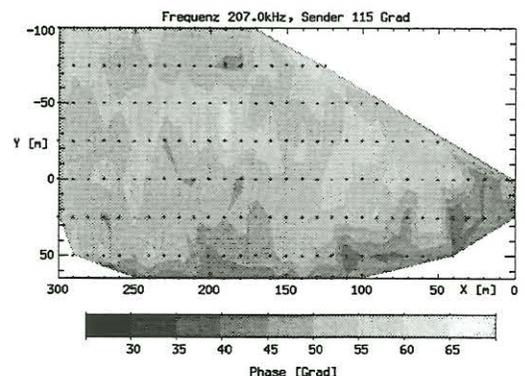


Abbildung 5: Flächenhafte Darstellung der Phase für die Frequenz 207.0 kHz (Ausschnitt aus dem gesamten Messgebiet, siehe Abb. 2).

RMT-Auswertung

Die RMT-Daten werden profilweise mit dem 2D-Inversionsalgorithmus von Mackie et al. (1997) ausgewertet. In die Inversion gehen sowohl die scheinbaren Widerstände wie auch die Phasen zu beiden Polarisationsrichtungen ('Joint-Inversion') gemeinsam ein. Dies kann man für die Profile, die West-Ost streichen, ebenso machen wie für die Profile in Nord-Süd-Richtung.

Das 2D-Inversionsergebnis für das West-Ost-Profil $y = -50\text{m}$ ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Lage des Profils $y = -50\text{m}$ findet man in Abbildung 4 als weiße horizontale Linie markiert. Im Widerstands-Tiefenbild fällt zunächst der Querschnitt durch den niederohmigen ($< 25\Omega\text{m}$) Deponiekörper auf. Die westliche Kante der Deponie bei Profilmeter 460 wird modelliert, da die Daten der westlichen zwei RMT-Stationen dieses Profils den Übergang zum Umgebungsgestein andeuten. Die östliche Deponiekante bei Profilmeter 90 ist nicht belegt, da für dieses Profil keine Messungen jenseits des Deponiekörpers vorliegen. Des-

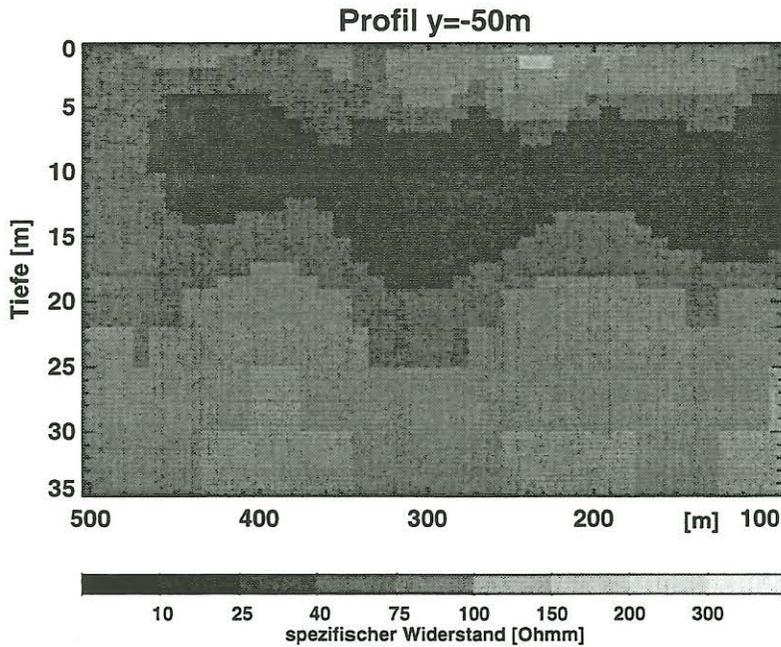


Abbildung 6: 2D-Inversionsergebnis für die Widerstandsverteilung zu Profil y=-50m.

weiteren fällt die in Mächtigkeit und spezifischem Widerstand variierende Deckschicht auf. Die angenommene Mächtigkeit von 3m-4m wird an einigen Stellen übertroffen. Zum Teil ganz gut deutet sich der Übergang von quartären zu tertiären Sedimenten im 2D-Modell an. Nach den Schichtenverzeichnissen zu einigen Bohrungen in der näheren Umgebung zur Deponie ist die Grenze in einer Tiefe von ca. 18m zu erwarten. Diese Grenze kann zwischen Profilmeter 90 und 240 bzw. 340 und 440 recht gut im Widerstandsverlauf nachgezogen werden.

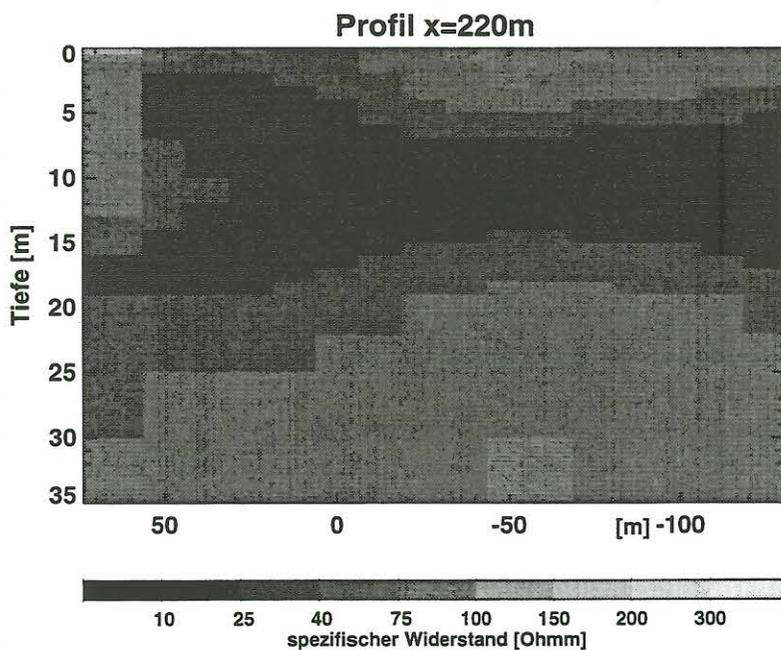


Abbildung 7: 2D-Inversionsergebnis für die Widerstandsverteilung zu Profil x=220m.

Zum Vergleich ist in Abbildung 7 das Inversionsergebnis der 2D-Modellierung für das Nord-Süd verlaufende Profil x=220m gezeigt (siehe weiße vertikale Linie in Abbildung

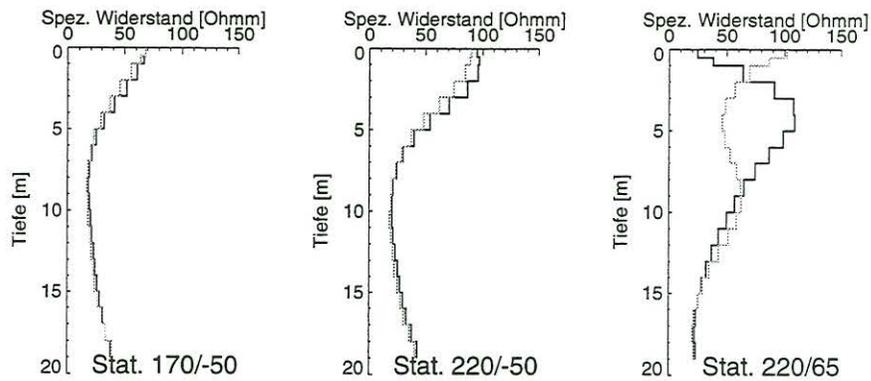


Abbildung 8: Vergleich des Widerstandverlaufs mit der Tiefe bei drei Stationen an der Schnittlinie sich orthogonal schneidender Profile. Schwarze Linie für Ost-West-(Y-)Profile, grau für Nord-Süd-(X-)Profile

4). Deponiekörper, südlicher Deponierand und die Deckschicht lassen sich im spezifischen Widerstand unterscheiden. An der gemeinsamen Schnittlinie beider 2D-Modelle - unter Station 220/-50 - ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung im Widerstandsmodell. Insbesondere liegt der Bereich des gutleitenden Deponiematerials ($< 25\Omega\text{m}$) in beiden Fällen zwischen 7 und 14m. Die gute Übereinstimmung zwischen 2D-Modellen an Schnittlinien von sich orthogonal schneidenden Profilen kann man in Abbildung 8 erkennen. Für die bereits erwähnte Station 220/-50 ist in der mittleren Grafik der Verlauf des modellierten Widerstands mit der Tiefe entsprechend dem 2D-Inversionsergebnis zu Profil $y=-50\text{m}$ (schwarze Linie) bzw. entsprechend dem 2D-Inversionsergebnis zu Profil $x=220\text{m}$ im Vergleich dargestellt. Bis auf eine kleine Abweichung im oberflächennahen Bereich decken sich die Kurven recht gut. Diese Übereinstimmung findet man auch im Widerstandsverlauf zu anderen Stationen, zum Beispiel bei Station 170/-50.

Beachtet man nicht das Streichen der Struktur in der 2D-Modellierung, so entstehen falsche Widerstandsbilder, wie man am Beispiel der Deponiekante bei der Station 220/65 sehen kann. Das Nord-Süd-Profil (graue Linie) verläuft senkrecht zum Streichen der Deponie und ist demnach als 2D-Fall modellierbar, im Gegensatz zum Ost-West-Profil (schwarze Linie), das an dieser Stelle parallel zur Deponiekante verläuft und als solches nicht zweidimensional zu modellieren ist. Dies führt zu einem falschen vertikalen Widerstandsverlauf.

Die 2D-Widerstandsmodelle aller übrigen Profile zeigen mehr oder weniger gut den Deponiekörper in vertikaler und zum Teil auch lateraler Erstreckung. Eine Zusammenführung aller 2D-Modelle in einem 3D-Pseudomodell kann eine gute Vorstellung von der räumlichen Struktur der Deponie geben. Dies ist für die zukünftige Arbeit ebenso vorgesehen, wie eine Interpretation der RMT-Daten mit einem 3D-Auswerteprogramm, welches eine noch realitätsnähere Strukturauflösung der Deponie bieten soll.

Messungen zur Induzierten Polarisation

Mit einer Dipol-Dipol-Anordnung (Sender- und Empfänger dipol jeweils 3m) werden Zeitreihen von 4096 Punkten mit einer Samplingrate von 1msec zeitgleich an 16 TEAMEX-Empfängerapparaturen aufgenommen. Selektives Stapeln der 32 Einzelzeitreihen soll das nichtperiodische Rauschen unterdrücken. Um das periodische Rauschen aus den Zeitreihen

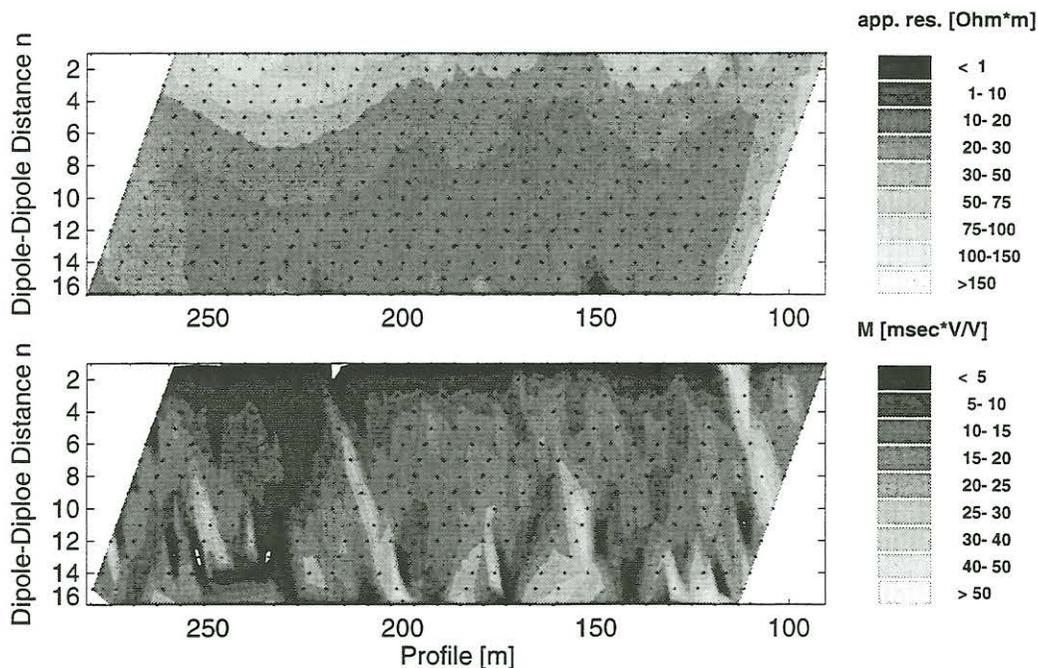


Abbildung 9: Pseudosektionen des scheinbaren Widerstandes ρ_a und der Aufladbarkeit M zu Profil $y=-50m$.

zu eliminieren, werden Lockin-Filter für $16\frac{2}{3}Hz$, und 50Hz Rauschen im Datenprocessing eingesetzt. Die Auswertung der Messkurven kann nach klassischer Weise erfolgen, indem man den scheinbaren Widerstand ρ und die Aufladbarkeit m bzw. M bestimmt und als Pseudosektionen über die Profillänge aufträgt.

Für Profil $y=-50m$ ist das Ergebnis dieser Auswertung in Abbildung 9 gezeigt. Der scheinbare Widerstand sowie die Aufladbarkeit M sind als Pseudosektionen dargestellt. Das Bild des scheinbaren Widerstands stimmt sehr gut mit dem Widerstandsmodell der RMT überein (Profil $y=-50m$, Abbildung 6). Die Aufladbarkeit M gibt eine zusätzliche Möglichkeit das Untergrundmaterial zu charakterisieren. Das Deponiematerial hat gegenüber der Deckschicht deutlich erhöhte Werte in der Aufladbarkeit M .

Als neuer Ansatz soll die gesamte Spannungskurve benutzt werden, um - basierend auf dem Cole-Cole-Modell - vier Parameter auszuwerten: Widerstand ρ , Aufladbarkeit m , Relaxationszeit τ und Frequenzzahl c (siehe: Hönig et al., 'Ein 1D-Inversionsalgorithmus für Zeitbereichs-IP', in diesem Kolloquiumsband).

Rammkernbohrungen

Um die Ergebnisse der RMT-Inversionsrechnungen und der IP-Datenauswertung zu überprüfen, sind auf der Deponie drei Rammkernbohrungen mit jeweils 15m Teufe vorgenommen worden, zusätzlich zwei Rammkernsondierungen außerhalb der Deponie mit jeweils ca. 10m Teufe. Die aus diesen Bohrungen gewonnenen Bodenproben werden derzeit auf ihre sedimentologischen, geochemischen und geophysikalischen Eigenschaften hin untersucht. Gerade die Laborergebnisse der geophysikalischen Untersuchungen mit Bezug auf die Frequenzabhängigkeit der Leitfähigkeit sollen die Inversionsergebnisse der RMT- und IP-Auswertung kalibrieren.

Zusammenfassung

Das bereits mehrfach erprobte Verfahren der Radiomagnetotellurik liefert auch für die hier bearbeitete Deponie brauchbare Ergebnisse. Die Entwicklung der Zeitbereichs-IP soll in den folgenden Jahren parallel zur Sondierung weiterer Altstandorte vorangetrieben werden. Rammkernbohrungen werden jeweils zur Kalibrierung der Methoden durchgeführt.

Literatur

- Mackie R., Rieven S. und Rodi W.**, 1997. Users Manual and Software Documentation for Two-Dimensional Inversion of Magnetotelluric data: MIT, Earth Resources Lab., Cambridge, Massachusetts 02139.
- Tezkan B., Goldman M., Greinwald S., Hördt A., Müller I., Neubauer F. M., Zacher G.**, 1996. A joint application of radiomagnetotellurics and transient electromagnetics to the investigation of a waste deposit in Cologne (Germany), *Journal of Applied Geophysics*, **34**:199-212.
- Zacher G., Tezkan B., Neubauer F. M., Hördt A. and Müller I. A.**, 1996. Radiomagnetotellurics: A Powerful tool for waste-site exploration, *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **1**:139-159.