

A. Weller

Permeabilitätsbestimmung mit komplexen Widerstandsmessungen

1. Einleitung

Bei geoelektrischen und elektromagnetischen Messungen wird im allgemeinen davon ausgegangen, daß die Leitfähigkeit eine reelle, frequenzunabhängige Größe ist. Elektrische Untersuchungen an Gesteinsproben belegen, daß die Leitfähigkeit neben dem ohmschen Anteil auch einen Imaginärteil besitzt und daß beide Komponenten eine Frequenzabhängigkeit aufweisen. Beide Phänomene haben ihre Ursache im Aufbau der Gesteine aus mehreren Phasen. Die elektrochemischen Vorgänge an der Phasengrenze zwischen der Gesteinsmatrix und der elektrolytischen Lösung im Porenraum sind maßgeblich für die Entstehung einer imaginären Leitfähigkeitskomponente. Gelingt es, die komplexe Leitfähigkeit mit ihren Komponenten meßtechnisch zu erfassen, entsteht die Frage nach den Aussagemöglichkeiten, die mit diesen zusätzlichen Meßgrößen verbunden sind. Petrophysikalische Untersuchungen haben zu Korrelationsbeziehungen geführt, die die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit durch komplexe elektrische Leitfähigkeitsmessungen ermöglichen.

2. Petrophysikalische Grundlagen

Elektrische Labormessungen an Sanden, Tonen und tonhaltigen Sandsteinen zeigen, daß die komplexen elektrischen Eigenschaften von Parametern der Porenraumgeometrie (Porosität, spezifische Oberfläche), der Wassersalinität und weiteren Merkmalen abhängen (VINEGAR & WAXMAN 1984, BÖRNER & SCHÖN 1991, BÖRNER 1992). Zum besseren Verständnis des komplexen elektrischen Verhaltens von Lockergesteinen sollen die grundlegenden Beziehungen aufgezeigt werden, die Ausgangspunkt für die Ableitung interessierender Gesteinsparameter sind. Die elektrischen Eigenschaften poröser, permeabler und wassergesättigter Gesteine können im Frequenzbereich von 10^{-3} bis 10^3 Hz nach BÖRNER (1992) wie folgt charakterisiert werden:

Die Leitfähigkeit ist eine frequenzabhängige komplexe Größe. Das gleichzeitige Auftreten von Volumen- und Grenzflächenleitfähigkeiten in Gesteinen bedingt, daß tatsächlich eine sogenannte effektive Leitfähigkeit σ^* (OLHOEFT 1979) gemessen wird. Bei allen untersuchten Gesteinen zeigen Real- und Imaginärteil der komplexen Leitfähigkeit σ^* nahezu die gleiche Potenzabhängigkeit von der Frequenz. Im IP-Frequenzbereich kann σ^* mit folgendem Potenzgesetz beschrieben werden:

$$\sigma^*(\omega) = (i\omega)^{1-p} \sigma_n. \quad (1)$$

Für den Real- und Imaginärteil von σ^* gilt entsprechend:

$$\sigma'(\omega) = \omega^{1-p} \sigma'_n, \quad (2)$$

$$\sigma''(\omega) = \omega^{1-p} \sigma''_n. \quad (3)$$

Der die Frequenzabhängigkeit beschreibende Exponent $1 - p$ liegt für Gesteine ohne leitfähige Matrix im Bereich von 0.0001 bis 0.03. Aus den Gleichungen (2) und (3) ergibt

sich ein frequenzunabhängiger konstanter Phasenwinkel ϕ , der zum Frequenzexponenten $1 - p$ proportional ist:

$$\phi = \arctan \left(\frac{\sigma_n''}{\sigma_n'} \right) = \frac{\pi}{2} (1 - p). \quad (4)$$

Auf diese Weise wird die komplexe frequenzabhängige Leitfähigkeit im betrachteten Frequenzbereich allein durch die zwei Parameter σ_n und $1 - p$ beschrieben.

Der Realteil der Leitfähigkeit σ_n' kann als Parallelschaltung einer Volumenleitfähigkeit nach der ARCHIE-Gleichung und einer ohmschen Komponente der Grenzflächenleitfähigkeit σ_i' betrachtet werden:

$$\sigma_n' = \frac{\sigma_w}{F} + \sigma_i' \quad (5)$$

wobei σ_w die Wasserleitfähigkeit und F den Formationsfaktor darstellen. Der Imaginärteil der Leitfähigkeit ist ausschließlich an Grenzflächeneffekte gebunden; es gilt daher:

$$\sigma_n'' = \sigma_i'' \quad (6)$$

BÖRNER & SCHÖN (1991) zeigten, daß der Imaginärteil der Leitfähigkeit σ_n'' im wesentlichen von der auf das Porenvolumen normierten Porenoberfläche S_{por} abhängt. Es gilt vereinfacht:

$$\log(\sigma_n'') \sim \log(S_{por}) \quad (7)$$

Gleichungen (5) und (6) verdeutlichen, daß im Lockergesteinsbereich mit einer reellen elektrolytischen Volumenleitfähigkeit (ARCHIE-Term) und einer komplexen Grenzflächenleitfähigkeit zu rechnen ist.

Es ist allgemein bekannt, daß der Formationsfaktor F im ARCHIE-Term der Gleichung (5) von der Porosität abhängig ist. Für weiterführende Untersuchungen ist der Zusammenhang zwischen der komplexen Grenzflächenleitfähigkeit und der auf den Porenraum bezogenen Porenoberfläche S_{por} von besonderem Interesse. Die praktische Nutzung dieser Beziehung eröffnet die Möglichkeit, die spezifische Oberfläche von Gesteinen oder anderen porösen Materialien mit Hilfe von elektrischen Messungen in situ zu bestimmen. Mit S_{por} wird ein wichtiger struktureller Parameter gewonnen, der in enger Beziehung zum Flüssigkeitstransport in porösen Medien steht. Die elektrischen Parameter $|\sigma|$ und ϕ sind mit Frequenzbereichsmessungen der Induzierten Polarisation (IP) an der Erdoberfläche, in Bohrungen oder in Rammsonden-Löchern zu bestimmen. Aus der Amplitude und der Phase werden Real- und Imaginärteil der elektrischen Leitfähigkeit bestimmt. Der Realteil führt zur Porosität und der Imaginärteil zur Porenoberfläche. Ausgehend von der KOZENY-CARMAN-Gleichung wurde von PAPE, RIEPE und SCHOPPER (1982) eine empirische Gleichung aufgestellt, die für Festgesteine den Formationsfaktor F und die normierte Porenoberfläche S_{por} (in μm^{-1}) mit dem Durchlässigkeitsbeiwert k (in m/s) verknüpft:

$$k = \frac{0.00475}{F(S_{por})^{3.1}} \quad (8)$$

BÖRNER (1993) ermittelte die entsprechenden Koeffizienten für die Anwendung im Lockergesteinsbereich. Diese Gleichung bietet die Möglichkeit, aus den durch komplexe elektrische Messungen errechneten Größen schließlich die Gesteinsdurchlässigkeit zu bestimmen (WELLER & BÖRNER 1992). Abb. 1 zeigt das entsprechende Flußbild.

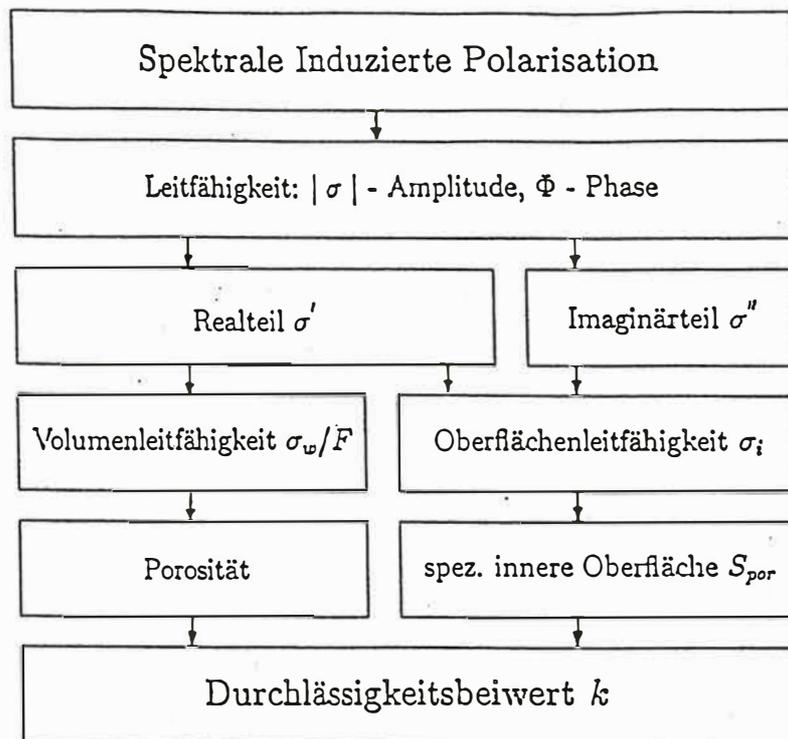


Abbildung 1: Flußbild zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus Messungen der spektralen induzierten Polarisation

3. Messungen in Rammsonden-Löchern

Um den Algorithmus der Durchlässigkeitsbestimmung, der anhand von Labormessungen konzipiert wurde, für den Feldeinsatz zu erproben, wurden Testmessungen in Rammsonden-Löchern durchgeführt. Für diese Messungen sind eine geeignete Meßapparatur und eine entsprechende Meßsonde erforderlich. Da das oben beschriebene Auswerteverfahren auf einer Trennung von Real- und Imaginärteil der elektrischen Leitfähigkeit beruht, wird die Meßmethode der spektralen induzierten Polarisation (SIP) ausgewählt, die Amplitude und Phase des spezifischen elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Frequenz liefert. Für derartige Messungen wird die mehrkanalige PHOENIX-Apparatur V5 eingesetzt, die sowohl Messungen im Zeit- und im Frequenzbereich als auch spektrale IP-Messungen erlaubt. Als Meßsonde dient ein Sondenkörper mit vier Messingelektroden im Abstand $a = 0.15 \text{ m}$. Mit den vier Elektroden können wahlweise WENNER-, Dipol-Dipol-, Pol-Dipol- und Pol-Pol-Anordnungen realisiert werden.

Mit Messungen in Rammsonden-Löchern mußte zunächst der Nachweis erbracht werden, daß unter Feldbedingungen mit einem deutlich höheren Störpegel die im Labor beobachtete Konstanz des Phasenwinkels Gültigkeit hat.

Abb. 2 und 3 zeigen die mit unterschiedlichen Anordnungen aufgenommenen Amplituden- und Phasenspektren. Für kleine Frequenzen bestätigt sich die in Gleichung (1) angenommene Frequenzabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes. Der Widerstand nimmt mit zunehmender Frequenz ab. Bei höheren Frequenzen treten kapazitive (Pol-Pol) oder induktive (Pol-Dipol) Störeinflüsse auf, die durch elektromagnetische Kopp lungseffekte hervorgerufen werden. Die gemessenen Phasenwinkel sind sehr klein; ihre

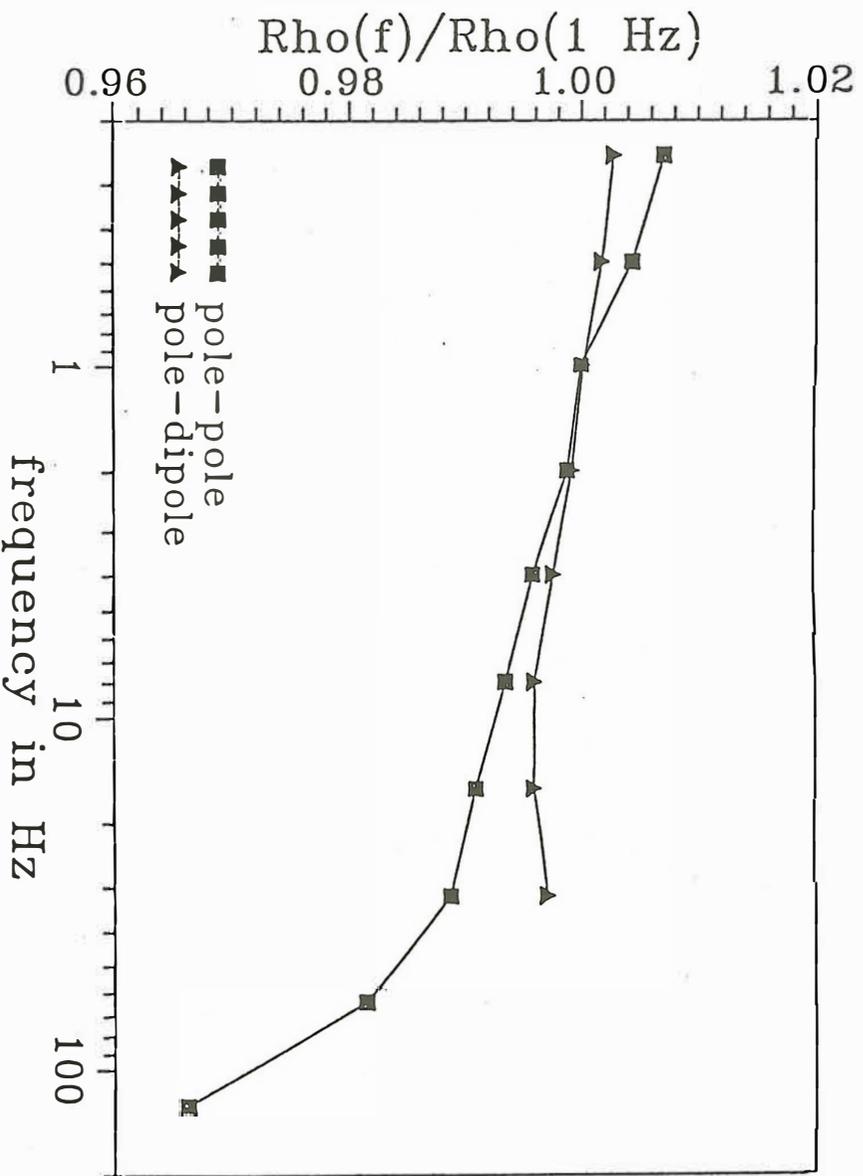


Abbildung 2: Amplitudenspektren bei Pol-Pol- und Pol-Dipol-Anordnungen

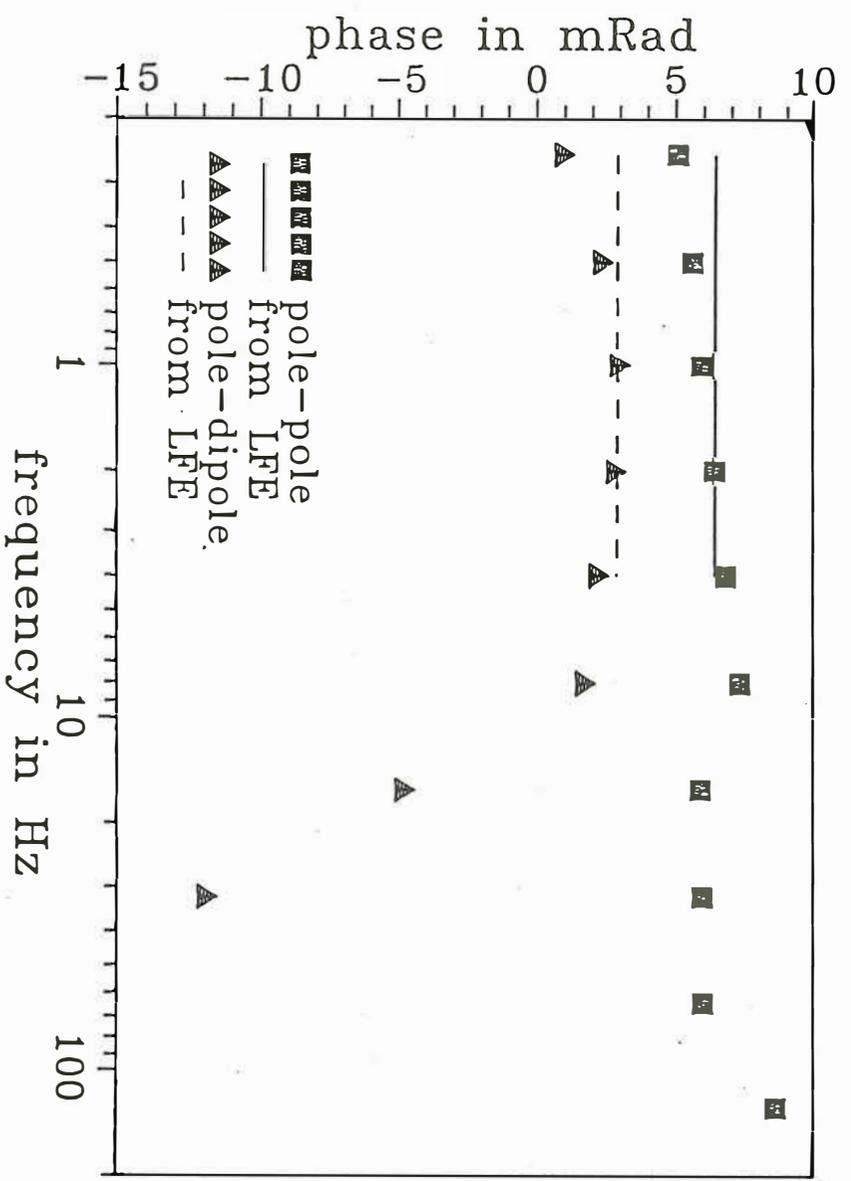


Abbildung 3: Phasenspektren bei Pol-Pol- und Pol-Dipol-Anordnungen

Werte liegen im Bereich von wenigen Milliradian ($1mRad = 0.057^\circ$). Eine exakte Phasenwinkelmessung ist unter Feldbedingungen kaum möglich. Die Meßfehler erreichen die Größenordnung des Meßwertes, daher sind die bei den einzelnen Frequenzen gemessenen Phasenwinkel nicht gleich. Sie liegen aber in der Nähe des Phasenwinkels ϕ , der sich entsprechend Gleichung (4) aus dem Frequenzexponenten $1 - p$ ergibt. In Anlehnung an den bisher bei IP-Messungen gebräuchlichen prozentualen Frequenzeffekt (PFE) hat BÖRNER (1992) vorgeschlagen, den Frequenzexponenten $1 - p$ als logarithmischen Frequenzeffekt (LFE) zu bezeichnen. Für die praktische Meßdurchführung bietet sich an, den Phasenwinkel ϕ über eine Mehrfrequenzmessung aus dem logarithmischen Frequenzeffekt zu bestimmen. Um elektromagnetische Störeinflüsse weitgehend auszuschließen, werden die Messungen in einem Frequenzbereich von 0.25 bis 4 Hz durchgeführt. Der auf diese Weise bestimmte Phasenwinkel wurde in den Phasenspektren der Abb. 3 mit einer Linie markiert; er unterscheidet sich nur wenig vom Mittelwert der gemessenen Phasenwinkel im betrachteten Frequenzbereich.

Die Versuchsmessungen wurden unmittelbar neben Rammkernbohrungen durchgeführt, aus denen Probenmaterial für Vergleiche zwischen dem geophysikalischen Meßwert und dem Laborergebnis zur Verfügung steht. Die lithologische Gliederung ist bekannt. In den interessierenden Teufenbereichen werden im Abstand von 0.15 m die Amplituden- und Phasenspektren des spezifischen elektrischen Widerstandes in einem Frequenzbereich von 0.25 bis 4 Hz aufgenommen, wobei die Frequenz schrittweise um den Faktor 2 geändert wird. Aus dem Amplitudenspektrum wird der Phasenwinkel ϕ bestimmt. Aus dem Imaginärteil der Leitfähigkeit wird die normierte Porenoberfläche S_{por} ermittelt. Für die Berechnung des Formationsfaktors F ist die Kenntnis der Wasserleitfähigkeit erforderlich. Daher sollte den Bohrungen eine Wasserprobe entnommen werden. Auf die derart berechneten Werte für den Formationsfaktor und die Porenoberfläche wird die Gleichung (8) angewandt, um den Wert eines elektrisch bestimmten Durchlässigkeitsbeiwertes k_{el} zu ermitteln. Mit dem skizzierten Verfahren kann für die untersuchten Rammsonden-Löcher ein vertikales Durchlässigkeitsprofil aufgenommen werden.

Die vorgestellte Meßmethode wurde am Teststandort Rabenstein erprobt. Im Umfeld von vier neuen Pegelbohrungen wurden Rammsonden-Löcher niedergebracht, die für ingenieurgeophysikalische Sondierungen und spektrale IP-Messungen genutzt wurden. Die Rammsonden-Löcher stehen wie auch die Pegelbohrungen in bindigem Material verwitterter Schwarz- bzw. Alaunschiefer. Die bisherigen Testmessungen hatten gezeigt, daß die Anwendung des Verfahrens zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus IP-Messungen für bindige Lockersedimente problematisch ist. Abb. 4 zeigt für einen Meßpunkt die mit der spektralen IP-Messung gewonnenen komplexen Leitfähigkeitswerte als Funktion der Tiefe. Daraus wurden die in Abb. 5 dargestellten Durchlässigkeitsbeiwerte bestimmt; sie liegen für diese Messung in einem Bereich von 10^{-9} bis 10^{-7} m/s. Zum Vergleich wurden für einige Proben aus der benachbarten Rammkernbohrung anhand der Kornverteilungskurven die k -Werte ermittelt und in die Darstellung aufgenommen. Die Gegenüberstellung zeigt, daß die mit komplexen Leitfähigkeitsmessungen bestimmten Durchlässigkeitsbeiwerte in derselben Größenordnung liegen wie die aus der Kornverteilung ermittelten Werte. Die Abweichungen erreichen etwa eine Zehnerpotenz. Für die auftretenden Unterschiede gibt es mehrere Ursachen: Die Rammkernbohrung befindet sich in einem Abstand von 1 m vom Rammsonden-Loch; bei den steilstehenden Schichten und

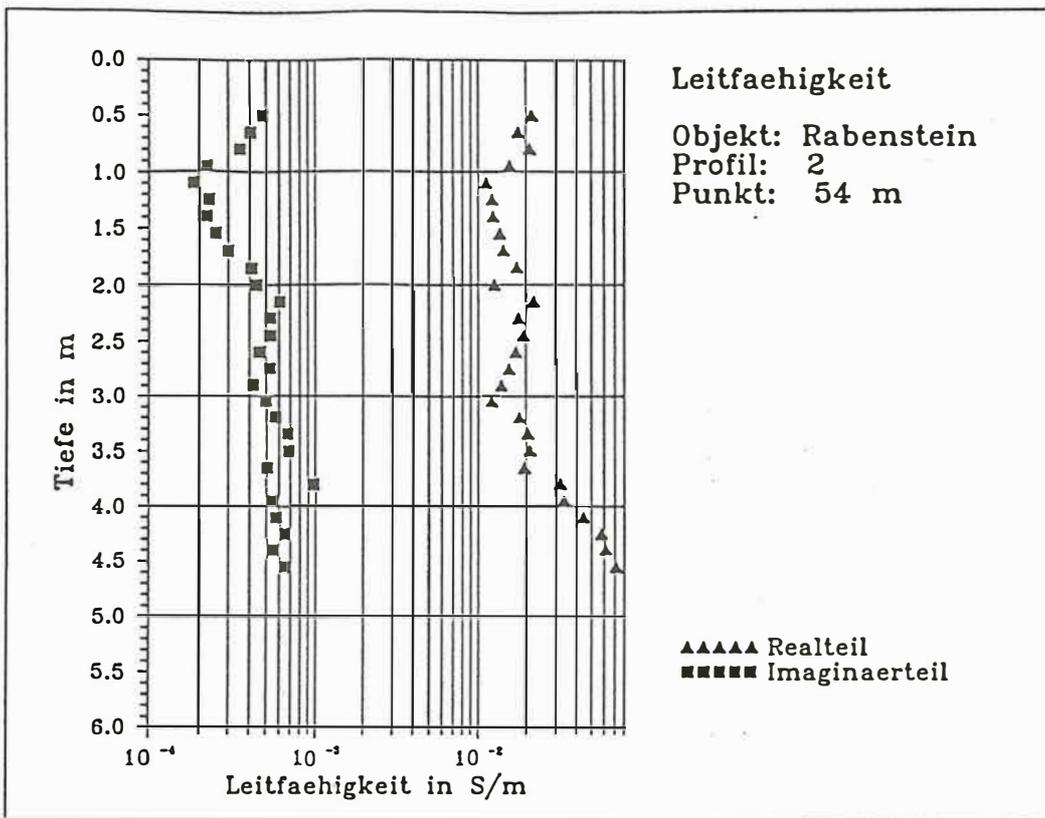


Abbildung 4: Komplexe elektrische Leitfähigkeit für eine Messung in Rabenstein

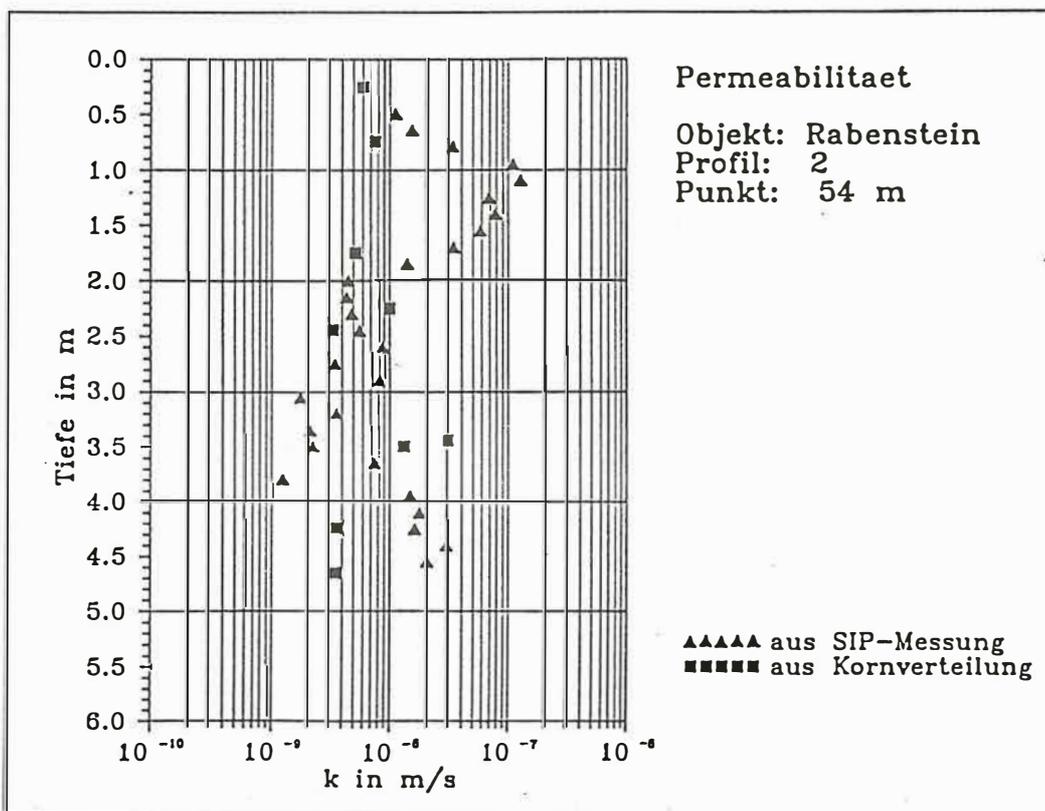


Abbildung 5: Ergebnis der Permeabilitätsbestimmung für eine Messung in Rabenstein

teilweise sehr inhomogenem Material mit unterschiedlichem Verwitterungsgrad können sich bereits bei geringen Entfernungen deutliche Unterschiede ergeben. Der elektrisch bestimmte Durchlässigkeitsbeiwert berücksichtigt im Gegensatz zu dem aus der Kornverteilung ermittelten Wert die natürlichen Lagerungsverhältnisse (Porosität, Struktur), wodurch verfahrensbedingte Abweichungen zu erklären sind.

Beim Abteufen der benachbarten Pegelbohrung RAB 3/93, die im gleichen Material steht, wurden Gesteinsproben entnommen, an denen mit Durchflußmessungen im Triaxialgerät der Durchlässigkeitsbeiwert bestimmt wurde. Die mit diesem recht aufwendigen Verfahren ermittelten k -Werte schwanken zwischen $1 \cdot 10^{-9}$ und $3 \cdot 10^{-8} m/s$ (JÄGER 1994); sie liegen damit in der gleichen Größenordnung wie die für Teufen größer als 2 m mit komplexen Leitfähigkeitsmessungen bestimmten Gesteinsdurchlässigkeiten.

Die Testmessungen in Rabenstein haben gezeigt, daß auch für bindigen Gesteinszersatz das geoelektrische Verfahren zur Durchlässigkeitsbestimmung eingesetzt werden kann. Die damit bestimmten Werte sind mit den Ergebnissen von Labormethoden vergleichbar. Der Vorteil dieser Feldmethodik besteht darin, daß bereits wenige Stunden nach der Messung ein Ergebnis bereitgestellt werden kann.

4. Komplexe Widerstandssondierungen

Die erfolgreiche Anwendung des Algorithmus zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus den in Rammsonden-Löchern gemessenen komplexen Leitfähigkeiten war eine wesentliche Voraussetzung für Versuche, mit Hilfe von komplexen Widerstandssondierungen die hydraulische Durchlässigkeit von einzelnen Schichten des Untergrundes von der Oberfläche aus zu bewerten. Die Messungen werden in Schlumberger-Konfiguration mit Aufstellungsweiten ($AB/2$) von 1,3 bis 100 m durchgeführt. Bei größeren Auslagen werden die Messungen durch elektromagnetische Kopplung beeinträchtigt. Bei jeder Aufstellung wird das Amplituden- und Phasenspektrum im Frequenzbereich von 0,25 bis 4 Hz aufgenommen. Die Auswertung umfaßt die Bestimmung der Widerstandsamplitude $|\rho_s|$ für die Frequenz $\omega = 1 Hz$ und des mittleren Phasenwinkels ϕ , der aus dem logarithmischen Frequenzeffekt ermittelt wird. Die komplexe Widerstandssondierung liefert je eine Sondierungskurve für die Amplitude des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes und für den scheinbaren Phasenwinkel. Aus beiden Kurven wird über ein Inversionsprogramm, das mit Hilfe des MARQUARDT-Algorithmus ein Fehlerfunktional minimiert, ein Schichtmodell berechnet. Für jede Schicht wird eine Leitfähigkeitsamplitude, ein Phasenwinkel und die Schichtmächtigkeit bestimmt. Aus der komplexen Schichtleitfähigkeit wird der Formationsfaktor und die innere Oberfläche berechnet. Mit diesen beiden Werten kann über die Anwendung der Gleichung (8) ein Durchlässigkeitsbeiwert für jede Schicht ermittelt werden.

Abb. 6 und 7 zeigen komplexe Widerstandssondierungskurven aus einem Meßgebiet in der Lausitz. Die Kurven wurden als Dreischichtfall interpretiert, wobei die mittlere Schicht einer Kiesrinne zugeordnet werden kann. In Tab. 1 sind die aus den komplexen Schichtleitfähigkeiten ermittelten Parameter aufgeführt. Die Wasserleitfähigkeit wurde anhand der Meßergebnisse aus benachbarten Pegelbohrungen mit $200 mS/m$ angesetzt. Beim Vergleich der Sondierungskurven fällt auf, daß die Widerstandsamplitude in beiden Fällen einen ähnlichen Verlauf zeigt. Deutliche Unterschiede ergeben sich hingegen im Phasenverlauf. Bei der Kurve B wurden für die Aufstellungsweiten von 32 bis 56 m negative Phasenwinkel gemessen. Daraus resultiert ein Phasenwinkel der zweiten Schicht von 0,9

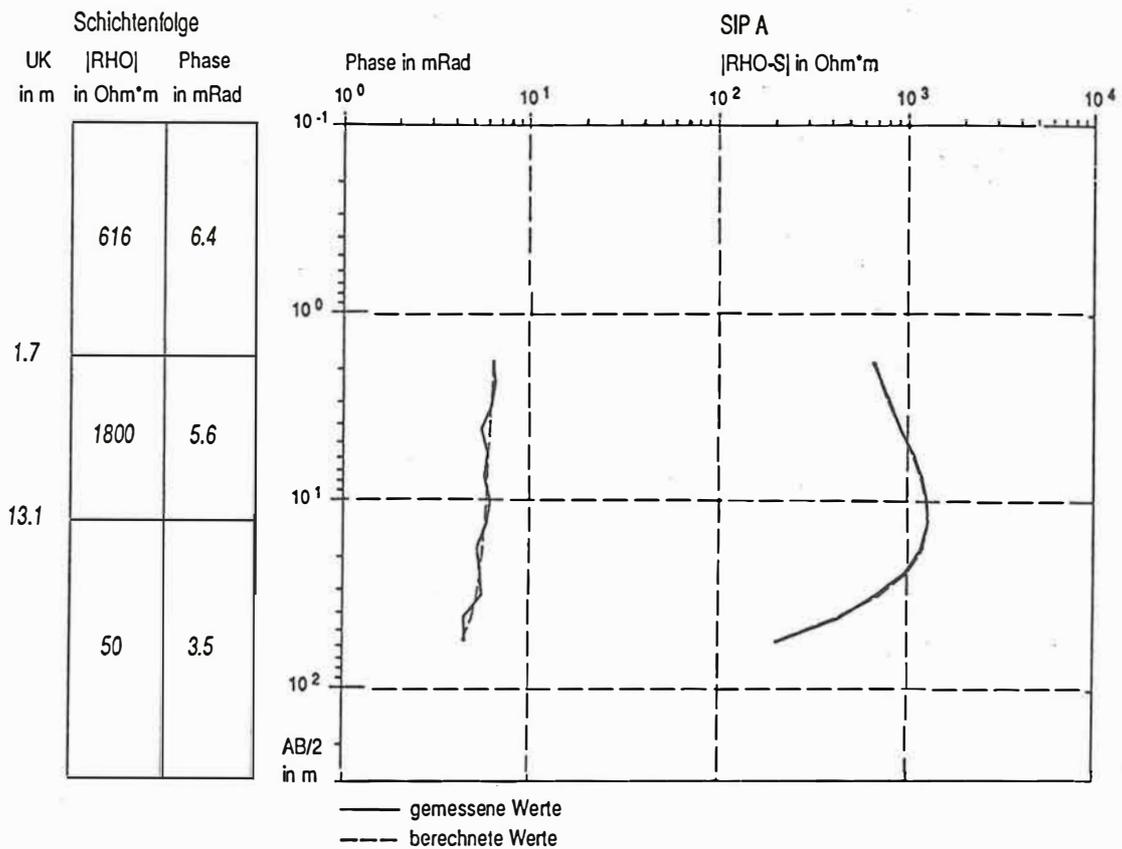


Abbildung 6: Komplexe Widerstandssondierung A

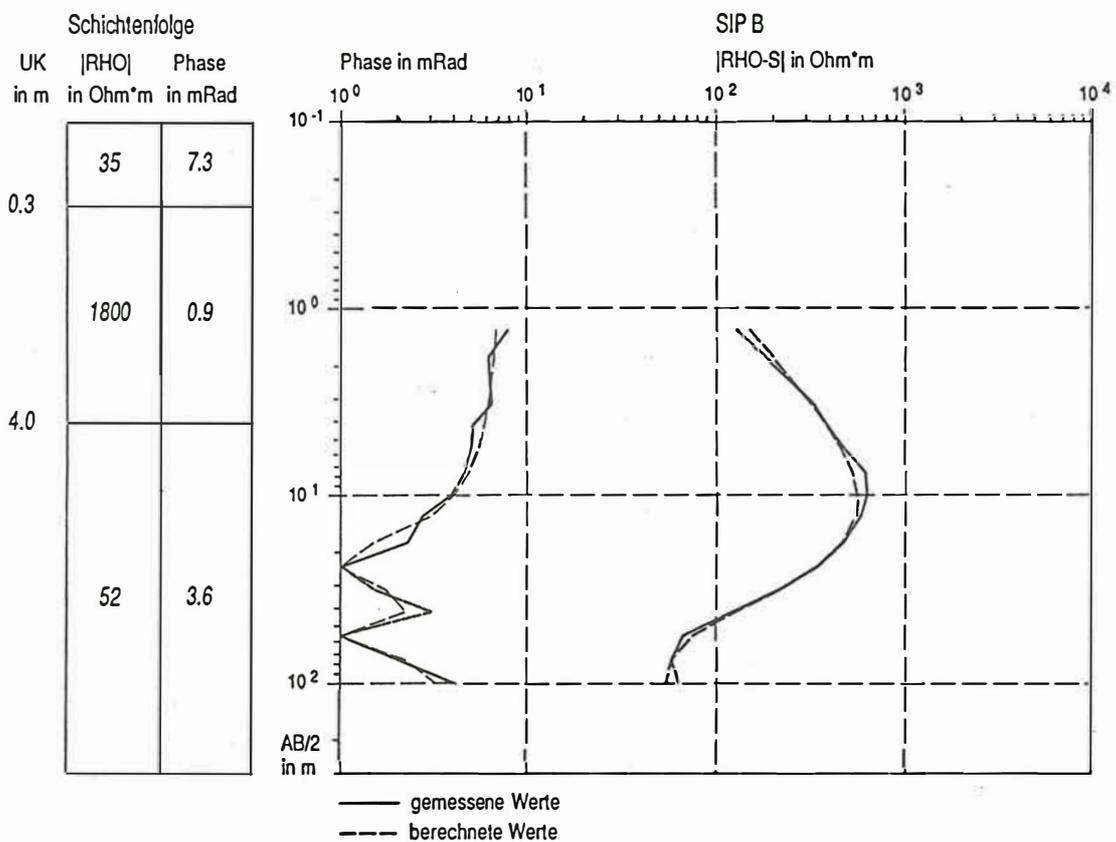


Abbildung 7: Komplexe Widerstandssondierung B

Tabelle 1: Aus komplexen Widerstandssondierungen ermittelte Schichtparameter

Sondierung und Schicht	$ \rho $ [Ωm]	ϕ [$mRad$]	σ'_n [mS/m]	σ''_n [$\mu S/m$]	F -	S_{por} [μm^{-1}]	k [m/s]
A 1	611	6.4	1.64	11	132	0.91	5.0 E-5
A 2	1800	5.6	0.56	3	381	0.27	7.5 E-4
A 3	50	3.5	20.0	69	10.4	5.99	1.8 E-6
B 1	35	7.3	28.5	209	7.55	18.1	8.0 E-8
B 2	1800	0.9	0.56	1	363	0.04	2.1 E-1
B 3	52	3.6	19.2	69	10.8	5.95	1.7 E-6

im Vergleich zu 5,6 $mRad$ bei Kurve A. Die starke Reduzierung des Phasenwinkels hat ihre Ursache in einer starken Bodenkontamination mit Kohlenwasserstoffen. Die Kohlenwasserstoffe lagern sich im Porenraum an die Gesteinsmatrix an und verhindern die Ausbildung der elektrischen Doppelschicht, die für den imaginären Leitfähigkeitsanteil notwendig ist. Aufgrund der stark reduzierten Oberflächenaktivität wird ein zu hoher Durchlässigkeitsbeiwert ermittelt, der auf diese Weise ein Indikator für die Kohlenwasserstoffkontamination sein kann.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Aus petrophysikalischen Untersuchungen an Lockergesteinsproben konnten Zusammenhänge zwischen der elektrischen und hydraulischen Leitfähigkeit abgeleitet werden, auf deren Grundlage ein Algorithmus zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus den komplexen Leitfähigkeitswerten konzipiert wurde. Dieser Algorithmus wurde bei Messungen in Rammsonden-Löchern erprobt. Der Vergleich der elektrisch bestimmten Durchlässigkeitsbeiwerte mit den an Gesteinsproben im Labor ermittelten Werten zeigt eine Übereinstimmung im Bereich einer Zehnerpotenz. In dieser Größenordnung ist die erreichbare Genauigkeit dieser Methode zur in-situ-Bestimmung der Gesteinsdurchlässigkeit einzuordnen. Der Vorteil dieser Methode liegt in einer schnellen und kostengünstigen Bereitstellung von zuverlässigen Durchlässigkeitsbeiwerten. Der Algorithmus läßt sich auch auf komplexe Widerstandssondierungen anwenden, wobei die Aussagegenauigkeit durch die Gültigkeit des Äquivalenzprinzips eingeschränkt wird.

Die hohe Empfindlichkeit des Imaginärteils der Leitfähigkeit gegenüber Veränderungen an der Phasengrenze zwischen der silikatischen Matrix und dem Elektrolyt des Porenraumes kann unter bestimmten Bedingungen als Indikator für Kontaminationen genutzt werden.

6. Literatur

- BÖRNER, F.; SCHÖN, J.: A relation between the quadrature component of electrical conductivity and the specific surface area of sedimentary rocks. - *The Log Analyst* 32(1991), S. 612-613.
- BÖRNER, F.: Complex conductivity measurements of reservoir properties. - In: P.F. Worthington: *Advances in Core Evaluation III - Reservoir Management*. Gordon and Breach, Reading (1992).
- BÖRNER, F.: Petrophysikalische Grundlagen für den Einsatz von IP-Messungen beim Nachweis und der Sanierung von Boden- und Grundwasserkontaminationen. - DGG-Seminar Umweltgeophysik, Neustadt/W (1993).
- JÄGER, W.: Weiterentwicklung und Erprobung petrophysikalischer Methoden zur Untersuchung von Gesteinen im Untergrund und in der Umgebung von Deponien und Altlasten. - 3. Statusseminar des Verbundvorhabens Deponieuntergrund, BGR Hannover (1994) S. 456 - 477.
- OLHOEFT, G.R.: Low frequency electrical properties. - *Geophysics* 50(1985), S. 2492-2530.
- PAPE, H.; RIEPE, L.; SCHOPPER, J.R.: A pigeon-hole model for relating permeability to specific surface. - *The Log Analyst* 23(1982).
- WELLER, A.; BÖRNER, F.: Determination of permeability at shallow depth. - 54th EAEG Meeting, Paris, 1992, P148.
- VINEGAR, H.J.; WAXMAN, M.H.: Induced polarization of shaly sands. - *Geophysics* 49(1984), S.1267-1287.