

Geoelektrische Tomographie - Prinzip und Anwendungsbeispiele –

Anita Just, Erik Danckwardt, Franz Jacobs

Universität Leipzig, Institut für Geophysik und Geologie, Talstraße 35, 04155 Leipzig
Email: ajust@rz.uni-leipzig.de

Inhalt

1. Einführung und Untersuchungsparameter
2. Mess- und Rekonstruktionsprinzip
3. Anwendungsbeispiele
 - Labor (Bohrkerne, Lockersedimente)
 - Bäume und Bauwerke
 - Gelände
4. Zusammenfassung
5. Literatur

1. Einführung und Untersuchungsparameter

Tomographische Verfahren (griechisch: "tomos" - Schnitt) liefern ein Abbild der Verteilung eines physikalischen Parameters innerhalb eines zu untersuchenden Objektes, im allgemeinen in Form von Querschnittsbildern. Dieses Abbild wird aus Messwerten, die an der Oberfläche des Objektes gewonnen werden, berechnet. Die mathematischen Grundlagen der Tomographie formulierte bereits RADON (1917).

Die ersten bedeutenden Anwendungen erfolgten – nach der Anwendung in der Radioastronomie - in den 1970er Jahren in der diagnostischen Medizin in Form der Röntgen-Computertomographie (CT), (HOUNSFIELD 1973). Dabei wird der Schwächungskoeffizient der Röntgenstrahlung für viele verschiedene Sender-Empfänger-Anordnungen gemessen. Die Theorie der CT wird ausführlich beschrieben z. B. bei HERMAN (1980). Weitere wichtige Anwendungen in der Medizin sind die Magnetresonanz-Tomographie (MRT) und die Ultraschalltomographie. Die MRT (zu deren Grundlagen siehe z. B. HAUSSER & KALBITZER 1989) wird heute schon genutzt, um direkt während eines operativen Eingriffes am Menschen Schnittbilder der betreffenden Körperregion zu erstellen (SCHMIDT 1997). In neuerer Zeit wird auch die Potentialtomographie (Elektrische Impedanztomographie) für die Anwendung in der Diagnostik entwickelt (z. B. BARBER & BROWN 1984, BROWN 1986, WEBSTER et al. 1990, FRERICHS et al. 2001).

Heute werden tomographische Verfahren in vielen anderen Bereichen eingesetzt, wie z. B. in der Werkstoffprüfung oder bei der Überwachung industrieller Prozesse (z. B. KÜHN 1998). Neben den schon genannten Tomographieverfahren der Röntgen-CT, MRT und Ultraschalltomographie gibt es eine Reihe weiterer, praktisch wird nahezu jeder physikalische Parameter für tomographische Zwecke genutzt. Eine größere Bedeutung hat z. B. in der Medizin die Positronenmissionstomographie (PET) erlangt.

In der Geophysik wurden tomographische Verfahren zuerst in der Seismik erfolgreich eingesetzt (z. B. RÜTER & GELBKE 1986, KRAJEWSKI et al. 1989). In jüngerer Zeit versucht man, das tomographische Prinzip auch auf andere geophysikalische Verfahren (Elektromagnetik, Geoelektrik) zu übertragen. In der Archäologie und Hohlraumerkundung (NOEL & XU 1991, JACOBS et al. 1994a und b) wurde die Elektrische

Widerstandstomographie erstmals erfolgreich eingesetzt. NITSCHKE (1992) und NITSCHKE & DANCKWARDT (1992) wendeten das ursprüngliche Verfahren von JACOBS et al. (1994a, b) auf Bohrkernmodelle an.

Die geoelektrische Tomographie hat sich mittlerweile als eine Methode zur zerstörungsfreien Ermittlung der 2- oder 3-dimensionalen Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes von geologischen Objekten, in der Geophysik des Untergrundes, aber auch von Bauwerken, Denkmälern, Bäumen, Behältern mit Lockermaterialien und Bohrkernen, etabliert.

Der untersuchte Gesteinsparameter, der spezifische elektrische Widerstand - bzw. sein Kehrwert, die elektrische Leitfähigkeit-, ist abhängig von den Porenraumeigenschaften wie der Porosität, dem elektrischen Widerstand des Porenfluids und dem Sättigungsgrad sowie von den Eigenschaften der Gesteinsmatrix wie Erz- und Graphit- oder Tongehalt und beinhaltet folglich Informationen über diese Parameter.

Die Anwendung der geoelektrischen Tomographie hat seit den ersten Arbeiten von NOEL & Xu (1991) und JACOBS et al. (1994a, b) einen beachtlichen Aufschwung erlebt. Sie reicht von der Erkundung kleiner Hohlräume im Untergrund und anderen ingenieurmäßigen Anwendungen sowie Messungen an Behältern (z. B. GRUHNE 1999) bis zu Großexperimenten zur weiträumigen Strukturerkundung (Großexperiment an der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB), STORZ et al. 2000) und Anwendungen unter extremen Bedingungen wie Vulkanforschung (FRIEDEL et al. 1998) und Meeresforschung (JUST et al. 2000 und 2002). Eine spezielle Anwendung, bei der nicht der spezifische Widerstand selbst der invertierte Parameter ist, sondern seine Veränderung zwischen zwei Zeitpunkten, entwickelte SCHÜTZE (1999) in Form der Prozessquotiententomographie.

JUST (2001) beschreibt die Entwicklung der Elektrischen Widerstandstomographie speziell für zylinderförmige Körper sowie die Anwendung auf kristalline Bohrkern und zylindrische Behälter mit Lockermaterial (Ton). Eine weitere Anwendung fand die Methode zur Untersuchung von Baumstämmen und Säulen.

2. Mess- und Rekonstruktionsprinzip

2.1. Mess-Prinzip

Über zwei Elektroden (A und B) wird ein Strom in das Messobjekt (Erdoberfläche, versenkte Elektroden in Bohrlöchern, Oberfläche eines zylinderförmigen Objektes, z.B. Bohrkern, Baum oder Säule) eingespeist. Dadurch bildet sich in Abhängigkeit von der Widerstandsverteilung im Untersuchungsobjekt ein elektrisches Feld aus. Mit Elektrodenpaaren M und N werden an verschiedenen Punkten Potentialdifferenzen gemessen (Abb. 1). Dies geschieht für eine Vielzahl von Einspeisungspositionen. Aus der Potentialdifferenz, dem gemessenen Strom und einem Geometriefaktor (auch als Konfigurationsfaktor bezeichnet) kann der scheinbare spezifische Widerstand für die aktuelle Elektrodenkonfiguration nach der Gleichung

$$\rho_s = k \cdot \frac{\Delta U}{I} \quad (1)$$

mit k - Konfigurationsfaktor, ΔU - Potentialdifferenz zwischen M und N und I - Strom zwischen A und B

berechnet werden. Die Anwendung des Tomographieprinzips erfordert eine Vielzahl von Messungen mit verschiedenen Elektrodenkonfigurationen.

Zur Messung werden heute standardmäßig Multielektrodengeräte auf Gleichstrombasis verwendet, die eine automatisierte Messwertaufnahme gestatten (z. B. FRIEDEL 1997).

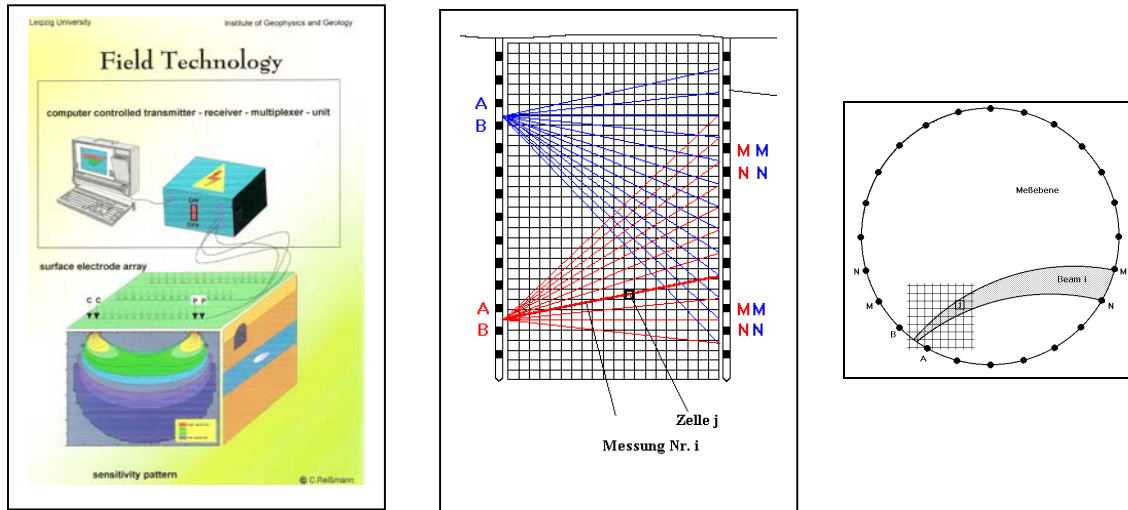


Abb. 1: Mess-Prinzip: Über zwei Elektroden (A und B) wird ein Strom in das Messobjekt (links: Erdoberfläche, Mitte: versenkte Elektroden in Bohrlöchern, rechts: Oberfläche eines zylinderförmigen Objektes, z.B. Bohrkern, Baum oder Säule) eingespeist. Mit Elektrodenpaaren M und N werden Potentialdifferenzen gemessen.

2. 2. Tomographisches Rekonstruktionsverfahren

Das Ziel der tomographischen Rekonstruktionsverfahren besteht darin, aus den an der Oberfläche gewonnenen Messwerten die räumliche Verteilung eines Parameters zu rekonstruieren. Voraussetzung dabei ist, dass sich die Messwerte als Projektion der Parameterverteilung darstellen lassen. Dabei versteht man unter "Projektion" die Integration der zu untersuchenden Größe längs eines bestimmten Weges (oder "Strahles"). Die Gesamtheit aller Projektionen (es gibt unendlich viele) ist die RADON-Transformation. Die tomographische Rekonstruktion ist also die Suche nach der Inversion, d. h. der Umkehrung der Projektion.

Die tomographischen Rekonstruktionsverfahren lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- algebraische (inverse Radon-Transformation, gefilterte Backprojektion),
- numerische (Matrixinversion),
- iterative (Algebraische Rekonstruktionstechnik, Simultane Iterative Rekonstruktionstechnik),

(siehe z. B. HERMAN 1980).

In der Geophysik werden meist iterative Verfahren angewendet, insbesondere die Simultane Iterative Rekonstruktionstechnik (SIRT), Dines & Lytle (1979). Für die hier vorgestellte geoelektrische Tomographie erfolgt die tomographische Inversion ebenfalls auf der Grundlage der Simultanen Iterativen Rekonstruktionstechnik (SIRT). Der grundlegende

Unterschied zur Strahltomographie ist, dass hier nicht nur die Bereiche des Untersuchungsobjektes, die auf einem Strahl liegen, den Messwert an der Oberfläche verursachen, sondern größere Bereiche, im allgemeinen sogar das gesamte Objekt.

Man unterteilt das Messgebiet in Zellen. Der Einfluss der Zelle j auf den Messwert i wird beschrieben durch die Sensitivität

$$S_{ij} = \frac{\partial \rho_{si}}{\partial \rho_j} \quad (2)$$

ρ_j - spezifischer Widerstand der Zelle j

ρ_{si} - scheinbarer spezifischer Widerstand (i-ter Messwert).

Im 0. Iterationsschritt (Backprojektion) wird aus jeder Einzelmessung der scheinbare spezifische Widerstand ρ_{si} unter Berücksichtigung der Sensitivitäten in die Zellen "projiziert". Für jede Zelle erhält man einen Widerstand $\rho_j^{(0)}$ nach der Vorschrift

$$\rho_j^{(0)} = \frac{\sum_{i=1}^M S_{ij} \rho_{si}^{\text{mess}}}{\sum_{i=1}^M S_{ij}} \quad (3)$$

mit $j=1 \dots N$ (N - Anzahl der Zellen) und M - Anzahl der Messwerte.

Näherungsweise verwendete man anfangs anstelle der Sensitivitäten S_{ij} Wichtungsfaktoren W_{ij} , indem man annahm, dass ein schlauchförmiger Sektor zwischen den Äquipotentiallinien durch M und N („Beam“) dem Bereich maximaler Sensitivität entspricht. Im Falle zylindrischer Objekte stimmt dieser „Beam“ relativ gut mit der wahren Sensitivitätsverteilung überein (allerdings werden negative Sensitivitäten nicht berücksichtigt), JUST (2001).

Mit dem nach der Backprojektion erhaltenen Leitfähigkeitsmodell errechnet man mit Hilfe eines Vorwärtsmodellierungsverfahrens (z.B. über Finite Differenzen, Finite Elemente oder näherungsweise mit einem Mittelungsverfahren) "Messwerte" (scheinbare spezifische Widerstände) und vergleicht diese mit den tatsächlich gemessenen. Aus den Differenzen (Residuen) berechnet man Korrekturen für das Leitfähigkeitsmodell des Untersuchungsobjektes. Die Schritte der Vorwärtsmodellierung und der Korrektur werden iterativ solange wiederholt, bis die Differenz zwischen berechneten und gemessenen Werten eine vorgegebene Schranke unterschreitet oder eine vorgegebene Zahl von Iterationsschritten erreicht ist.

Für eine gute tomographische Inversion ist es notwendig, solche Konfigurationen auszuwählen, die eine hohe Sensitivität in möglichst engen räumlichen Bereichen aufweisen. Abb. 3 zeigt die Verteilung der Sensitivitäten für verschiedene Anordnungen im Untergrund.

Das modifizierte SIRT-Verfahren gliedert sich zusammengefasst in folgende Schritte:

1. Unterteilung der Messfläche in **rechteckige Zellen**
2. **Backprojektion**: Berechnung eines Startmodells für die zu ermittelnde 2D- oder 3D-Verteilung der spezifischen Widerstände durch
 - Projektion der gemessenen scheinbaren spezifischen Widerstände jeder Elektroden-Konfiguration in die Zellen der Messebene, unter Berücksichtigung der Sensitivitätsverteilung (oder näherungsweise eines „Beams“)
 - für jede Zelle Berechnung des Mittelwertes aller Werte, die in die Zelle projiziert wurden
- 3. **Vorwärtsmodellierung**: Berechnung scheinbarer spezifischer Widerstände aus dem bestimmten Startmodell der Widerstandsverteilung nach der Methode der Finiten Differenzen, Finiter Elemente (2D, 3D) oder Mittelungsverfahren
- 4. **Korrektur** der schrittweise ermittelten Widerstandsverteilung durch Projektion der Differenzen (Residuen) zwischen gemessenen und berechneten Werten in die Zellen.

Die Schritte 3 und 4 werden iterativ wiederholt, bis die mittlere quadratische Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Werten eine vorgegebene Schranke unterschreitet oder die vorgegebene Zahl der Iterationsschritte erreicht ist.

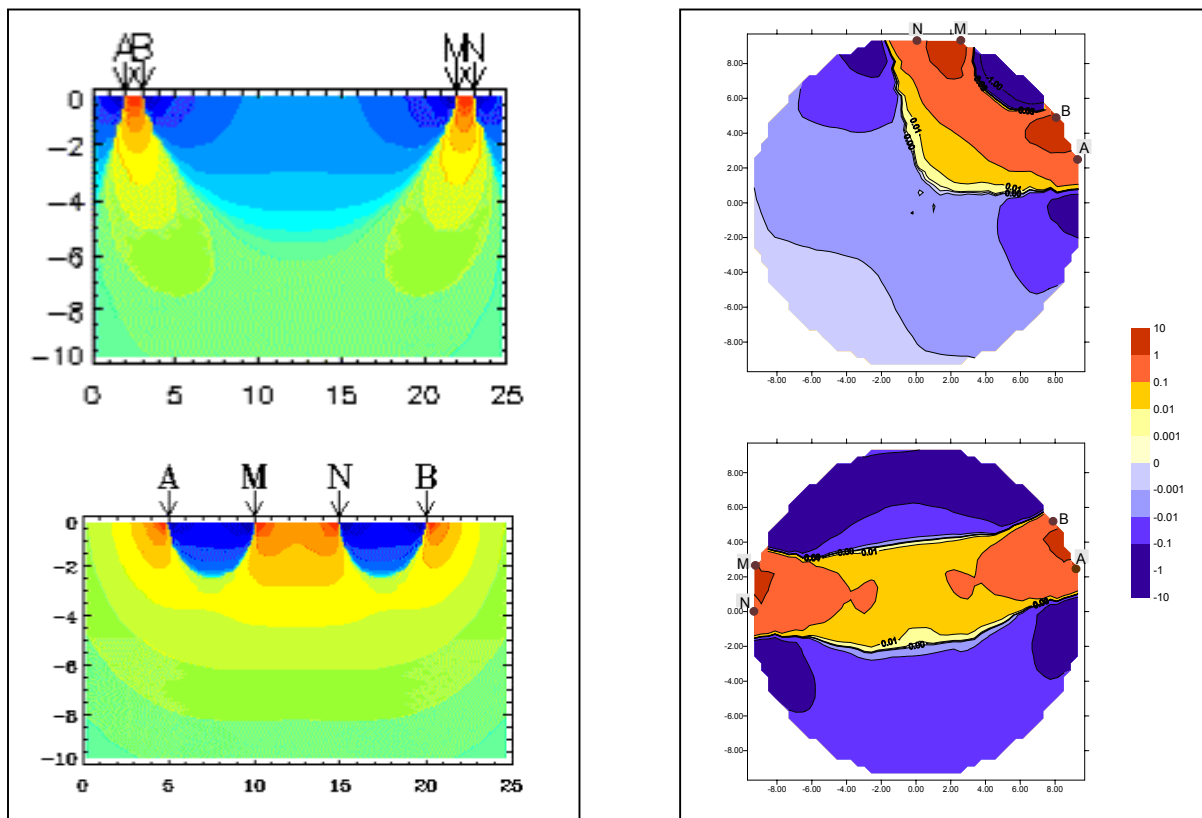


Abb. 2: Sensitivitätsverteilungen für verschiedene Anordnungen im Untergrund (links, nach FRIEDEL 2000) und in einem zylinderförmigen Messobjekt (rechts).

3. Anwendungsbeispiele

3.1. Petrophysikalische Anwendungen im Labor

Das Ziel geophysikalischer Messungen besteht darin, von der Erdoberfläche aus Informationen über die Beschaffenheit des Untergrundes zu gewinnen. Im Falle der Geoelektrik wird die räumliche Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes (oder seines Kehrwertes, der elektrischen Leitfähigkeit) ermittelt.

Die Interpretation dieser Messungen erfordert die Kenntnis des Zusammenhangs der gemessenen Größen mit anderen Parametern. Der elektrische Widerstand z. B. hängt ab von der Porosität des Gesteins, dem Gehalt an Fluiden, der Leitfähigkeit des Porenfluids und von den Eigenschaften der Gesteinsmatrix.

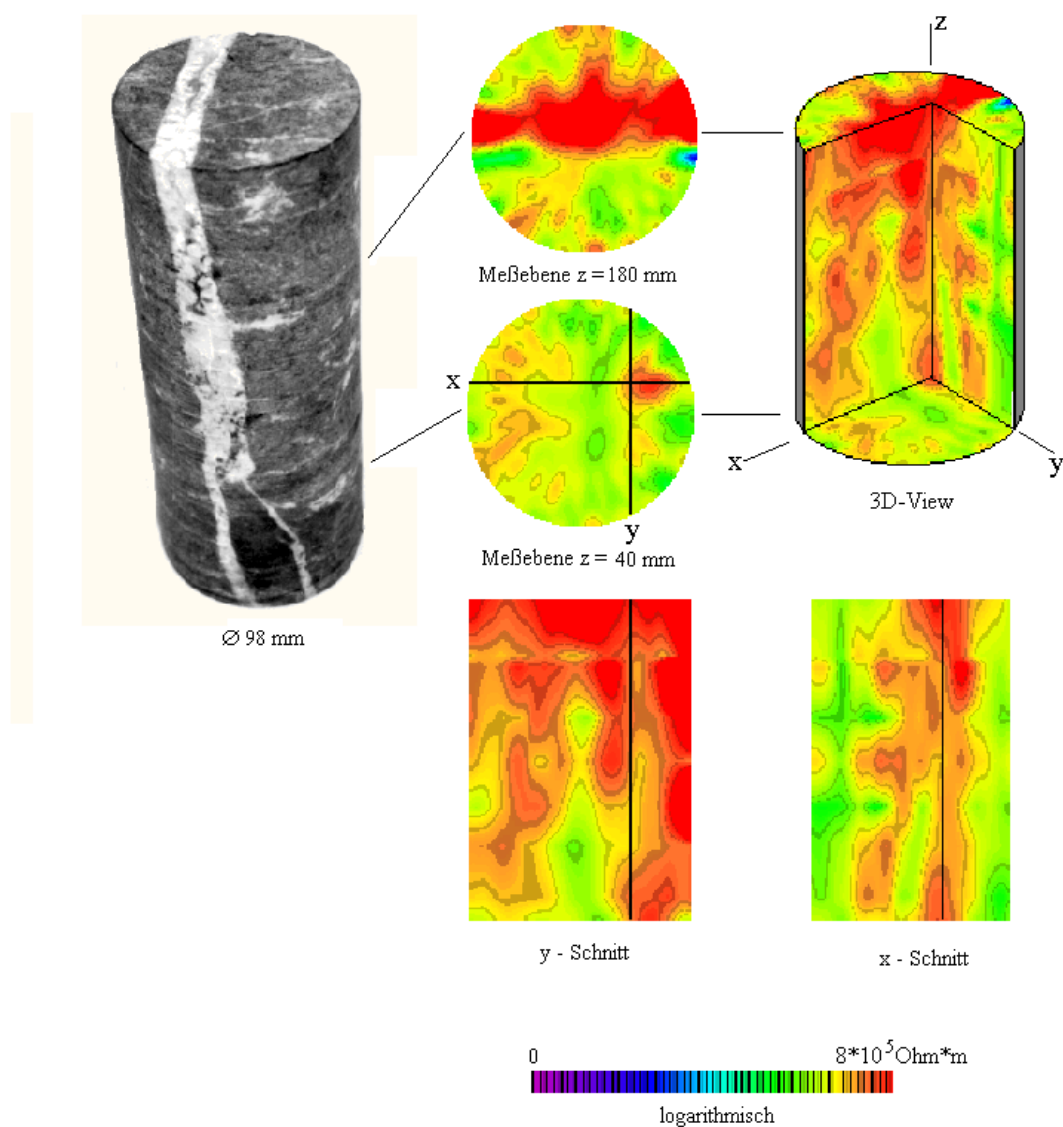


Abb. 3: Bohrkern H027B1cA aus der KTB-Hauptbohrung (6355 m), quarzführender Amphibolit. Links: Foto des Kerns, rechts: räumliche Darstellung der Widerstandsverteilung, berechnet aus 9 Messebenen.

Die Untersuchung der quantitativen Zusammenhänge dieser Größen ist die Aufgabe der Petrophysik (Gesteinsphysik). Sie trägt dazu bei, Prozesse im Gestein (Transportprozesse, chemische Prozesse u. a.) zu verstehen und liefert damit einen Beitrag zum Verständnis gesteinsbildender Prozesse. Der spezifische elektrische Widerstand ist eine der wichtigen gesteinsphysikalischen Größen. Zu seiner Bestimmung im Labor an Bohrkernen gibt es verschiedene Methoden, mit denen man den integralen Widerstand der Probe erhält. Es ist auch möglich, die transversale Anisotropie an Bohrkernen zu ermitteln (RAUEN 1991, RAUEN & SOFFEL 1995). Jedoch erhält man mit diesen Methoden keine detaillierten Aussagen über die Struktur der Leitfähigkeitsverteilung im Inneren des Bohrkerns. Deren Kenntnis ist aber wichtig für das Verständnis der Leitfähigkeitsmechanismen im Gestein und damit der strukturellen und stofflichen Zusammensetzung des Gesteins.

Zur Erfassung der räumlichen Verteilung der Leitfähigkeit/ des spezifischen elektrischen Widerstandes in Bohrkernen und in Lockersedimenten (in zylindrischen Behältern) kann die Elektrische Widerstandstomographie (2D) eingesetzt werden. Auch die Untersuchung zeitlicher Veränderungen (z. B. Trocknungsprozesse, Diffusionsprozesse), ist möglich (JUST 2001).

Die Abbildung 3 zeigt als Beispiel einen Bohrkern aus der Hauptbohrung (H027B1cA, Teufenbereich 6355-6360m) der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB), einen quarzführenden Amphibolit. Durch den Kern verläuft ein zentimeterdickes Quarzband, das sich nach der unteren Seite des Bohrkernes hin aufspaltet. Der Verlauf des Quarzbandes lässt sich in den Tomogrammen durch einen erhöhten Widerstand verfolgen. Auch das Aufspalten des Bandes drückt sich durch Unterbrechungen des Widerstandsmaximums in den unteren Messebenen aus.

3. 2. Bäume und Bauwerke

Schädigungen wie Faulkern- oder Hohlraumbildungen stellen bei Park- und Alleebäumen eine potentielle Umsturzgefahr dar. Das rechtzeitige Erkennen des Ausmaßes solcher Schädigungen ist für den Träger der Verkehrssicherungspflicht deshalb von großer Bedeutung. In der Forstwirtschaft stellen Faulkerne, aber auch sogenannte Farbkerne wie der Rotkern der Buche oft eine beträchtliche Wertminderung des Holzes dar (WEIHS et al. 1999).

Die Methodenvielfalt bei der Baumdiagnose reicht von der Sichtkontrolle (VTA = Visual Tree Assessment) und der Methode des Abklopfens des Baumes über die Entnahme von Bohrkernen und die Anwendung des Resistographen bis zu zerstörungsfreien, aber recht aufwendigen bildgebenden Verfahren wie Röntgen-Computertomographie oder Ultraschalltomographie (z. B. NIEMZ et al. 1998, TOMICEK 1996). Nach DUBBEL et al. (1999) besteht in der Praxis der Baumpflege „großer Bedarf an einer Messmethode, die zerstörungsfrei ein zweidimensionales Bild des Bauminneren erzeugt, dabei mit vertretbarem apparativen Aufwand auskommt und für den Anwender möglichst geringe sicherheitstechnische Risiken mit sich bringt“.

Da (krankhafte) Veränderungen an Bäumen mit Änderungen des Wasserhaushaltes verbunden sind, lässt sich zu ihrer Detektion die elektrische Widerstandstomographie anwenden. Sie kann die Feuchtigkeitsänderungen als Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit/ des spezifischen elektrischen Widerstandes räumlich erfassen. Das Beispiel in Abb. 4 zeigt ein Messergebnis an einer Buche, die einen abnormen Rotkern („Nasskern“) aufweist. Der Nasskern ist im Tomogramm als deutliches Widerstandsminimum sichtbar.

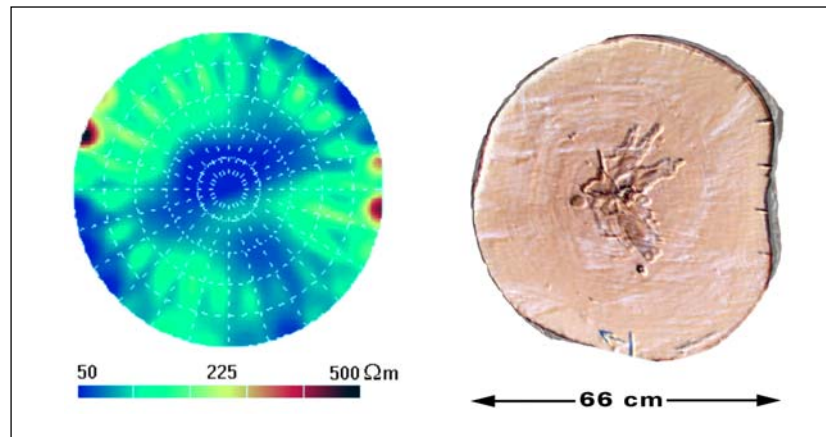


Abb. 4: Messung an Bäumen. Links: Messanordnung an einer Buche. Rechts: Widerstandstomogramm und Foto des Stammquerschnittes nach der Fällung (Fotos: U. Weihs).

Auch zur zerstörungsfreien Zustandsbewertung von Bauwerken lässt sich die Elektrische Widerstandstomographie in ähnlicher Weise heranziehen. JUST et al. (2003) untersuchten z. B. den Zustand von Säulen im Pergamon-Museum in Berlin.

3.3. Einsatz im Gelände

Das klassische Einsatzgebiet der geoelektrischen Widerstandstomographie ist natürlich die Erkundung von Untergrundstrukturen im Gelände. Dabei reicht das Einsatzgebiet von der Erkundung kleiner Hohlräume im Untergrund und anderen ingenieurmäßigen Anwendungen bis zu Großexperimenten zur weiträumigen Strukturerkundung (z.B. Großexperiment an der KTB, STORZ et al. 2000, Untersuchung einer Maar-Struktur, BRUNNER et al. 1999, Strukturerkundung am Vulkan Merapi, FRIEDEL et al. 1998).

Die Abb. 5 zeigt das Ergebnis (2D-Widerstandsverteilung mit geologischer Interpretation)

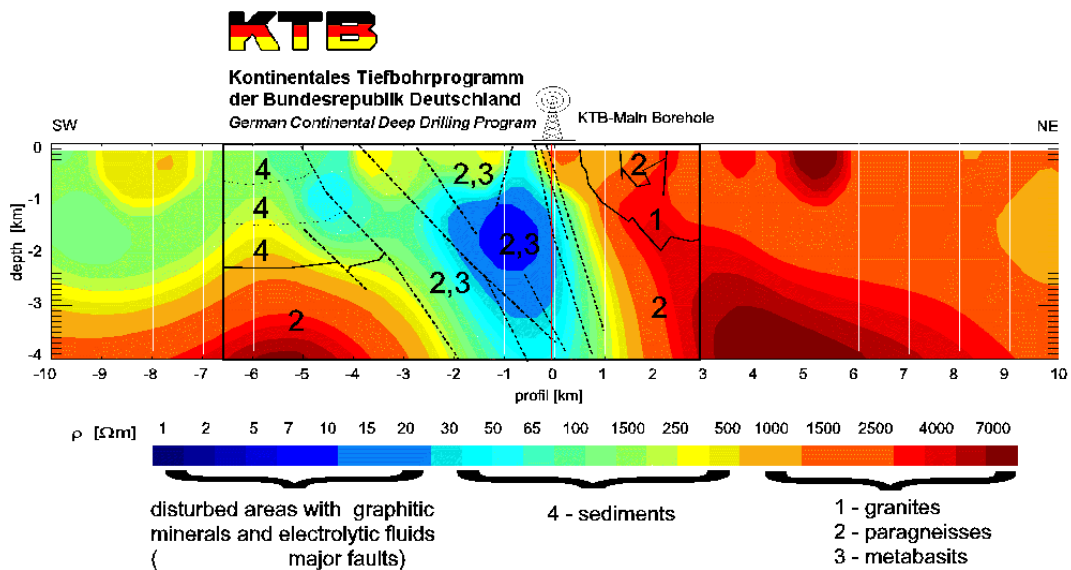


Abb. 5: 2D-Widerstandsverteilung im Umfeld der KTB (aus STORZ 2000).

einer geophysikalischen Erkundung mit der geoelektrischen Tomographie im Umfeld der Kontinentalen Tiefbohrung.

4. Zusammenfassung

Die geoelektrische Tomographie ist eine Methode zur zerstörungsfreien Ermittlung der 2- oder 3-dimensionalen Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes von geologischen Objekten, in der Geophysik des Untergrundes, aber auch von Bauwerken, Denkmälern, Bäumen, Behältern mit Lockermaterialien und Bohrkernen.

Der untersuchte Gesteinsparameter, der spezifische elektrische Widerstand, ist abhängig von den Porenraumeigenschaften wie der Porosität, dem elektrischen Widerstand des Porenfluids und dem Sättigungsgrad sowie von den Eigenschaften der Gesteinsmatrix wie Erz- und Graphit- oder Tongehalt und beinhaltet folglich Informationen über diese Parameter.

Die geoelektrische Tomographie erlaubt damit indirekt Aussagen über räumliche Verteilung dieser Eigenschaften. Sie hat in den letzten 10 Jahren eine starke Entwicklung genommen und eine breite Anwendung in den Geowissenschaften gefunden.

5. Literatur

- Barber, D. C. & Brown, B. H. (1984): Applied potential tomography.- *J. Phys. E. Sci. Instrum.* **17**, 723-733.
- Brown, B. H. (1986): Applied Potential Tomography.-*Phys. Bull.* **37**: 109-112.
- Brunner, I., Friedel, S., Jacobs, F., Danckwardt, E. (1999): Investigation of a Tertiary maar structure using three-dimensional resistivity imaging.- *Geophys. J. Int.* **136**, 771-780.
- Dines, K. A. & Lytle, R. J. (1979): Computerized geophysical tomography.- *Proc. IEEE* **67**, 7, D 1065-1073.
- Dubbel, V., Weihs, U., Krummheuer, F., Just, A. (1999): Die elektrische Widerstandstomographie – Neue Methode zur zweidimensionalen Darstellung von Fäulen an Fichte.- *Allgemeine Forstzeitschrift/ DerWald* **26**, 1422-1424.
- Frerichs, I., Schiffmann, H., Hahn, G., Hellige, G. (2001): Non-invasive radiation-free monitoring of regional lung ventilation in critically ill infants.- *Intensive Care Med* **27**: 1385-1394.
- Friedel, S. (1997): Hochauflösende Geoelektrik - Geoelektrische Tomographie. - In: Beblo, M. (Hrsg.): Umweltgeophysik. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin.
- Friedel, S., Jacobs, F., Flechsig, Ch., Reißmann, C., Brunner, I. (1998): Large-scale DC resistivity imaging at Merapi volcano. In Zschau, J. & Westerhaus, M. (Hrsg.): *Decade-volcanos under investigation* (p. 35-41). Deutsche Geophysikalische Gesellschaft.
- Friedel, S. (2000): Über die Abbildungseigenschaften der geoelektrischen Impedanztomographie unter Berücksichtigung von endlicher Anzahl und endlicher Genauigkeit der Messdaten.- Dissertation, Universität Leipzig, 2001 und Shaker Verlag Aachen, ISBN 3-8265-7587-3.
- Grühne, M. (1999): Überwachung von Untergrundkontaminationen mit Messungen der komplexen elektrischen Leitfähigkeit. Dissertation, Universität Leipzig.
- Hausser, K. H. & Kalbitzer (1989): NMR für Mediziner und Biologen: Strukturbestimmung, Bildgebung, In-vivo-Spektroskopie.- Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Herman, G. T. (1980): Image reconstruction from projections - The fundamentals of computerized tomography, Academic Press, New York.
- Hounsfield, G. N. (1973): Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I Description of the system.- *Brit. J. Radiol.* **46**, 1016 – 1022.
- Jacobs, F., Danckwardt, E., Petzold, G. (1994). Verfahren und Anordnung zur räumlichen Erkundung unterirdischer Objekte und Schichten.- *Patentanmeldung P 44 12 994.7-52*, 15.04.1994, Deutsches Patentamt München.
- Jacobs, F., Danckwardt, E., Petzold, G., Brunner, I., Beier, H.-J., Jäger, K.-D. (1994): Geoelektrisch-tomographische Messungen an ortsfesten Bodendenkmälern. Theoretische Grundlagen und erste
- Just, A., Helbig, K., Heinse, R., Flechsig, Ch., Jacobs, F., Endler, R. (2000): Messungen mit der Elektrischen In Situ Apparatur (ELISA) in der Ostsee.- *Proc. IX. Arbeitsseminar "Hochauflösende Geoelektrik"*, Bucha/Sachsen, 4.-6.10.2000.
- Just, A. (2001): Bestimmung der räumlichen Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes an zylinderförmigen Körpern mit Hilfe der Elektrischen Widerstandstomographie - Anwendung in der

- Petrophysik auf Bohrkerne und Lockersedimente.- Dissertation, Universität Leipzig, 2001 und Shaker Verlag Aachen 2002, ISBN 3-8265-9894-6.
- Just, A., Flechsig, Ch., Jacobs, F. (2002): Entwicklung und Erprobung einer Elektrischen In-Situ-Apparatur (ELISA) für Meeresböden.- Abschlussbericht zum BMBF-Projekt 03G0536A9, Universität Leipzig.
- Just, A., Danckwardt, E., Jacobs, F. (2003): Elektrische Widerstandstomographie zur Zustandsbewertung von Bauwerken – Ergebnisse von Messungen im Pergamonmuseum.-Proc. 63. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG), 23.-28-2-2003, Jena, S. 50-51.
- Krajewski, C., Dresen, L., Gelbke, C., Rüter, H. (1989): Iterativ tomographic methods to locate seismic low-velocity anomalies: a model study.- *Geophys. Prosp.* **37**, 717-751.
- Kühn, F. (1998): Electrical capacitance tomography - Development and application to fluidised beds.- Dissertation, Universität Kaiserslautern.
- Niemz, P., Bodmer, H.-C., Kučera, L. J., Ridder, H.-W., Habermehl, A., Wyss, P., Zürcher, E., Holdenrieder, O. (1998): Eignung verschiedener Diagnosemethoden zur Erkennung von Stammfäule bei Fichte. *Schweiz. Z. Forstwes.* **149** 8:615-630.
- Nitschke, U. (1992): Petrophysikalische Bohrkernuntersuchungen mit transversalen Messkonfigurationen - Modellversuche zur räumlichen Bestimmung des elektrischen Widerstandes.- Diplomarbeit, Universität Leipzig.
- Nitschke, U. & Danckwardt, E. (1992): Räumliche Bestimmung des elektrischen Widerstandes an Bohrkernen.- *Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG)*, **3**, 1992.
- Noel, M. & Xu, B. (1991): Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study.- *Geophys. J. Int.* **107**: 95-102.
- Radon, J. (1917): Über die Bestimmung von Funktionen durch Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten.- *Ber. Verh. Sächs. Akad. der Wiss.* Rauen, A. & Lastovickova, M. (1995): Investigation of electrical anisotropy in the deep borehole KTB.- *Surveys in Geophysics* **16**, 37-46. **69**, S. 262-277.
- Rauen, A. (1991): Untersuchungen des komplexen Widerstandes, insbesondere dessen Anisotropie und Frequenzabhängigkeit, von Proben des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland (KTB).- Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Rauen, A. & Soffel, H. C. (1995): Determination of electrical resistivity, its anisotropy and heterogeneity on drill cores: a new method.- *Geophys. prosp.* **43** , 283-298.
- Rüter, H. & Gelbke, C. (1986): Seismische Tomographie.- In: Dresen, L., Fertig, J., Rüter, H., Budach, W. (Hrsg.): Seismik auf neuen Wegen, *Mintrop-Seminar, Bd. 6*, S. 207-240, Unikontakt, Ruhr-Universität Bochum.
- Schmidt, F. (1997): Offener Magnetresonanztomograph im klinischen Betrieb.- *Mitteilungen und Berichte für die Angehörigen und Freunde der Universität Leipzig* 3/97, S. 12, Leipzig.
- Schütze, C. (1999): Geoelektrische Prozeßquotiententomographie zum Nachweis dreidimensionaler Transportprozesse in Porengrundwasserleitern.- Dissertation, Universität Leipzig.
- Storz, H., Storz, W., Jacobs, F. (2000): Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the earth's upper crust.- *Geophys. Prosp.* **48**, 455-471.
- Tomicek, Ch. (1996): Methodenvergleich zur Abschätzung der Rotfäule an Fichte.- *Österr. Forstztg.*, 45-46.
- Webster, J. G. (1990): Electrical Impedance Tomography.- The Adam Hilger Series on Biomedical Engineering, Adam Hilger, Bristol and New York.
- Weihs, U., Dubbel, V., Krummheuer, F., Just, A. (1999): Die elektrische Widerstandstomographie - Ein vielversprechendes Verfahren zur Farbkerndiagnose am stehenden Rotbuchenstamm.- *Forst und Holz* **54**, 166-169.