

H. R. Gläser

UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig - Halle GmbH, Sektion Hydrogeologie

## Geophysikalische Untersuchungen zum Nachweis von Fließwegen- Fallstudie Hufeisensee

Tagebaurestseen werden im mitteldeutschen Braunkohleabbaugebiet zunehmend dominierender Bestandteil künstlich geschaffener Erholungslandschaften sein. Im Fall des hier betrachteten Hufeisensees bei Halle (**Abb. 1**) handelt es sich um einen Restsee, der aus dem bereits während des 2. Weltkrieges eingestellten Abbau einer Zweiflözlagerstätte, eozänen Alters, hervorgegangen ist. Eine Besonderheit liegt in der Tatsache, daß das ehemalige Restloch des Braunkohlebergbaues, außer dem als Badegewässer genutzten Restsee, noch eine ungeordnete Kommunalmülldeponie mit Inhaltsstoffen vielfältigster Art aufnimmt. Das Volumen des Deponiegutes beträgt insgesamt 3.3 Millionen m<sup>3</sup>. Diese Deponie wurde durch einen geschütteten Damm vom Wasser des entstandenen Restlochsees abgegrenzt, wobei als Schüttmaterial Kippenböden, Bändertone und Schluffe verwendet worden waren. Durch Beprobungen des Seewassers wurde der Verdacht genährt, daß hochkontaminiertes Deponiewasser über den Damm in den See penetriert und für den See somit ein mögliches Gefahrenpotential besteht. Mittels geophysikalischer Meßverfahren wurde nun versucht, die vermuteten Sickerpfade zu erfassen.

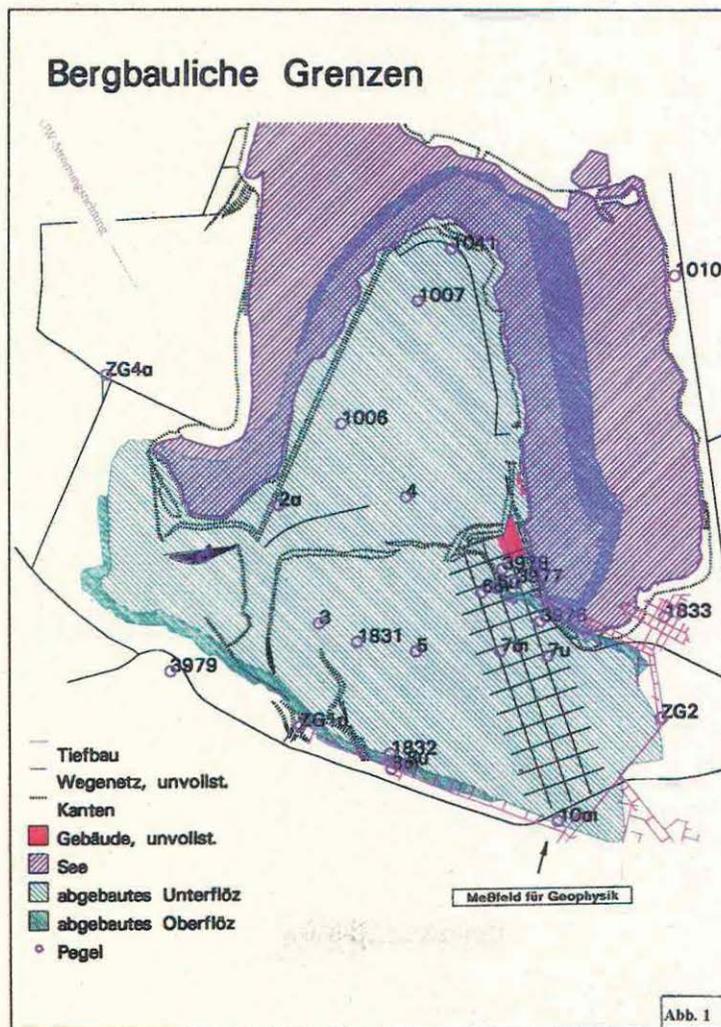


Abb. 1: Lageplan Hufeisensee, Pegel, geophysikalisches Meßfeld

Geophysikalisch ist dies insbesondere dann möglich, wenn sich die von einer Deponie ausgehende Kontaminationsfahne hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften wesentlich von denen der ungestörten Umgebung unterscheidet. Da Deponieflüssigkeiten meist elektrolytische Eigenschaften zeigen, bieten sich zu deren Nachweis elektrische Verfahren an, die sich, je nach Energieanregung im Boden, in passive und aktive Verfahren untergliedern lassen.

Ein aktives und seit langem gebräuchliches Verfahren ist das der Gleichstromelektrik. Hierbei wird über zwei Elektroden (A,B) dem Erdboden pulsierender Gleichstrom aufgeprägt und über zwei Elektroden (M,N) das sich im Untergrund aufbauende Spannungsfeld gemessen. Die Anordnung der Elektroden erfolgt meist linear entlang der zu untersuchenden Profile, wobei je nach angetroffener geologischer Situation und Aufgabenstellung verschiedene Elektrodenkonfigurationen möglich sind (Abb.2).

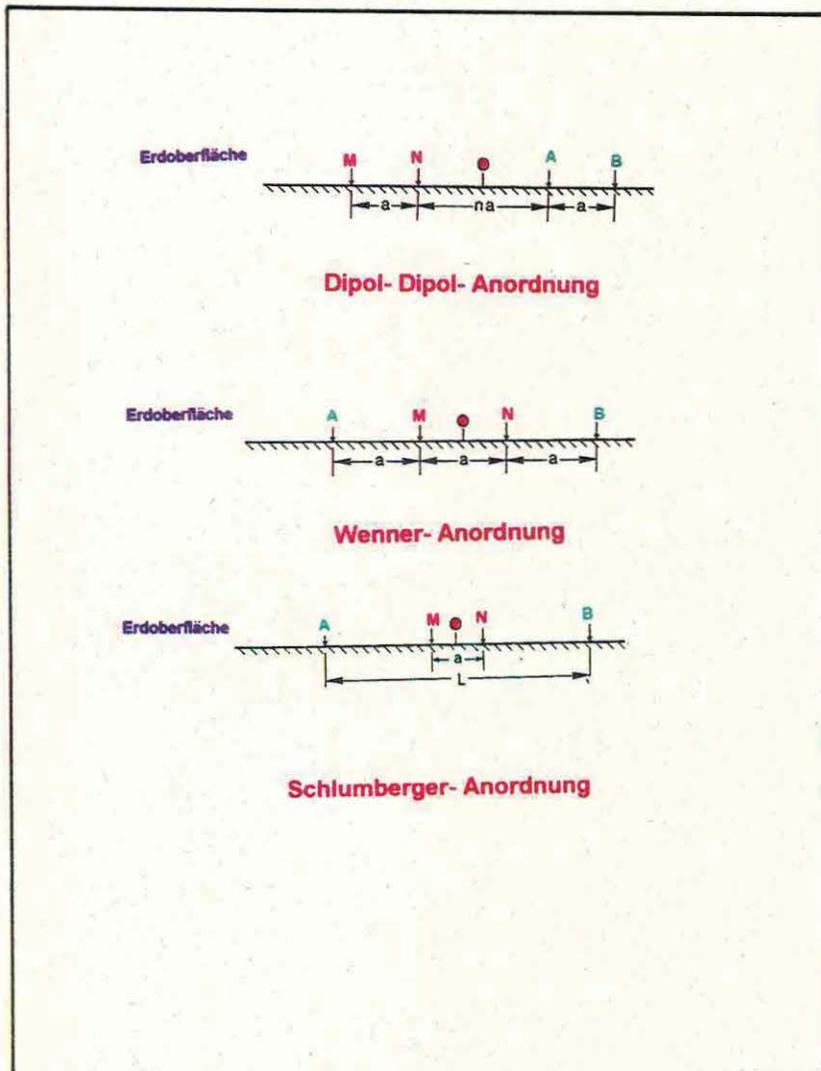
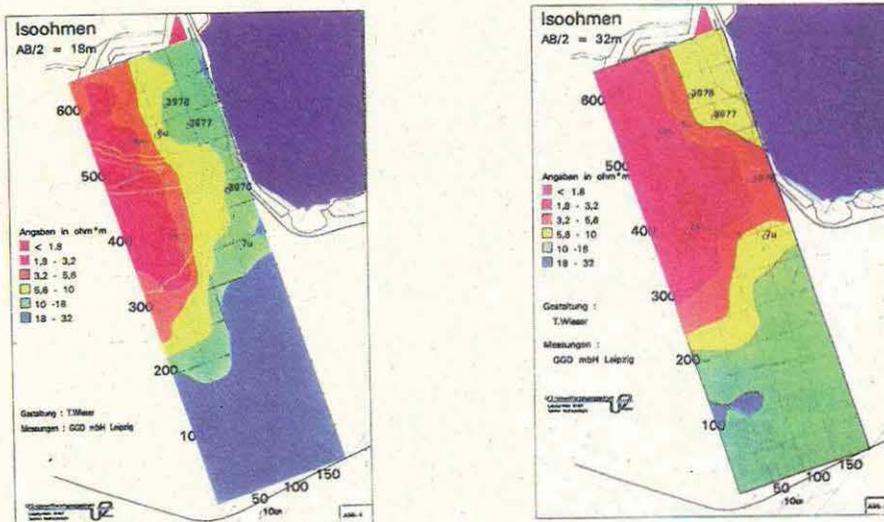


Abb.2: Auswahl einiger wichtiger Elektrodenkonfigurationen

Über verschiedene Modellansätze können aus den Meßwerten in mehreren Interpretationsetappen vom Geophysiker die entsprechenden wahren spezifischen Widerstände und Mächtigkeiten der im Untergund angetroffenen Schichten berechnet werden. Die Eindringtiefe des Verfahrens steht in direktem Zusammenhang zur Aufstellungsgeometrie der Elektroden, d.h., große Elektrodenabstände gestatten vergrößerte Meßtiefen. Die Maßeinheit des spezifischen Widerstandes ist das „Ohm.m“.

Eine gebräuchliche Modifikation der Gleichstromelektrik ist die sogenannte SCHLUMBERGER-Aufstellung. Die symmetrisch und nah um den Meßpunkt angeordneten Spannungselektroden M, N und die vom Meßpunkt weiter entfernt befindlichen Stromelektroden A, B gestatten bei Variation des Elektrodenabstandes AB eine variable Eindringtiefe. Mit den hier verwendeten Elektrodenabständen  $AB/2=18\text{m}$  und  $AB/2=32\text{m}$  bestimmt man zunächst die integralen Widerstandswerte für den Bereich Rasensohle bis 18m Teufe und Rasensohle bis 32m. Eine Entschlüsselung der an einem Meßpunkt durch verschiedene Aufstellungsweiten der Elektroden gewonnenen Meßwerte hinsichtlich Schichtmächtigkeit und wahren spezifischen Widerstand der Einzelschichten erfolgt über spezielle Auswerteprogramme auf numerischem Wege.

Die beiden hier verwendeten Aufstellungsgeometrien wurden entlang von SSE-NNW gerichteten Profilen (**Abb.1**) von GGD Leipzig an insgesamt 49 Meßpunkten realisiert. Die Ergebnisse dieser Messungen lassen sich u.a. in einer sogenannten Isoohmendarstellung präsentieren. Dabei handelt es sich um nichts anderes als um die Gleichlinien des scheinbaren spezifischen Widerstandes (Integralwert von Rasensohle bis jeweiliger Eindringtiefe). Schon bei dieser Teiletappe der Interpretation führt der Vergleich der Meßergebnisse beider Aufstellungsweiten zu einigen wesentlichen Ergebnissen.



**Abb.3:** Scheinbarer spezifischer Widerstand, Isoohmendarstellung für die Eindringtiefen 0-18m und 0-32m

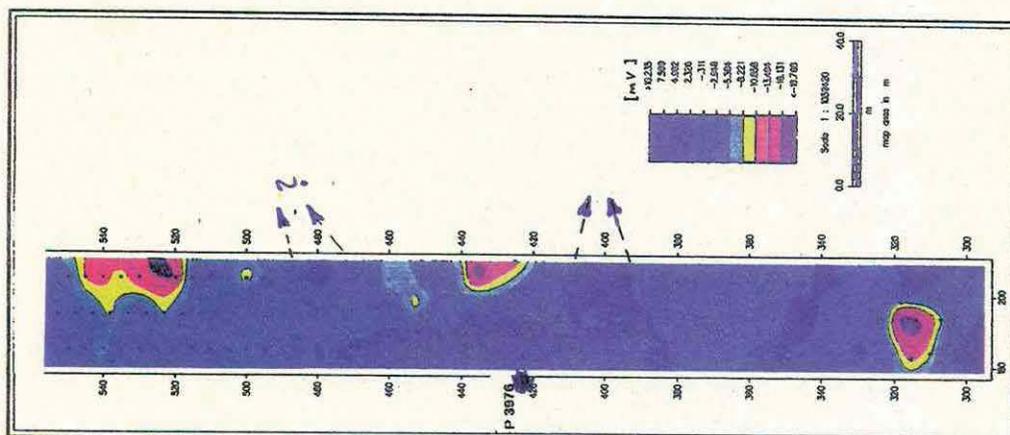
Dunkelrot sind in der **Abb. 3** die Zonen extrem niedrigen Widerstandes (ca. 2 Ohm.m) dargestellt. Es dürfte sich zweifelsohne um deponiebeeinflussten und damit salinar überprägten Untergrund handeln. Die Widerstände im unbeeinflussten Boden (grünfarben markiert) liegen in der Größenordnung um 10 Ohm.m und darüber. Im zentralen Dammbereich verlaufen die Isoohmen nahezu uferparallel. Starke Aufspreizungen der Isoohmen im Südteil des Dammes sprechen eindeutig für ein gestörtes Barriersystem und das Vorhandensein einer von der Deponie ausgehenden Kontaminationsfahne. Die Kontaminationsfahne erreichte zum Zeitpunkt der Messung (1992) im Dammbereich eine Breite bis ca. 110 m und befand sich entsprechend den Ergebnissen der Widerstandssondierung in einer Tiefe unterhalb 18m. Sie streicht wohl nicht ganz zufällig in der Richtung ehemaliger, heute zum Teil verwahrter oder überbaggerter Tiefbaustrecken.

Eine der Zielstellungen der laufenden Untersuchungen ist es, die Filtrationsgeschwindigkeit des Deponiewassers zu ermitteln. Zu diesem Zwecke soll in einer entsprechend positionierten Bohrung mit einem Spezialgerät der GSF München getracert ( $^{82}\text{Br}$ ) werden. Um eine derartige Untersuchung auch erfolgreich durchführen zu können, muß die entsprechende Pegelbohrung zielgerichtet in den Hauptfließpfad abgeteuft werden. Entsprechende Detailkenntnisse konnten aber aus der Schlumbergersondierung nicht abgeleitet werden. Die großen Elektrodenabstände gestatteten keine Feinauflösung. Aus diesem Grunde wurde auf das in der Geophysik altbekannte Prinzip der **Eigenpotentialmessungen** zurückgegriffen und zwar in der modifizierten Form der sogenannten **flächenhaften Eigenpotentiale**. Dieses rein passive, also ohne künstliche Energieanregung wirkende Meßverfahren, das früher zur Erzprospektion eingesetzt wurde, ist in jüngster Zeit bei der Ortung und Eingrenzung kontaminierter Bodenhorizonte zum Einsatz gekommen. Registriert werden im Untergrund sich aufbauende elektrochemische Potentiale, die je nach Ausmaß und Ursache im Millivoltbereich liegen und positives sowie negatives Vorzeichen tragen können. Die Registrierung selbst erfolgt durch Aufnahme der Potentialdifferenz zwischen auf dem Boden aufgesetzten Elektroden und in Referenz zu einer oder mehreren Bezugselektroden. Letztere sollten so positioniert sein, daß sie nur Potentiale des geogenen Untergrundes aufnehmen. Sie müssen also fernab jeglicher Kontamination positioniert werden. Im vorliegenden Fall waren 150 Elektroden, im 5m-Abstand, in drei Linien auf dem Damm, der die Deponie vom See abschneuert, sowie 4 Bezugselektroden über vermeintlich gewachsenem Untergrund aufgebracht worden. Die Elektrodenanordnung erfolgte in analoger Streichrichtung zur Orientierung der Elektrikprofile und überdeckte die interessierenden Teile jener Meßfläche.

Bezüglich der lateralen Auflösung des Meßverfahrens ist der Elektrodenabstand das Kriterium. Angaben zur Tiefenlage der Kontamination können nicht gewonnen werden, hierzu waren bislang meist Bohrungen erforderlich. Nach dem sogenannten Äquivalenzprinzip vermitteln oberflächennahe, aber schwache Störkörper, das gleiche Potential wie starke Störkörper in großer Tiefe. In diesen konkreten Fall übernimmt eine kontaminierte Bodenschicht im Untergrund die Rolle des Störkörpers. Die Sensitivitätstiefe des Meßverfahrens ist bis ca. 40m bisher nachgewiesen worden.

Die Ergebnisse dieser Potentialmessung und des sich anschließenden Datenprocessing sind in **Abb. 4** dargestellt. Allgemein werden kontaminierte Böden und Grundwässer durch negatives Potential abgebildet. Je nach Lage und Situation an den Referenzelektroden können allerdings, wie im vorliegenden Fall, auch Umpolungen zum positiven Vorzeichen auftreten. Das Kriterium für das Ausgliedern von Dispersionsfahnen oder Fließwegen sind entsprechend gebündelt verlaufende Potentiallinien. Mit einer geeigneten Farbgebung lassen sich dann derartige Sickerpfa-

de optisch gut aufbereiten. In **Abb. 4** sind in dunkelblauer Farbe die offensichtlich vom Deponieelektrolyten ausgehenden Potentiale (positives Vorzeichen) erkennbar.



**Abb. 4:** Eigenpotentialverfahren TERRASCAN

Ein vermutlich bevorzugter Sickerbereich erstreckt sich, die drei Linienprofile von links nach rechts querend, auf einer Breite von etwa 20m. Neben und in diese als Hauptabflußbereich vermutete Zone sollen zwei Pegelbohrungen abgeteuft werden. Beide Pegel befinden sich dann aber insgesamt im Einflußbereich der nach der Gleichstromelektrik ausgehaltenen Dispersionsfahne. Es soll an dieser Stelle nicht verschwiegen werden, daß beim Vergleich der Resultate von flächenhaften Eigenpotentialmessungen mit Bohraufschlüssen hin und wieder Überraschungen auftauchen. Systematische Untersuchungen der Eigenpotentialanomalien über kontaminiertem Untergrund stehen noch aus. Es besteht diesbezüglich noch Forschungsbedarf. Insofern werden die Ergebnisse der beiden neuen Bohraufschlüsse von großem Interesse sein. Zudem sind im Dammbereich elektromagnetische Messungen geplant, von denen zusätzliche Erkenntnisse über die Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund erwartet werden.

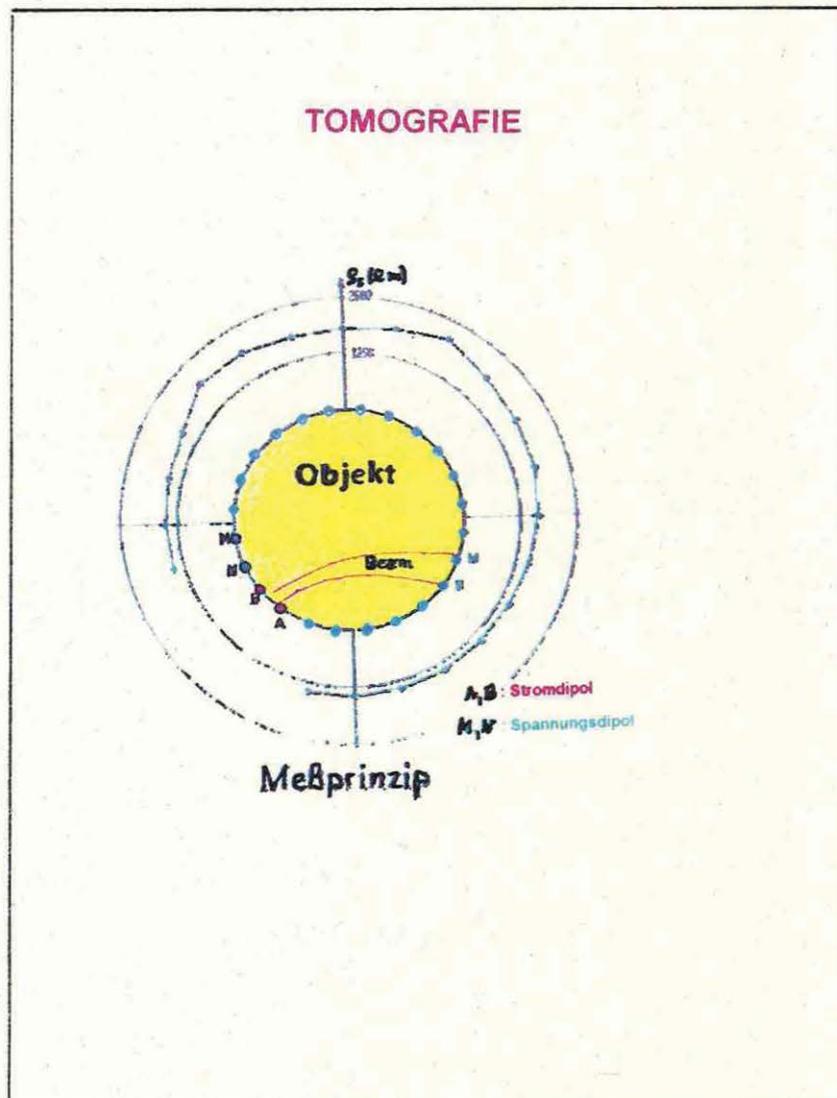
Über das Deponiegelände verteilt und im unmittelbaren Dammbereich befinden sich bereits eine Reihe von Beobachtungspegeln. Im Dammbereich bzw. in unmittelbarer Ufernähe sind dies, von NNE nach SSE betrachtet, die Pegel GWBR 3978, GWBR 3977, GWBR 3976 und GWBR 7u. Von diesen vier Pegeln befand sich zum Zeitpunkt der geophysikalischen Messungen allein der Pegel GWBR 3976 im Bereich der nachgewiesenen Kontaminationsfahne. In diesen Pegeln waren zudem Messungen der **Milieuparameter** vorgenommen worden. Insbesondere die Parameter elektrische Leitfähigkeit und Redoxpotential werden mit den Ergebnissen der geophysikalischen Verfahren Gleichstromelektrik und Eigenpotential in Verbindung gebracht. Im Fortgang der Diskussion sollen die aus **Abb. 3** ersichtliche Anordnung der vier genannten Pegel und die dort registrierten Milieuparameter betrachtet werden.

Pegel	Leitfähigkeit (mS/cm)	Redoxpotential (mV)
GWBR 3978	3.8	?
GWBR 3977	42.8	-52
GWBR 3976	75.7	-222
GWBR 7u	15.9	-19

Für den Bereich des Pegels 3976, der sich nach den Ergebnissen der Geophysik im Zentralbereich der Kontaminationsfahne befinden muß, wurden also tatsächlich adäquate Milieuparameter festgestellt.

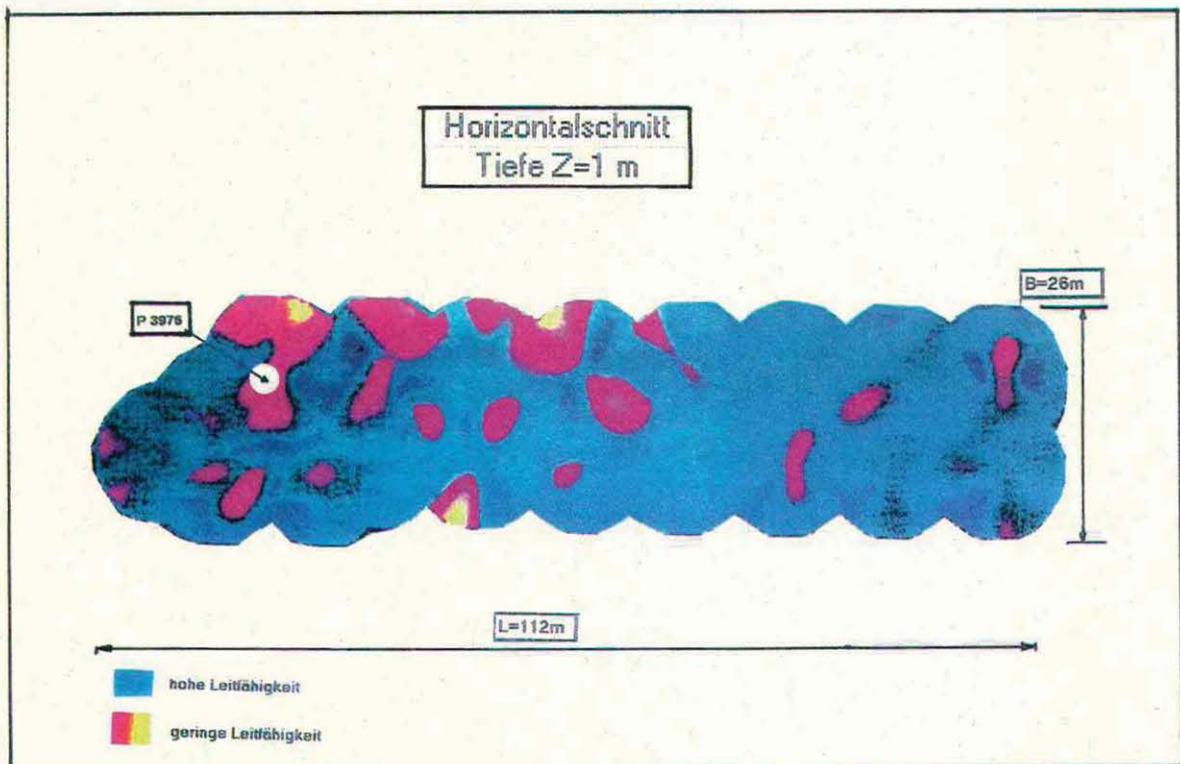
Das Gebiet um den Pegel 3978 ist offensichtlich nicht oder kaum kontaminiert.

Die bisher vorgenommenen Betrachtungen zu den Verhältnissen des dem Restsee vorgelagerten Untergrundes waren ein- oder zweidimensionalen Charakters. Mit dem erst kürzlich von der Universität Leipzig entwickelten Meßverfahren der **Gleichstromtomographie** können die elektrischen Eigenschaften des Untergrundes nunmehr räumlich abgebildet werden. Beim gegenwärtigen Entwicklungsstand des Verfahrens werden 25 Elektroden in Kreisauflistung ( $D=16\text{m}$ ) auf dem Erdboden angebracht (**Abb. 5**).



**Abb. 5:** Meßarray für Gleichstromtomographie

Es werden jeweils zwei Elektroden als Strom- und Spannungselektroden in der sogenannten Dipol-Dipol-Konfiguration adressiert, und diese Adressierung erfolgt auf dem Umfang des Meßkreises in Stufen rotierend. Die Eindringtiefe bzw. Sensitivität des mit Gleichstrom arbeitenden Verfahrens beträgt derzeit nur 8 bis 10 m. Der Untergrund wird von den sphärischen Stromlaufbahnen quasi kreisförmig durchstrahlt. Dieser durchstrahlte Bereich wird im mathematischen Sinne in kleine Einzelzellen unterteilt. Aus den gemessenen Spannungen werden Widerstände berechnet, die den Einzelzellen zugeordnet und mit theoretisch berechneten Werten iterativ verglichen werden (Vorwärtsmodellierung). Bei der Interpretation können, unter Berücksichtigung der Eindringtiefe, Schnitte beliebiger Orientierung vom Untergrund angefertigt werden. Mit modernen Bildverarbeitungsverfahren ist es möglich, die Kontaminationsstrukturen räumlich vom Gesamtumfang der Meßdaten zu trennen und herauszupräparieren. In den **Abb. 6 u. 7** sind in einer Teilstufe der Interpretation die Ergebnisse von Horizontalschnitten in zwei Teufenlagen des Damms sowie ein Vertikalschnitt dargestellt. Die gelb- bis rotfarbenen Flächen kennzeichnen Bereiche hohen Widerstandes, die blaufarbenen Zonen dagegen niederohmige Bereiche.



**Abb.6:** Ergebnisse der Gleichstromtomographie

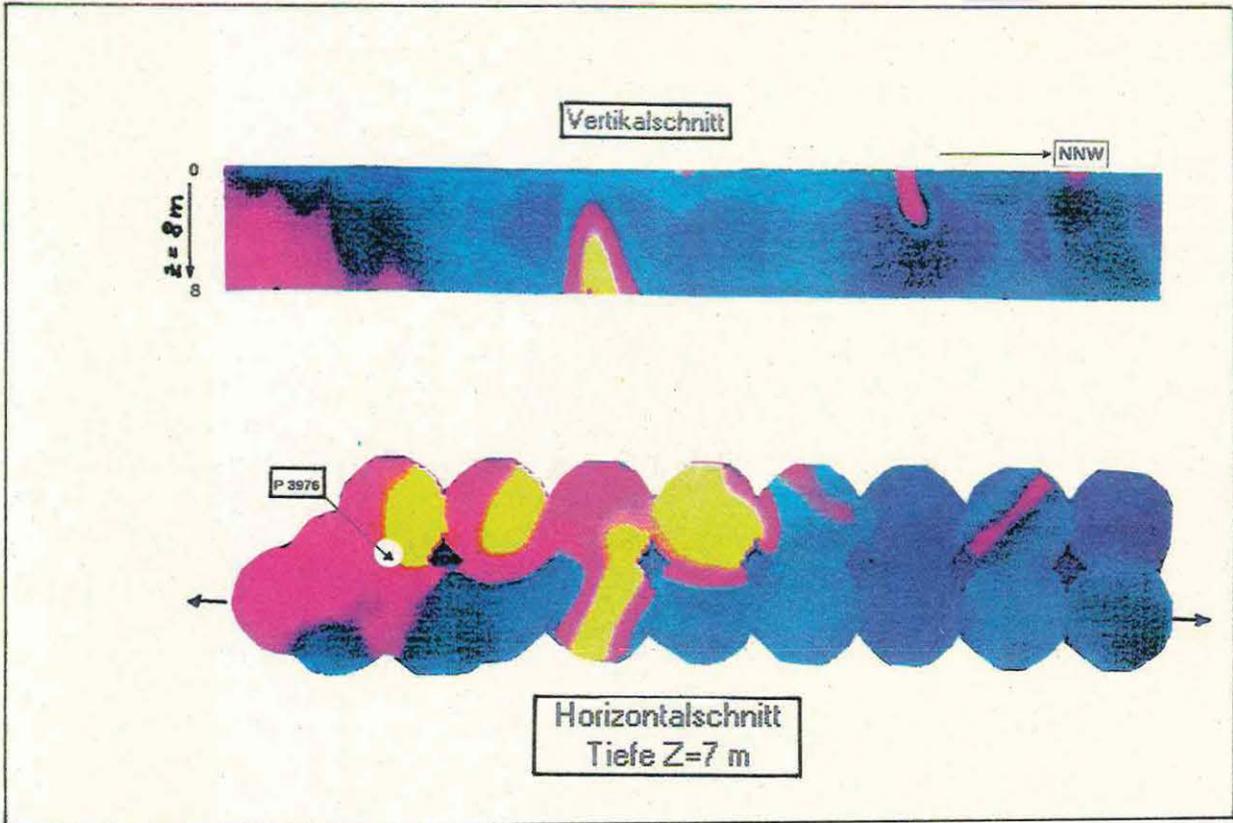


Abb.7: Ergebnisse der Gleichstromtomographie

Eine quantitative Meßwertstufung ist selbstverständlich möglich, in der o.a. Prinzipdarstellung wurde darauf verzichtet. Im Bereich des Pegels 3976 ist der Untergrund bis etwa 8m unter Rasensohle durch einen hohen spezifischen Widerstand gekennzeichnet. Die niederohmigen, tieferliegenden Bereiche wurden durch das Meßverfahren (noch) nicht erfaßt.

Mit einer Eindringtiefe von 8-10m erreicht das Verfahren gegenwärtig noch nicht die Bereiche, die in ehemaligen Bergbaugeländen oft Gegenstand von umweltrelevanten Untersuchungen sind. Die Universität Leipzig und das UFZ suchen aber derzeit gemeinsam nach Wegen zu einer Vergrößerung der Eindringtiefe des Verfahrens, einerseits durch eine Veränderung der Elektrodengeometrie, andererseits durch Anregung des Meßsystems mit elektromagnetischen Wellen. Diese Untersuchungen werden u.a. im sensiblen Bereich des Damms am Hufeisensee stattfinden. **Anregungen zum Einsatz auf anderen Problemflächen werden zudem gern zur Kenntnis genommen.** Ziel dieser Untersuchungen ist es, ein praxisorientiertes Meßverfahren zu entwickeln, welches es gestattet, ohne Zuhilfenahme von kostenintensiven Bohrungen ein räumliches Bild von den Verhältnissen im Untergrund zu vermitteln.

Eine quantitative Meßwertstufung ist selbstverständlich möglich, in der o.a. Prinzipdarstellung wurde darauf verzichtet. Im Bereich des Pegels 3976 ist der Untergrund bis etwa 8m unter Rasensohle durch einen hohen spezifischen Widerstand gekennzeichnet. Die niederohmigen, tieferliegenden Bereiche wurden durch das Meßverfahren (noch) nicht erfaßt.

Mit einer Eindringtiefe von 8-10m erreicht das Verfahren gegenwärtig noch nicht die Bereiche, die in ehemaligen Bergbaugeländen oft Gegenstand von umweltrelevanten Untersuchungen sind. Die Universität Leipzig und das UFZ suchen aber derzeit gemeinsam nach Wegen zu einer Vergrößerung der Eindringtiefe des Verfahrens, einerseits durch eine Veränderung der Elektrodengeometrie, andererseits durch Anregung des Meßsystems mit elektromagnetischen Wellen. Diese Untersuchungen werden u.a. im sensiblen Bereich des Damms am Hufeisensee stattfinden. **Anregungen zum Einsatz auf anderen Problemflächen werden zudem gern zur Kenntnis genommen.** Ziel dieser Untersuchungen ist es, ein praxisorientiertes Meßverfahren zu entwickeln, welches es gestattet, ohne Zuhilfenahme von kostenintensiven Bohrungen ein räumliches Bild von den Verhältnissen im Untergrund zu vermitteln.



# UFZ-Bericht

UFZ-Bericht • UFZ-Bericht • UFZ-Bericht • UFZ-Bericht

Nr. 4/1995

---

**Beiträge  
zum Workshop  
*"Braunkohlebergbaurestseen"***

---

**24.-25. November 1994  
in Bad Lauchstädt**

Sektion Hydrogeologie  
UFZ-Umweltforschungszentrum  
Leipzig-Halle GmbH