

## Möglichkeiten und Grenzen untertägiger Geoelektrikmessungen im Salz

A. Just, Y. Krause, F. Jacobs

Universität Leipzig, Institut für Geophysik und Geologie, Talstraße 35, 04103 Leipzig  
Email: [ajust@rz.uni-leipzig.de](mailto:ajust@rz.uni-leipzig.de)

**Kurzfassung:** Aufgrund der großen Variationen des spezifischen elektrischen Widerstandes von Salzgestein in Abhängigkeit vom Wassergehalt sind geoelektrische Untertagemessungen in Salzbergwerken gut geeignet, um streckennahe Feuchtezonen zu detektieren. Allerdings ergeben sich aus den speziellen Untertage-Bedingungen im hochresistiven Salzgestein kompliziertere Randbedingungen für Messung, Auswertung und Interpretation.

Es werden Ergebnisse geoelektrischer Untertagemessungen entlang einer Strecke in einem noch aktiven Kalibergwerk in einem Salzstock und Kreisprofil-Messungen in einer Carnallitit-Strecke in einem ehemaligen Kalibergwerk in flacher Lagerung vorgestellt. Zur Untersuchung des Einflusses der dreidimensionalen Umgebung der Strecke auf die Messergebnisse wurden 3D Finite-Elemente-Modellierungen durchgeführt.

### 1. Einleitung

Salzgestein wird aufgrund seiner petrophysikalischen Eigenschaften (geringe Porosität und Permeabilität) als geeignetes Wirtsgestein für die Lagerung gefährlicher chemotoxischer Abfälle in Untertagedeponien (UTD) und für die Endlagerung radioaktiver Abfälle angesehen. Im Zusammenspiel mit der geotechnischen Barriere muss die geologische Barriere (Wirtsgestein) die Kontamination der Umgebung mit Schadstoffen verhindern.

Um die Sicherheit der geologischen Barriere einer UTD beurteilen zu können, ist ihre zerstörungsfreie Untersuchung und räumliche Erkundung zwingend notwendig und vom Gesetzgeber vorgeschrieben. Hierfür sind in besonderer Weise geophysikalische Messverfahren geeignet, weil die Barriere nicht durch Streckenvortrieb oder Bohrungen beschädigt werden darf. Aber auch im normalen Bergwerksbetrieb ist der Einsatz geophysikalischer Methoden (auch in Ergänzung zu Bohrungen) zur Erkundung vorteilhaft, weil Bohrungen nur punktuelle Informationen liefern und gerade sicherheitsrelevante Bereiche verfehlen können.

Die Bedingungen für die Anwendung geophysikalischer Methoden untertage im Salzgestein sind jedoch nicht günstig:

- durch den Verlauf der Strecken und Schächte sind bestimmte Messanordnungen vorgegeben,
- die Messanordnung befindet sich im Vollraum, dadurch ergibt sich eine größere Mehrdeutigkeit der Messsignale als an der Erdoberfläche und die Interpretation ist erschwert (Einflüsse aus allen drei Raumrichtungen),
- untertage herrschen schwierige Umgebungsbedingungen.

Die Entwicklung und Anwendung eines komplexen Mess- und Auswerteinstrumentariums für die untertägige Erkundung von Problemzonen der geologischen Barriere von Endlagern und UTD im Salinar war Gegenstand von drei seit 1998 durch das BMBF geförderten Forschungsprojekten (Fkz. 02C0558, -568, -578, KULENKAMPFF et al. 2002a). Im ehemaligen Kalibergwerk Bischofferode (Südharz) konnten mit einer solchen Kombination geophysikalischer Verfahren bisher unbekannte laugenführende Bereiche im Hangenden einer Abbau-strecke detektiert und charakterisiert werden (KULENKAMPFF et al. 2002a, KURZ et al. 2002).

Im Rahmen von drei Folgeprojekten (BMBF 02C0851, -861, -871) zum Thema „Geophysikalische Erkundung als Beitrag zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern und UTD“ mit den beteiligten Institutionen

- Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA) Hannover (Georadar und elektromagnetische Methoden),
- Institut für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig (Geelektrik)
- Geophysik GGD Leipzig und K-UTEC Sondershausen (seismische Methoden) sowie Ingenieurbüro Dr. Arnold Schwandt, Erfurt (Geologie)
- Fraunhofer-Einrichtung für Akustische Diagnostik und Qualitätssicherung (EADQ) Dresden (Sonar)

wurde das geophysikalische Instrumentarium mit dem Ziel der Weiterentwicklung und Verallgemeinerung auf einen anderen Standort, eine Bergwerksstrecke in einem Salzstock, angewendet. Dabei wurden auch geelektrische Messungen durchgeführt.

Geelektrische Untertagemessungen in Salzbergwerken sind insbesondere gut geeignet, um streckennahe Feuchtezonen zu detektieren, da Salzgestein in Abhängigkeit vom Wassergehalt große Widerstandsvariationen aufweist. Der spezifische elektrische Widerstand schwankt von  $<100 \Omega\text{m}$  für laugengefüllte Bereiche bis  $>10^8 \Omega\text{m}$  für trockenes Salzgestein. Es werden geelektrische Untertagemessungen entlang der Strecke in einem noch aktiven Kalibergwerk in einem Salzstock (Standort I) sowie Kreisprofil-Messungen in einer Carnallitit-Strecke in einem ehemaligen Kalibergwerk in flacher Lagerung (Standort II) vorgestellt.

## 2. Geelektrische Untertage-Messungen

### 2.1. Standort I: Strecke in einem Kalibergwerk in einem Salzstock

Die Messungen wurden in einem aktiven Kalibergwerk in Niedersachsen durchgeführt. Das Bergwerk befindet sich in einem Salzstock, einer 12 km langen, nordwest-südost streichenden

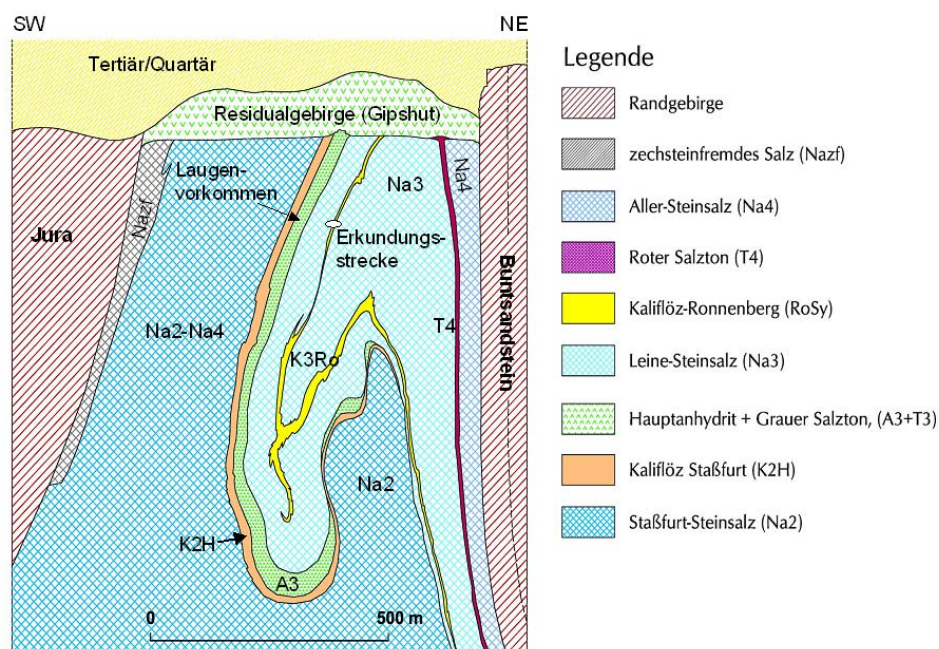


Abb. 1: Schematischer Schnitt durch den Salzstock. Die Messstrecke liegt senkrecht zum hier skizzierten Schnitt.

Salzsattelstruktur, deren Schichten stark verfaultet und zerschert sind (Abb. 1).

Insbesondere der tektonisch verformte Hauptanhydrit (A3) stellt eine potentielle Problemzone dar. Von zwei Horizontalbohrungen von einer Strecke in etwa 500 m Tiefe aus wurden Laugenvorkommen im Hauptanhydrit festgestellt, deren Erkundung das Ziel der geophysikalischen Messungen war.

Das geoelektrische Messprofil (Abb. 2) wurde am Stoß der Strecke mit einer der Horizontalbohrungen als Nullpunkt in einer Höhe von 1.20 m angelegt. Die Gesamtlänge des Profils betrug 318 m bei einem Elektrodenabstand von 2 m und 160 Elektroden.

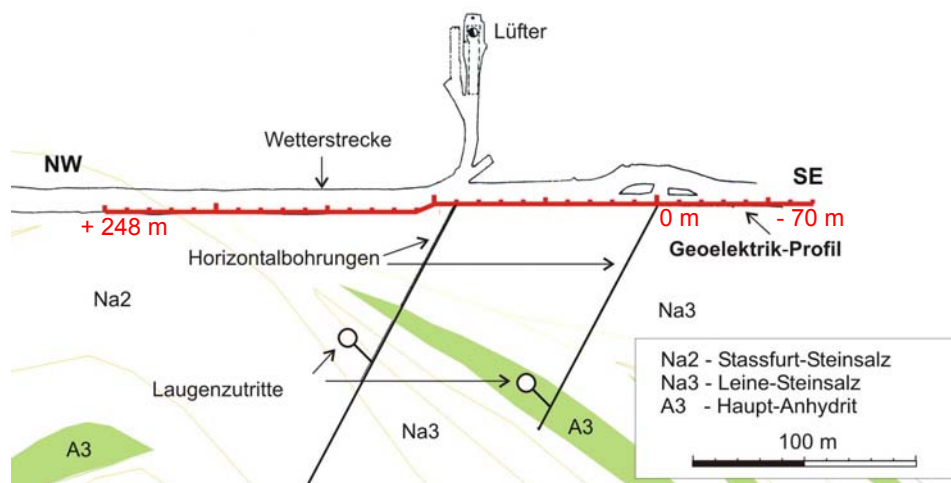


Abb. 2: Horizontalschnitt der Mess-Sohle mit Lage des Geoelektrik-Profiles

In drei Messkampagnen wurden mehrere überlappende Dipol-Dipol-Pseudosektionen (Dipolweite 2 m) mit einem maximalen Dipolabstand von 124 m aufgenommen. Als Messgerät kam dabei die 6-kanalige DC-Geoelektrik-Apparatur RESECS (GeoServe Kiel) mit maximal 4 Elektrodenketten mit je 16 Elektroden zum Einsatz. Ein Vorteil des Gerätes bei Messungen im Salz mit hohen Übergangswiderständen ist die Konstantspannungsquelle (intern 0 bis 120 V) im Zusammenhang mit einer Strommessung. Während der RESECS-Messungen wurden gleichzeitig bis zu 28 Transientenrekorder (RefTek, Refraction Technology Inc., USA) eingesetzt, die bei jeder Stromeinspeisung durch die RESECS-Apparatur zusätzliche Spannungsregistrierungen liefern (siehe Abb. 3). Auf diese Weise ist es prinzipiell möglich, größere Eindringtiefen zu erreichen (Dipolabstände hier bis 224 m) und den Messfortschritt zu erhöhen.

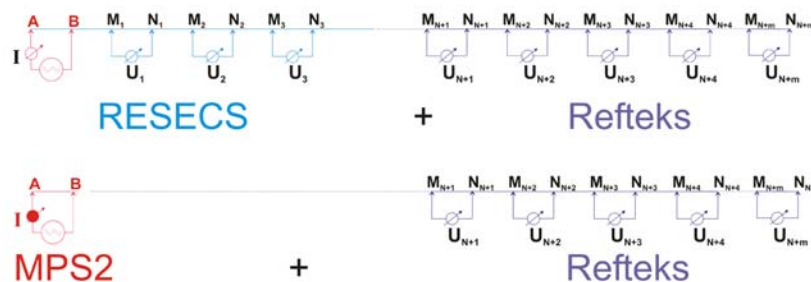


Abb. 3: Verwendete Messanordnungen mit Kombination verschiedener Messgeräte.

Allerdings müssen die als Zeitreihen vorliegenden Daten später einer speziellen Auswertung unterzogen werden. Dazu wurde die von FRIEDEL (2000) und KNIEB (2002) entwickelte Software DCTrap genutzt. Zur Messung mit großen Dipolabständen (bis 224 m) wurden auch einige Messungen mit einer Hochspannungsquelle MPS 2 (Eigenentwicklung des Institutes für Geophysik und Geologie Leipzig, BRUNNER 2001), die bei einer Versorgungsspannung von lediglich 12 V Speisespannungen bis 1.5 kV liefert, als Quelle und RefTekS zur Spannungsregistrierung durchgeführt. Die Abbildung 3 zeigt schematisch die verwendeten Messanordnungen. Als Elektroden wurden Keilnägel (Länge 8 cm, Durchmesser 6 mm) verwendet, die mit Magnesia-Zement oder Bentonit, jeweils angemischt mit Salzlauge, befestigt wurden.

Als problematisch erwiesen sich die Ankopplung der Elektroden am extrem ausgetrockneten Stoß und die Abschaltungen. Diese Bedingungen resultierten aus der Lage eines Teiles des Messprofils in der Wetterstrecke im Abstrombereich eines Lüfters. Selbst eine permanente Befeuchtung der Elektroden während der Messungen konnte dort die teilweise extrem schnelle Austrocknung nicht verhindern. Infolge dessen traten selbst für Salzgestein extrem hohe Übergangswiderstände von bis zu  $1 \text{ G}\Omega$  in den vom heißen Abwetterstrom betroffenen Profilabschnitten auf. Die eingespeisten Ströme lagen - bei Speisespannungen zwischen 4 und 120 V - im südlichen Profilbereich (-70 m bis +40 m) zwischen 0.01 und 10 mA, im übrigen Bereich bei maximal 20-30  $\mu\text{A}$ , meist deutlich darunter (Abb. 4).

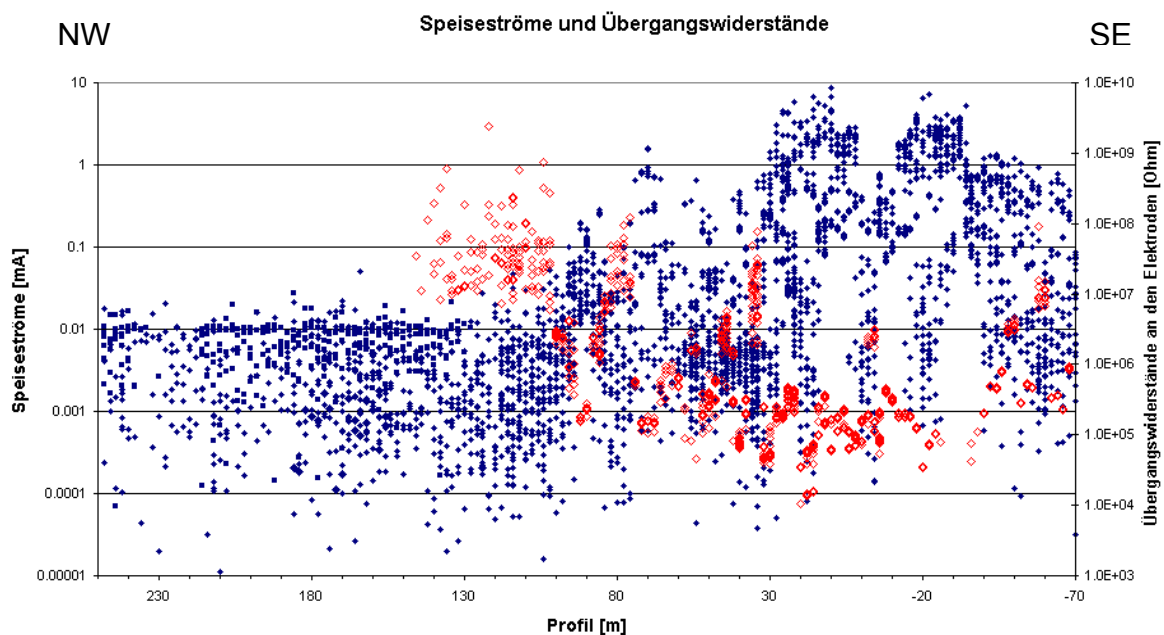


Abb. 4: Speiseströme (blau, geschlossene Symbole) bei Speisespannungen zwischen 4 und 120 V und Übergangswiderstände (rot, offene Symbole) im Profilabschnitt mit Aufzeichnung der Speisespannung

In Abbildung 5 sind die scheinbaren spezifischen Widerstände (insgesamt ca. 9300 Einzelmessungen, nach Mittelung mehrfach gemessener Konfigurationen ca. 5200 Werte) als Pseudosektion dargestellt. Die Pseudosektion zeigt große Variationen der scheinbaren spezifischen Widerstände mit Werten zwischen  $<100 \text{ }\Omega\text{m}$  und  $>10^{10} \text{ }\Omega\text{m}$ . Im südöstlichen Profilabschnitt liegen die Werte zwischen  $10^2$  und  $10^6 \text{ }\Omega\text{m}$ , während im nordwestlichen Abschnitt scheinbare spezifische Widerstände von  $10^6$  bis  $>10^{10} \text{ }\Omega\text{m}$  gemessen wurden. Die Werte wurden mit korrigierten Konfigurationsfaktoren, die mit Hilfe von 3D Finite-Elemente-

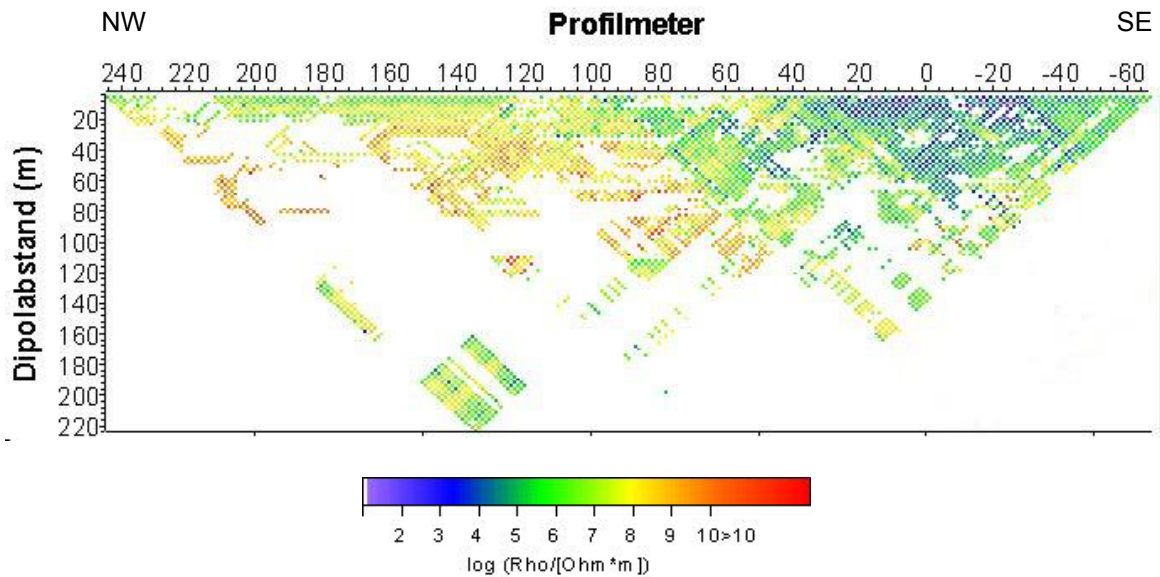


Abb. 5: Darstellung aller Rohdaten als Pseudosektion.

Modellierungen (siehe Abschnitt 3) für ein Referenzmodell der Grubenhohlräume berechnet wurden, aus den Rohdaten (Strom und Spannung) berechnet.

Für die Inversion der Daten wurde das 2D-Inversionsprogramm DC2DSIRT von KAMPKE (1996) verwendet, wobei die Widerstände logarithmiert wurden. Das resultierende Widerstandstiefenmodell (Abb. 6) weist sehr große Widerstandscontraste mit Werten von  $10^3$  bis  $>10^{10} \Omega\text{m}$  auf. Relativ niedrige spezifische Widerstände findet man im Bereich um die Horizontalbohrungen. Ein ausgedehntes Widerstandsminimum mit Werten um  $1000 \Omega\text{m}$  befindet sich etwa zwischen Profilmeter -40 m und 40 m. Die niedrigsten Werte ( $<1000 \Omega\text{m}$ ) erreicht der spezifische elektrische Widerstand zwischen Profilmeter 0 m und 20 m sowie bei

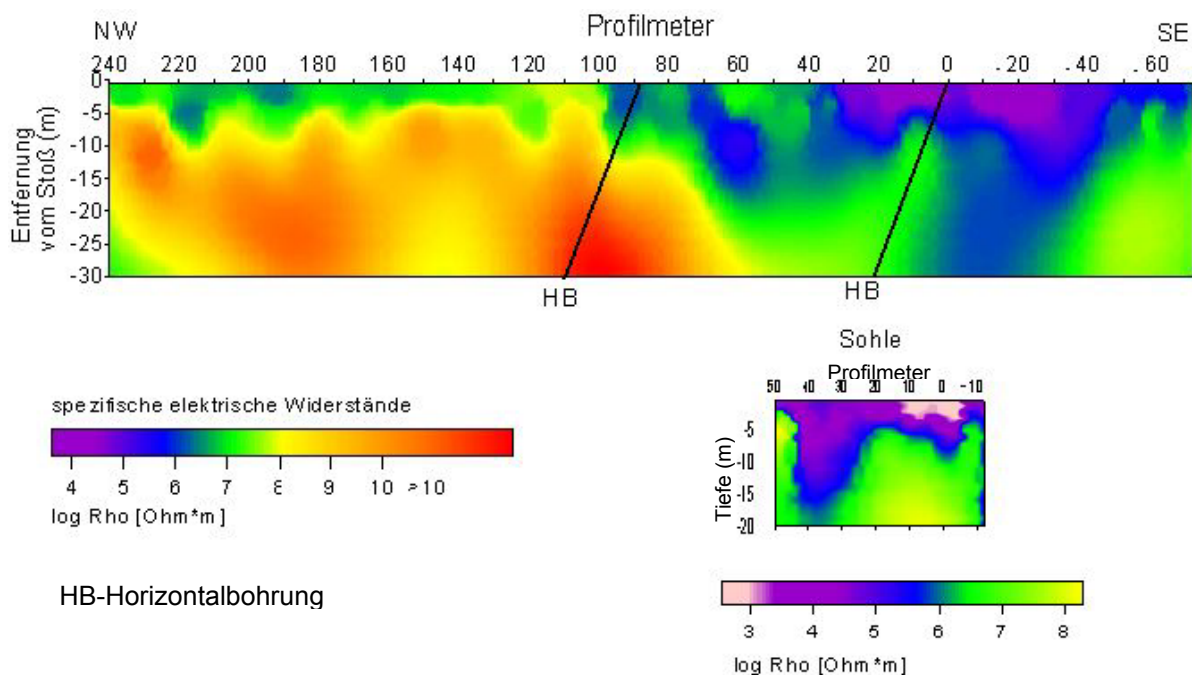


Abb. 6: 2D-Widerstandsverteilung im Horizontalschnitt durch das Stoßprofil und Vertikalschnitt unter der Sohle (Inversion mit DC2DSIRT von A. KAMPKE, 1996).

–20 m. Dieses deutliche Minimum ist eine klare Indikation für eine ausgedehnte Feuchtezone, die durch den Bohrprozess bedingt sein kann und mit dem erbohrten Laugenvorkommen in 60 bis 80 m Entfernung vom Stoß korrespondieren könnte. Das Laugenvorkommen selbst ist jedoch zu weit vom Profil entfernt, um mit den durchgeführten Geoelektrikmessungen detektiert werden zu können.

Im Profilbereich 0 m bis 100 m treten moderate Widerstandswerte ( $10^7$  bis  $10^8 \Omega\text{m}$ ) auf mit einem lokalen Minimum ( $10^5 \Omega\text{m}$ ) bei Profilmeter 60 m. Im nördlichen Teil (ab 100 m) nehmen die Widerstände ab Tiefen von etwa 10 m bis auf Werte von  $10^8$  bis  $>10^{10} \Omega\text{m}$  zu. Bei 95 m, 190 m und 220 m deuten sich lokale Widerstandsminima mit Werten zwischen  $10^5$  und  $10^6 \Omega\text{m}$  an. Die Leitfähigkeitsanomalie bei 220 m mit Werten um  $10^6 \Omega\text{m}$  scheint mit einem aus dem Stoß tretenden Radarreflektor zu korrelieren. Das Widerstandsminimum kann durch die stärkeren hygroskopischen Eigenschaften eines dort austreichenden dünnen Hart-salzbandes verursacht sein. Auch das Widerstandsminimum im Bereich der Bohrung bei 0 m steht im Einklang mit Ergebnissen der anderen geophysikalischen Verfahren (JACOBS et al. 2004). So findet sich in etwa 20 m Tiefe ein Radarreflektor, der bei Profilmeter 80 m ausstreicht und einen streckennahen Bereich mit Anhydritmittelsalzen abgrenzt. Sonarmessungen ergaben im Bereich um diese Bohrung erhöhte Reflektivitäten und bruchtektonische Elemente. Solche mechanisch beanspruchten Bereiche können Migrationswege für Salzlösungen eröffnen, was die geoelektrisch ausgewiesene Feuchtezone erklären kann.

Zusätzlich zum Stoßprofil wurde ein kurzes, stoßparalleles Profil an der Sohle im Abstand von 1.5 m vom Stoß, ebenfalls in Dipol-Dipol-Anordnung, gemessen. Dies ergab im Bereich zwischen –5 m und +13 m mit Werten um  $300 \Omega\text{m}$  besonders niedrige Widerstände (Abb. 6 rechts unten). Offensichtlich findet sich dort eine besonders hohe Durchfeuchtung. Dies steht ebenfalls im Einklang mit Radarmessungen (IGEL et al. 2003). An dieser Stelle setzt ein durch eine unter der Strecke gelegene andere Strecke bedingter, sonst sehr deutlicher Radarreflektor aus.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass an diesem Standort trotz der schwierigen Messbedingungen und dem Problem der 3D-Umgebung signifikante Ergebnisse erzielt werden konnten. Es ergaben sich große Widerstandskontraste ( $10^3$  bis  $>10^{10} \Omega\text{m}$ ) und eine deutliche Indikation für eine ausgedehnte Feuchtezone. Sonar- und Radarmessungen weisen im Bereich des Widerstandsminimums erhöhte Reflektivitäten auf, die auf eine mechanisch beanspruchte Zone deuten.

## **2.2. Standort II: Ringprofil in einer Carnallitit-Strecke**

An einem anderen Standort, in einer Strecke im ehemaligen Kalibergwerk Teutschenthal, wurden geoelektrische Messungen zur Standortcharakterisierung eines Verschlussbauwerkes in einer Carnallitit-Strecke durchgeführt.

In der Grube Teutschenthal, westlich von Halle (Sachsen-Anhalt), wurde bis 1982 das Kalisalz des Kaliflözes Staßfurt in einer Teufe von 600 bis 900 m abgebaut. Die Schichten sind flachgelagert mit einem schwachen Einfallen nach Norden (BODENSTEIN et al. 1998). Gegenwärtig findet eine Verwahrung der Grube und eine Untertageverwertung von Industrieabfällen statt. Um die Langzeitsicherheit der Grube zu gewährleisten, ist es aufgrund der örtlichen Besonderheiten nötig, ein Grubenfeld gegenüber dem restlichen Grubengebäude durch den Bau von Streckenverschlüssen abzudichten. Mit der Lösung der Aufgaben der Standortcharakterisierung sowie Planung und Spezifikation des zu errichtenden

Verschlussbauwerkes ist eine Projektgruppe unter Leitung des Grubenbetreibers, der GTS Teutschenthal GmbH, befasst.

Die abzudichtende Strecke befindet sich im Carnallit (Stratigraphie in Abb. 7). Problematisch ist der hohe Anteil des Minerals Tachhydrit (ca. 10 %) und seine Zersetzung in der Wetterfeuchtigkeit sowie die damit verbundene Hohlrumbildung im Gebirge. Im Bereich der Untersuchungslokalität sind bis mindestens 20 cm tief in den Stoß hinein ausgewitterte Kieseritbänder aufgeschlossen. Der schmierige Verwitterungsrückstand lässt auf schichtparallel zu den Kieseritlagen orientierte ursprüngliche Einlagerungen des Minerals Tachhydrit schließen. Die Ausbildung dieser Zersetzungsfront, der chemischen Auflockerungszone, in Zusammenhang mit der mechanischen Auflockerungsfront ist das wesentliche Problem für die Konzeption der Streckenverschlüsse. Es ist also von großem Interesse, wie weit die chemische Auflockerungszone und die Durchfeuchtung in das Gebirge hineinreichen.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Gebirgsmechanik (IfG) Leipzig wurden in Ergänzung zu den Untersuchungen der Projektgruppe geoelektrische Messungen in der Strecke durchgeführt. Da hier insbesondere die radiale (tiefenabhängige) und azimuthale Widerstandsverteilung von Interesse war, wurde ein kreisförmiges Profil mit 32 Elektroden über den Streckenquerschnitt (siehe Abb. 7) angelegt. Als Elektroden kamen wie beim ersten Standort Keilnägel zum Einsatz, die mit Bentonit befestigt wurden. Als Messgerät wurde ebenfalls die RESECS-Apparatur verwendet. Es wurde eine Kreispseudosektion in Dipol-Dipol-Anordnung gemessen. Im Gegensatz zum Standort I waren die Messbedingungen hier infolge der hohen Durchfeuchtung der Strecke unkompliziert, die Übergangswiderstände lagen in der Größenordnung von 1.5 bis 2 k $\Omega$ .

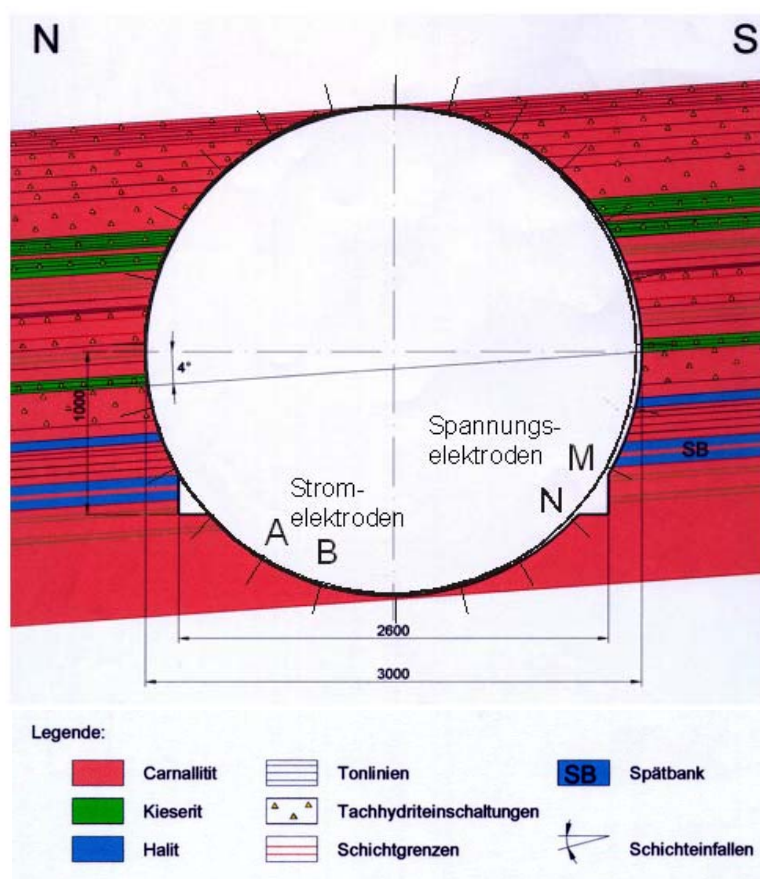


Abb. 7 : Streckenquerschnitt mit Stratigraphie (vorläufige Arbeitsunterlage O. Landsmann, K-UTEC Sondershausen) und Elektrodenanordnung.

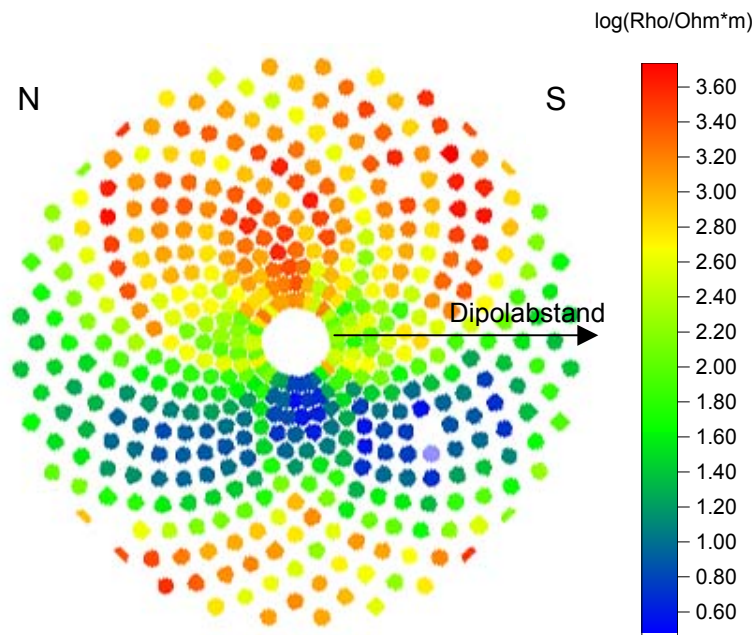


Abb. 8: Kreispsudosektion (32 Elektroden in Dipol-Dipol-Anordnung).

Zur Auswertung wurden die Messwerte zunächst als Kreispsudosektion dargestellt (Abb. 8). Die Berechnung der Konfigurationsfaktoren erfolgte dabei mit dem 3D Finite-Differenzen-Modellierungsprogramm für Zylinder Mod3DZyl (JUST 2001) anhand eines homogenen Hohlzylinders mit einem Innenradius von 1.5 m und einem Außenradius von 300 m. In der Kreispsudosektion zeigen sich insgesamt relativ niedrige scheinbare spezifische Widerstände ( $<10$  bis maximal  $10^4 \Omega\text{m}$ ), was auf die allgemeine Durchfeuchtung zurückzuführen ist. Besonders niedrige Werte (5 bis  $10 \Omega\text{m}$ ) treten im Bereich der Sohle auf.

Um ein vorhandenes Inversionsprogramm anwenden zu können, wurde die Kreispsudosektion in Viertelsegmente unterteilt und in rechteckige Abschnitte transformiert („aufgerollt“). Dabei wurden nur die Elektrodenanordnungen berücksichtigt, bei denen alle 4 Elektroden innerhalb des Viertelkreises lagen. Die 32 einzelnen, sich überlappenden Segmente ergeben ineinandergelegt ein Band, das als normale Pseudosektion invertiert werden kann. Diese Prozedur entspricht quasi einem Aufrollen des inneren Teiles der Kreispsudosektion. Zur Inversion wurde anschließend das 2D-Programm DC2DSIRT (KAMPKE 1996) verwendet. Nach der Inversion wurde die erhaltene Widerstands-Tiefen-Verteilung wieder in die Kreisdarstellung rücktransformiert.

Das Ergebnis zeigt Abbildung 9. Es treten insgesamt für Salzgestein sehr niedrige spezifische elektrische Widerstände ( $5 \Omega\text{m} - 10000 \Omega\text{m}$ ) auf, was mit einer hohen Durchfeuchtung des Gebirges in Streckennähe zu erklären ist. Besonders niedrige Widerstandswerte finden sich im Bereich der Sohle, d.h. die Sohle ist extrem durchfeuchtet. Unter der Sohle konnte dann auch durch Nachgrabung eine Ansammlung von freier Lauge in etwa 20 cm Tiefe gefunden werden. An der Firste sind die Widerstände mit bis zu  $10000 \Omega\text{m}$  höher und nach oben zunehmend. Die Durchfeuchtung ist dort wesentlich geringer und vermutlich schnell abnehmend. An den Stößen liegt das Widerstandsniveau bei  $100-1000 \Omega\text{m}$ , d.h. es existiert hier auch eine deutliche Durchfeuchtung, die nach 1m noch nicht gänzlich zu verschwinden scheint. Sie ist im Bereich der Kieseritbänder erhöht, was auf eine schichtparallele Feuchtigkeitsaufnahme mit zusätzlichem Verwitterungseffekt schließen lässt. Nach etwa 0.5 m scheint diese starke Durchfeuchtung abzuklingen. Die Steinsalzschiefer in Sohlennähe



verursacht Widerstandsmaxima. Da im Bereich der Sohle die Annahme einer Kreisgeometrie nicht zutrifft, da die Sohle planparallel aufgeschüttet ist, kommt es allerdings zu einer geometrischen Verzerrung.

Im oberen Bereich stimmt die Neigung der Widerstandsschichtung tendenziell mit dem Einfallen der Schichten ( $4^\circ$  nach N) überein.

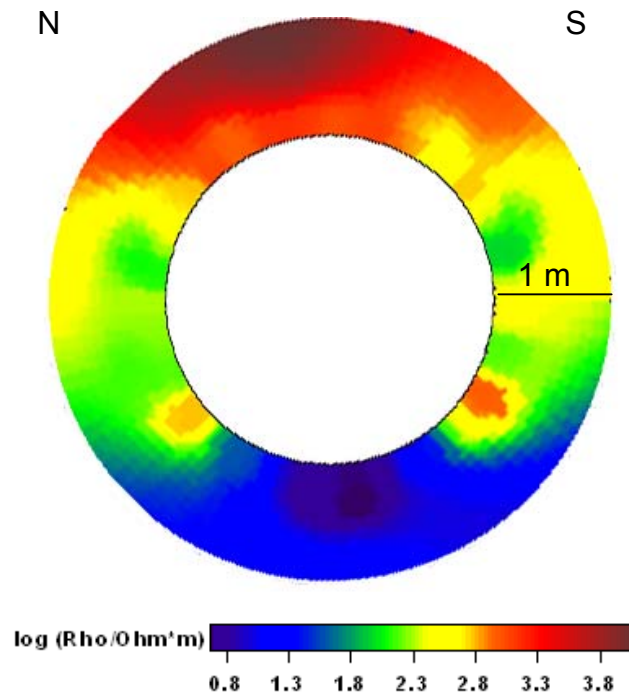


Abb. 9: Widerstandsverteilung im Ringraum (bis 1m Tiefe) um die Strecke.

Insgesamt konnte hier in der Strecke in einer geschichteten Lagerstätte die Schichtenfolge in ihrer vertikalen Heterogenität elektrisch abgebildet werden, wobei die Laugenansammlung in der Sohle ebenfalls zu einer Leitfähigkeitsanomalie führt.

Die Auswertung der Messungen erfolgte durch die Anwendung eines 2D-Inversionsprogrammes, das für linienhafte Messanordnungen konzipiert ist. Eine Verbesserung ist durch die Weiterentwicklung und Anwendung von Algorithmen, die auf einer Zylindergeometrie basieren, zu erwarten. Damit könnten dann auch alle Konfigurationen der Kreispseudosektion (bisher nur die kleinen Dipolabstände, nur die Elektroden, die innerhalb eines Viertelkreises liegen) berücksichtigt werden, was zu einer Vergrößerung der Eindringtiefe führen sollte. Bei der vorgegebenen Streckengeometrie (Streckendurchmesser 3m) kann die bisherige maximale Eindringtiefe mit 0.5 bis 1 m abgeschätzt werden.

### 3. 3D Finite-Elemente-Modellierungen

Bei Geoelektrikmessungen auf einem Profil in einer Bergwerksstrecke muss von einer Vollraumsituation ausgegangen werden. Für zunehmende Abstände zwischen Strom- und Spannungselektroden werden die Messungen von der Hohlraumgeometrie der Strecke, von anderen nahen Grubenhohlräumen sowie vom umgebenden Gebirge beeinflusst. Dieser systematische Einfluss auf die Messdaten, der allein auf die dreidimensionale Gestalt der

Hohlraumoberflächen zurückzuführen ist, kann als ein Topografieeffekt des Grubengebäudes bezeichnet werden (RÜCKER 2004). Insbesondere für eine zweidimensionale Messanordnung stellt der dreidimensionale Einfluss des Grubengebäudes bei der Auswertung und Interpretation eine potentielle systematische Fehlerquelle dar. Mit Hilfe dreidimensionaler numerischer Modellierung für eine Referenzhohlraumgeometrie kann der Einfluss der Grubenhohlräume auf die Messdaten quantifiziert und im Konfigurationsfaktor berücksichtigt werden.

Mit zunehmender Auslagenweite der Messanordnung tritt zunächst der 3D-Einfluss des Hohlraums der Messstrecke auf, der sich im Übergang von Halbraum- zu Vollraum-Bedingungen zeigt. Zur Untersuchung des Übergangsbereiches entlang der Strecke wurde für einen quaderförmigen, 5 m hohen Hohlraum variabler Breite und für jede Position der auf einem achsenparallelen Profil, 1.20 m hoch an der Seitenwand befindlichen Stromelektroden die dreidimensionale Potentialverteilung mit der Methode der Finiten Elemente (3DFE) für einen homogenen Gebirgs-widerstand von  $10^6 \Omega\text{m}$  modelliert. Aus der durch den Streckenhohlraum bedingten Abweichung des scheinbaren spezifischen Widerstands vom Wert für den homogenen Wert wurde der numerische Konfigurationsfaktor ( $K[3DFE]$ ) berechnet. Bezogen auf den Wert des Halbraum-Konfigurationsfaktors  $K[HR]$  variiert der 3DFE-K-Faktor geometriespezifisch zwischen 1 bei Halbraum- und 2 bei Vollraumbedingungen (Abb.10).

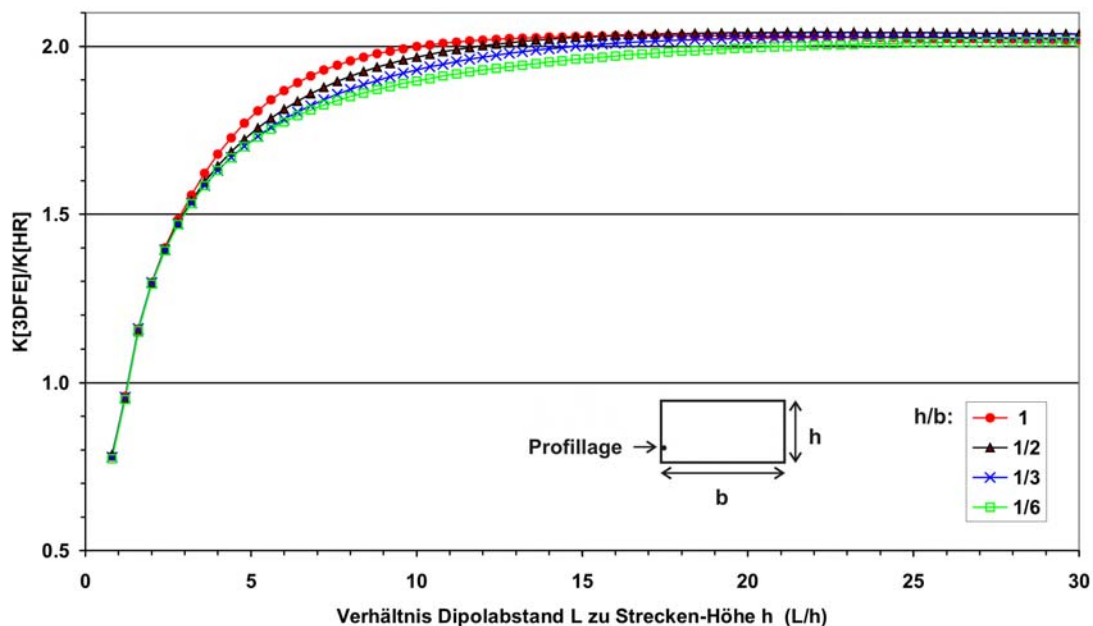


Abb. 10: Verhältnis des modellierten Konfigurationsfaktors  $K[3DFE]$  zum Konfigurationsfaktor für den Halbraum  $K[HR]$  für einen quaderförmigen Streckenhohlraum und ein achsenparalleles, seitlich in 1.20 m Höhe gelegenes Profil in Abhängigkeit vom Verhältnis Dipolabstand zu Höhe und Einfluss des Höhen-Breiten-Verhältnisses  $h/b$  der Strecke auf den Halbraum-Vollraum-Übergang für eine Dipol-Dipol-Anordnung.

Für eine gleichseitige Strecke ergeben sich für die modellierte Konfiguration Vollraum-Bedingungen ab einem Dipolabstand-zu-Streckenhöhen Verhältnis von  $L/h \approx 10$ . Das Modell, das etwa dem Hohlraumquerschnitt der Messstrecke im Bergwerk (Standort I) entspricht (Breite 10 m und Firsthöhe 5 m), liefert einen Dipolabstand von etwa 60 m ( $L/h \approx 12$ ), ab dem bereits Vollraum-Bedingungen gelten. Die im Bergwerk verwendeten Dipolabstände lagen zwischen 4 m und 224 m.

Mittels 3D-Modellierung konnte der Einfluss der Messstrecke sowie auch der Einfluss des aus mehreren Hohlräumen bestehenden komplexeren Grubengebäudes in den geoelektrischen Messdaten kompensiert werden. Der Korrektoreffekt auf die Daten stellte sich jedoch aufgrund der großen Widerstandskontraste, die im Salz gemessen wurden (mehr als 6 Größenordnungen), in diesem Fall als vernachlässigbar klein heraus.

Die 3D Finite-Elemente-Modellierungen für den Streckenhohlraum wurden mit der Software FEMLAB (COMSOL AB) durchgeführt. Die komplexeren Hohlraumgeometrien für das Grubengebäude wurden mit der opensource C++-Bibliothek DCFEMLib (RÜCKER 2004) modelliert, die speziell für die gleichstromgeoelektrische Problemstellung entworfen wurde.

#### **4. Zusammenfassung und Diskussion**

Geoelektrische Messungen untertage im Salz weisen spezielle Probleme auf:

- Schwierige Messbedingungen infolge hoher Übergangswiderstände an den Elektroden
- Erschwerte Auswertung und Interpretation: Die Messungen erfolgen meist linienhaft entlang einer Strecke. Daraus ergeben sich Mehrdeutigkeiten, da das komplizierte 3D-Grubengebäude die Messungen beeinflusst. Bei Messungen auf Kreisprofilen ist eine angepasste Inversion erforderlich, aber nicht einfach zu realisieren.
- Die quantitativen Zusammenhänge mit gesteinsphysikalischen Größen sind nicht eindeutig.

Die messtechnischen Probleme infolge hoher Übergangswiderstände an den Elektroden können durch die Verwendung von Messgeräten mit hoher Eingangsimpedanz (mindestens 30 M $\Omega$ ), mit Konstantspannungsquelle und Strommessung in Verbindung mit geeigneten Ankopplungsmethoden weitgehend gelöst werden. Die Auswertung und Interpretation der Messungen kann durch numerische Modellierungen unter Einbeziehung der geometrischen Strukturen des Grubengebäudes und anderer a priori – Informationen verbessert werden. Das Problem der Mehrdeutigkeit der Zuordnung von Anomalien im dreidimensionalen Raum kann teilweise durch die Kombination verschiedener Anordnungen (mehrere linienhafte Profile, Kreisprofile, kombinierte Anordnungen in verschiedenen Strecken) gelöst werden.

Zur quantitativen Interpretation bedarf es petrophysikalischer Laboruntersuchungen der Zusammenhänge des spezifischen elektrischen Widerstandes mit gesteinsphysikalischen Größen. Dazu sei hier auf die Literatur (z. B. KULENKAMPPF & YARAMANCI 1993, YARAMANCI 1994) sowie auf eigene Arbeiten (KULENKAMPPF et al. 2002a,b, JACOBS et al. 2004) verwiesen.

Unter Berücksichtigung der aufgeführten Probleme und unter Einbeziehung von Modellierungen ist die Geoelektrik ein geeignetes Verfahren zur zerstörungsfreien Detektion und Charakterisierung von Feuchtezonen im Gebirge. Dies konnte anhand der Ergebnisse in einer Bergwerksstrecke in einem Salzstock gezeigt werden konnte. Mit einem Ringprofil in einer Strecke konnte aufgrund der unterschiedlichen Durchfeuchtung die Schichtung der Lagerstätte abgebildet werden.

Die Geoelektrik ist prinzipiell zum untertägigen Einsatz bei der Erkundung der geologischen Barriere von UTD und Endlagern, aber auch zur Standortcharakterisierung sowie Überwachung von untertägigen Verschlussbauten geeignet.

## 5. Danksagung

Die Arbeiten wurden vom BMBF gefördert (Fkz. 02C0861). Dank gebührt der K+S Kali AG für die Unterstützung bei den Messungen und die Bereitstellung der geologischen Informationen sowie der GTS Teutschenthal GmbH und dem Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig für die Unterstützung der Messungen in Teutschenthal.

## 6. Literatur

- BODENSTEIN, J., MINKLEY, W., STAUFENBIEL, W. (1998): Sicherungsmaßnahmen im stillgelegten Kalibergwerk Teutschenthal – Versatz mit betriebsfremden Stoffen.- In: Restabfallbehandlung, Deponietechnik, Entsorgungs-bergbau und Altlastenproblematik. Hengerer et al. (Hrsg.), Balkena, Rotterdam, ISBN 90 5809 023 X.
- BRUNNER, I. (2001): Beiträge zur geoelektrischen Potentialtomographie für die Ermittlung von Leitfähigkeitsunterschieden im Untergrund. – Dissertation, Universität Leipzig und Shaker Verlag Aachen, ISBN 3-8265-8663-8.
- FRIEDEL, S. (2000): Über die Abbildungseigenschaften der geoelektrischen Impedanztomographie unter Berücksichtigung von endlicher Anzahl und endlicher Genauigkeit der Messdaten.- Dissertation, Universität Leipzig und Shaker Verlag Aachen, ISBN 3-8265-7587-3.
- KAMPKE, A. (1996): Modellierung und Inversion von Daten der induzierten Polarisation für zweidimensionale Verteilungen der elektrischen Leitfähigkeit. Diplomarbeit. Institut für Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig.
- IGEL, J., KURZ, G., SCHULZ, R. (2003): Detektion von Feuchtezonen im Salinar mit dem Georadar (GPR).- Ext. Abstr., 10 S., Elektronischer Tagungsband zum Kolloquium „Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis“, 3.-4.7.2003, Universität Karlsruhe.
- JACOBS, F., JUST, A., KRAUSE, Y., TUCH, A., KNIEB, R., SCHUCK, A., SCHULZ, R., KURZ, G., IGEL, J., LINDNER, U., SCHICHT, T., SCHWANDT, A., KÜHNICKE, H., SCHULZE, E. (2004): Geophysikalische Erkundung als Beitrag zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern und Untertagedeponien. Abschlussbericht zu den BMBF-Forschungsvorhaben Fkz. 02C0851, 02C0861, 02C0871, Leipzig 2004, in Druck.
- 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.
- KNIEB, R. (2002): Untersuchungen zum Signal-Rausch-Verhältnis geoelektrischer Signale. Diplomarbeit, Institut für Geophysik und Geologie, Universität Leipzig.
- KULENKAMPPF, J., ASCHMANN, L., JUST, A., BERGMANN, K., MOISE, E., JACOBS, F., SCHUCK, A., LINDNER, U., SCHWANDT, A., KURZ, G., FLUCHE, B., SCHULZ, R., KÜHNICKE, H., REUTTER, O., SCHUBERT, F. (2002a): Komplexes Mess- und Auswertearmamentarium für die untertägige Erkundung von Problemzonen der geologischen Barriere von Endlagern und Untertagedeponien (UTD) im Salinar. Abschlussbericht zu den BMBF-Forschungsvorhaben Fkz. 02C0558, 02C0568, 02C0578, Leipzig 2002.
- KULENKAMPPF, J., JUST, A., JACOBS, F. (2002b): Geophysical detection and evaluation of risk zones in a sylvinitic mine by underground measurements and laboratory investigations.- EGS Meeting, 21.-26.4.2002, Nice.
- KULENKAMPPF, J., YARAMANCI, U. (1993): Frequency-dependent complex resistivity of rock- salt samples and related petrophysical parameters, *Geophysical Prospecting* 41, 229-239.
- KURZ, G., ASCHMANN, L., JACOBS, F., KULENKAMPPF, J., MOISE, E., SCHUCK, A., SCHULZ, R. (2002): Auswertekonzept zur geophysikalischen Erkundung von Problemzonen im Salinar.- *Zeitschrift für Angewandte Geologie*, 48 (2/02), 56-62, Hannover.
- RÜCKER, C. (2004): 3D-FEM Widerstandsmodellierung unter Verwendung von unstrukturierten Tetraederdiskretisierungen. In: Proc. 20. Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung (Hrsg. A. Hördt & K. Spitzer), Königstein / Sächsische Schweiz, 29.9. – 03.10.2003. Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, 2004.
- YARAMANCI, U. (1994): Relation of in situ resistivity to water content in rock salts, *Geophysical Prospecting* 41, 229-239.