

## **Messung, 2-D Inversion und Interpretation von kleinskaligen SIP-Sektionen aus dem Berliner Stadtgebiet**

**Tino Radić**

Institut für Angewandte Geophysik, TU Berlin, [radic@geophysik.tu-berlin.de](mailto:radic@geophysik.tu-berlin.de),

### **1 Einleitung**

Die Frequenzabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstand nicht mineralisierter Fest- und Lockergesteine wird vorwiegend vom Fluid und der Struktur der inneren Oberfläche des Porenraumes kontrolliert (BÖRNER et al., 1996). Die Methode der Spektralen Induzierten Polarisation (SIP) erlaubt es diese Frequenzabhängigkeit mit hinreichend hoher Genauigkeit zu messen (RADIC, 1997) und schafft so die Voraussetzung für eine zerstörungsfreie Gesteinscharakterisierung von der Erdoberfläche her.

#### **1.1 Problemstellung**

Derzeit nutzen mehrere Gruppen in Deutschland die SIP-Methode zur Charakterisierung der oberflächenahen ungesättigten Zone. Die vadose Zone ist der Witterung und in menschlichen Ansiedlungen auch anthropogenen Einflüssen in besonderer Weise ausgesetzt. Der teilgesättigte Porenraum befindet sich daher mehr oder minder permanent im Ungleichgewichtszustand. Ein Niederschlagsereignis verändert in kurzer Zeit den Sättigungsgrad des Porenraumes und die Formationsleitfähigkeit. Von einer zeitlich und räumlich gut aufgelösten Abbildung dieses sehr dynamischen Vorganges erhofft man sich die genauere Identifizierung bevorzugter Ausbreitungswege der Fluide. In sich konsistente Daten sind aber nur dann zu erzielen, wenn SIP-Tiefensektionen in vergleichsweise kurzer Zeit gemessen werden können.

#### **1.2 Zielsetzung**

Als Vorbereitung auf ein Verbundvorhaben zur Charakterisierung von natürlichen Krustenbildungen an Bergbauhalden wurde eine SIP-Apparatur vom Typ SIP256B (*Radic Research*) dahingehend bewertet, ob diese hierfür geeignet ist. Die wichtigsten Kriterien sind:

- Schnelle Sondierung entlang von Profilen und in der Fläche bis in einigen Meter Tiefe
- Frequenzbereich: einige mHz – 500 Hz
- Hinreichende Messgenauigkeit in Gegenwart von mittleren Störspannungspegeln

Weiterer Klärungsbedarf besteht von Seiten der 2-D und 3-D Dateninversion. Während sich bei mineralisierten Gesteinen das Cole-Cole Leitfähigkeitsmodell zur Beschreibung der überwiegenden Zahl an Frequenzcharakteristiken bewährt hat, stehen für Lockersedimente noch keine allgemein anerkannten Modelle zur Verfügung. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft die Inversionsrechnung ohne Modellvorgabe durchführen zu können, um dann anhand der Inversionsergebnisse eine Entscheidung treffen zu können. Derzeit liegen keine Erfahrungsbereiche über diese Vorgehensweise bei nicht mineralisierten Lockersedimenten vor.

Ausgehend von den wahren Frequenzcharakteristiken sollen petrophysikalische Parameter, wie die hydraulische Permeabilität, abgeleitet werden. Anhand von Labormessungen sollen die Felddaten verifiziert werden.

## 2 Fallstudie Lübars

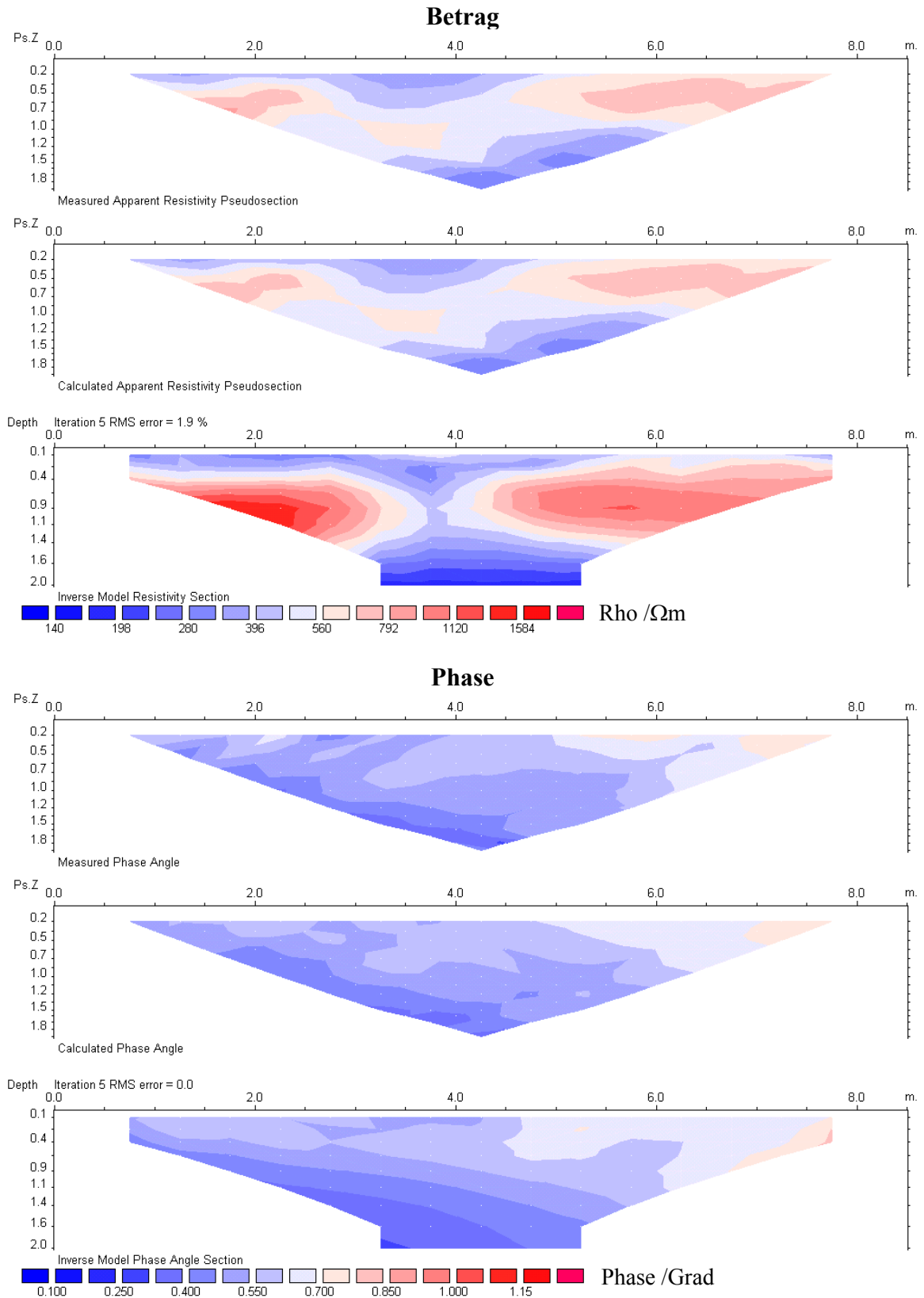
Das Messgebiet befindet sich im Norden Berlins, inmitten einer Ein- und Zweifamilienhaus Siedlung. Die Oberfläche ist eine Rasenfläche. Darunter befindet sich Kompost, der um 1992 20 cm mächtig aufgetragen wurde, um den fehlenden Mutterboden zu ersetzen. Darunter schließen Sande an, die vermutlich nacheiszeitlich abgelagert wurden. Der Grundwasserspiegel befindet sich in etwa 5 m Tiefe. Im Umfeld des Messgebietes wurden eingelagerte, kleinflächige meist horizontal gelagerte Tonhorizonte beobachtet. Obwohl diese nur wenige Zentimeter mächtig sind, sind sie von erheblicher Bedeutung für die Durchfeuchtung des Bodens. Während sich nach Niederschlägen das Regenwasser im Boden darüber staut, trocknet dieser Bereich in niederschlagsarmen Zeiten rasch aus, da der kapillare Aufstieg von Grundwasser behindert ist.

Das Messprofil ist insgesamt 8.5 m lang und mit 18 Elektroden besetzt. An 17 Elektroden befindet sich je eine aktive Remote Unit, die entweder zur Stromeinspeisung oder zur Spannungsmessung verwendet wird. Verwendung fand eine Dipol-Dipol Konfiguration ( $a=0.5$  m). Insgesamt werden 120 + 156 Konfigurationen vermessen. Die größere Zahl steht für solche Konfigurationen, bei denen der Stromdipol der Stromquelle näher liegt als der Spannungsdipol.

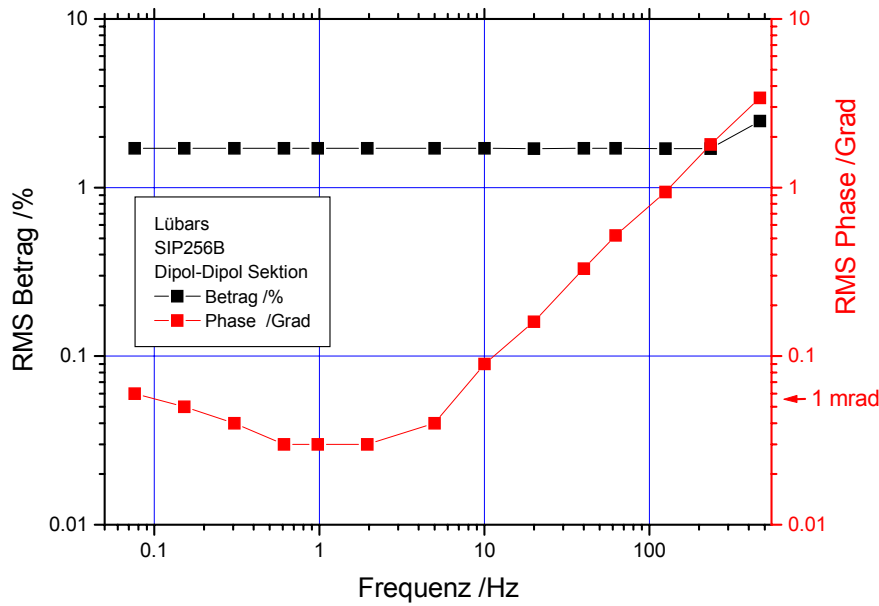
Die verwendete Apparatur (SIP256B) mit 17 Remote Units benötigt bei einer Frequenz von 0.97 Hz, 14 Minuten zur Messung aller Konfigurationen. Messungen bei niedrigen Frequenzen dauern naturgemäß länger als solche bei höhere Frequenzen. Eine multifrequente (0.1 Hz - 500 Hz) Tiefensektionsmessung benötigt etwas 1,5 bis 2 Stunden. In weniger gestörter Umgebung kann die Messzeit verkürzt werden. Der 50 Hz-Störpegel betrug 46 mV/m. Das Störspannungskontinuum (1 Hz - 500 Hz) betrug  $10 - 100 \mu\text{V m}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$ .

### 2.1 2-D SIP-Inversion

Zur 2-D Inversion wurde das allgemein zugängliche Programm RES2DINV (LOKE et al., 1996) verwendet. Es ist auch als 3-D Version erhältlich. Dieses Programm erlaubt es die bei einer Frequenz gemessenen Betrags- und Phasenwerte zu invertieren. Eine multispektrale Inversion setzt sich aus unabhängig voneinander durchgeführten Einzelfrequenzinversionen zusammen. Dabei ist zu beachten, dass stets dasselbe Gitter verwendet wird. Diese Vorgehensweise setzt keine Gesteinsmodellwahl voraus. Es zeigt sich, dass der 2-D Modellanpassungsfehler stark mit der Frequenz variiert (Abb. 2). Zudem ist der des Betrages im Gegensatz zu dem der Phase bei niedrigen Frequenzen fast konstant. Der Anpassungsfehler des Betrages wird primär von systematischen Fehlern bestimmt. Solche können daher rühren, dass der Widerstand nicht nur in zwei, sondern in allen Richtungen variiert (3-D Fall). Auch können die gesteckten Elektrodenspieße bei den geringen Elektrodenabständen nicht mehr als Punktquellen betrachtet werden. Da der Betrag aufgrund des IP-Effekts zwischen 0.1 und 500 Hz nur um etwa 5-10 % abnimmt, verharrt der Anpassungsfehler bei fast allen Frequenzen bei 1.9 %. Bei den Phasen dominiert hingegen der statistische Fehler, und dieser ist zwischen 0.1 und 10 Hz kleiner als  $\pm 0.05^\circ$  ( $\pm 1$  mrad). Bei höheren Frequenzen steigt dieser proportional mit der Frequenz an. Als Ursache hierfür wurde eine kapazitive Kopplung der stromführenden mit den spannungsführenden Leitungen über die Datenleitung erkannt. Diese Schwäche wird derzeit behoben indem, anstelle der Kupferleitungen, optische Fasern verwendet werden (SIP256 Version C). Die Rechenzeit für 10 Frequenzen (=10 Inversionsrechnungen) mit je 120 Konfigurationen beträgt insgesamt nur 3 Minuten (5 Iterationsschritte).



**Abb. 1:** Betrag und Phase der gemessenen und der modellierten scheinbaren spezifischen Widerstände, sowie die des besten 2-D Modells für eine Frequenz von 0.97 Hz. Zur Anwendung kam das Inversionsprogramm RES2DINV (LOKE et al., 1996).



**Abb. 2:** RMS Anpassungsfehler für Betrag und Phase der Lübarser 2-D Tiefensektion in Abhängigkeit von der Frequenz.

Exemplarisch für das Ergebnis der Multifrequenzinversion wurden für 3 der 95 Gitterelemente die invertierten Spektren wiedergegeben (Abb. 3). Die Phasenspektren der beiden unteren Gitterelemente zeigen in der doppeltlogarithmischen Auftragung einen linearen Verlauf. Diese an Sanden häufig beobachtete Frequenzcharakteristik kann mit dem Linear Phase Modell (RADIC, 1998) gut angepasst werden (Gln. 1).

$$|\rho(\omega)| = \rho_0 e^{\frac{2\varphi_{IP}(\omega)}{\pi c_{IP}(\omega_0)} c_{IP}} \quad \varphi(\omega) = \varphi_{IP} \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{c_{IP}} \quad \text{Linear Phase Model} \quad (1)$$

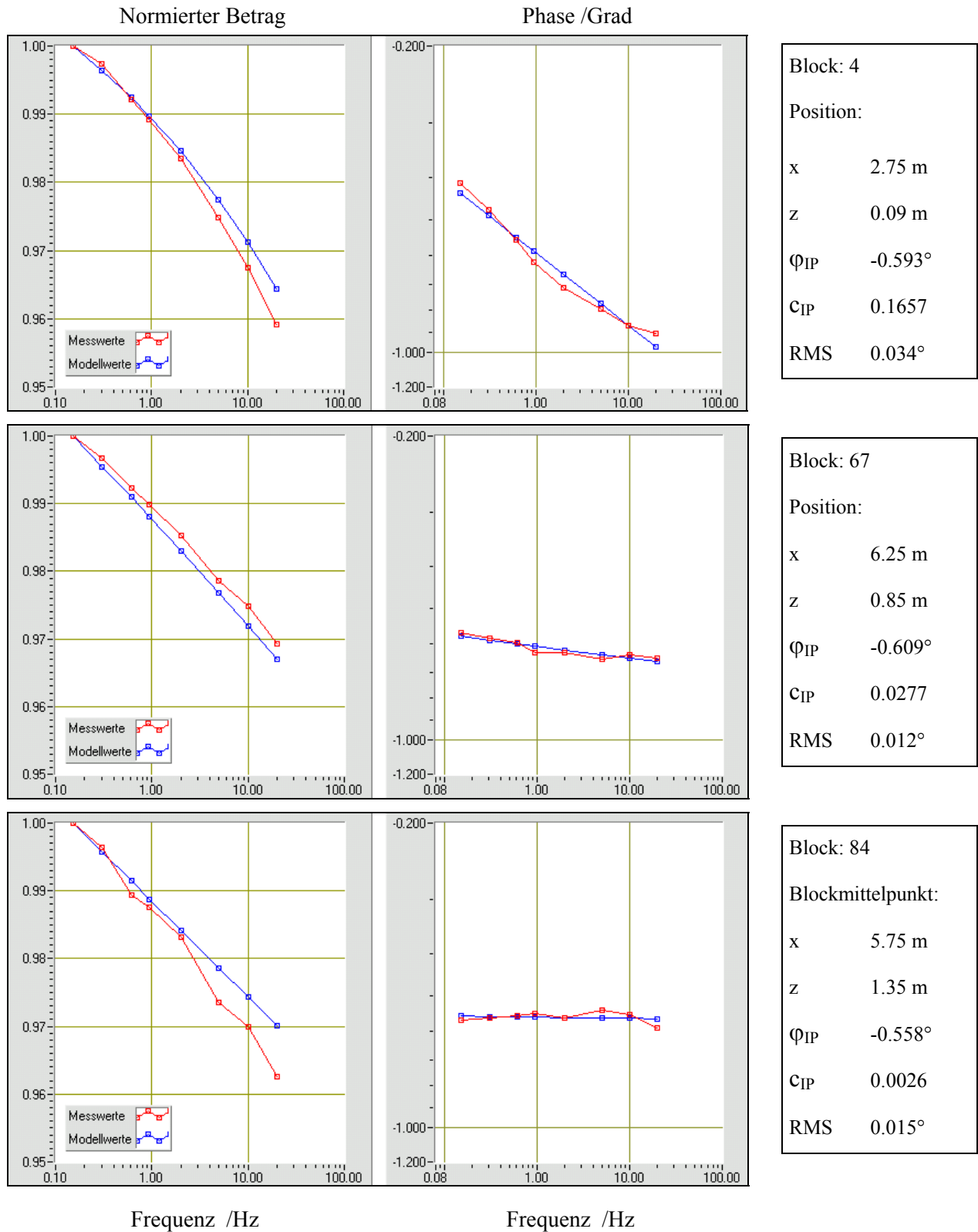
Um die Konsistenz von Betrags- und Phasenspektrum zu prüfen, wurden die LPM-Parameter allein aus der Phase bestimmt und hiermit das Betragsspektrum vorhergesagt. Tatsächlich stimmen das Gemessene (invertierte) akzeptabel gut mit dem aus der Phase Berechneten überein. Da der Gleichstromwiderstand aus den Phasenspektren nicht bestimmt werden kann, wurden nur die mit der niedrigsten Frequenz normierten Betragsspektren dargestellt.

Die Güte der LPM-Anpassung kann mittels des RMS-Wertes (Gln. 1a) quantifiziert werden.

$$\text{RMS} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\varphi_i^{\text{mod}} - \varphi_i^{\text{mes}})^2} \quad (1a)$$

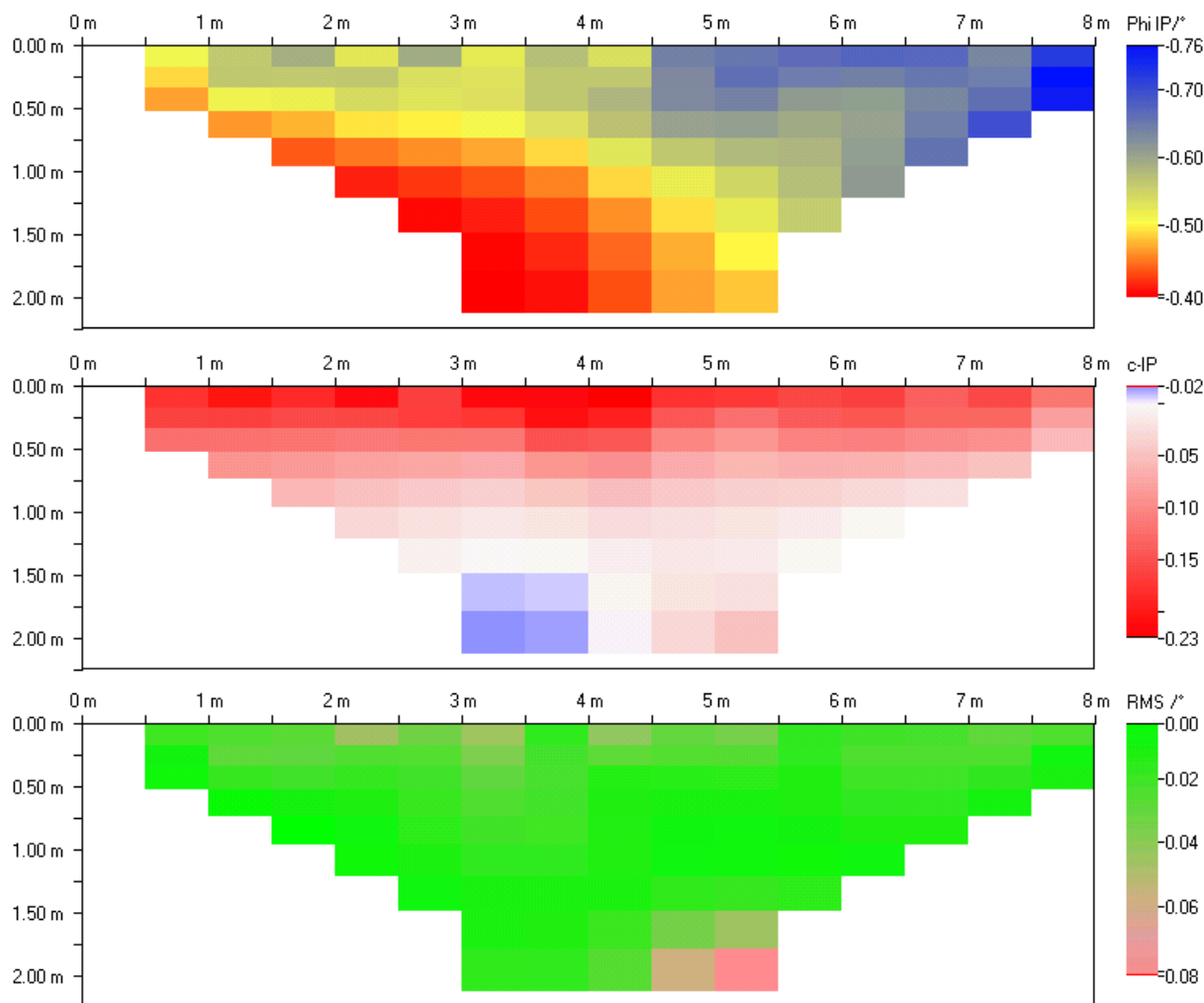
## 2.2 Ergebnisse der 2-D SIP-Inversion

Die LPM Parameter beschreiben die gemessenen Widerstandsspektren. In Abbildung 4 sind diese in Form einer Tiefensektion farbig kodiert aufgetragen. Entsprechend seiner Definition (Gln. 1) stimmt die Verteilung von  $\varphi_{IP}$  weitgehend mit der Verteilung der invertierten Phasen bei 0.97 Hz überein. Die Verteilung des Frequenzparameters  $c_{IP}$  ist völlig anders, als die des Widerstandes und die von  $\varphi_{IP}$ .  $c_{IP}$  nimmt entlang des gesamten Profils in gleicher Weise von relativ großen Werten (0.23) mit der Tiefe auf Null ab. Das Verhalten des RMS Anpassungsfehlers nimmt erwartungsgemäß mit der Tiefe zu. Da er jedoch stets deutlich kleiner als die gemessenen Phasen ist, sind die Parameter an allen Stellen im Untergrundes sicher belegt. Die geringfügig erhöhten Fehler für die Deckschicht haben ihre Ursache darin, dass das LPM nicht optimal geeignet ist um die Frequenzcharakteristik des Komposts anzupassen.



**Abb. 3:** Ergebnis der 2-D Inversion. Drei ausgewählte Spektren von Betrag und Phase. Die 2-D invertierten Phasen (rot) wurden mit dem LPM angepasst (blau). Die Modellwerte des Betrags wurden aus den LPM Parametern der Phase berechnet. Rechts: Lage des Blocks, LP Parameter und Anpassungsfehler der Phase.

- 2-D invertierte Messwerte
- LP Modellwerte (LPM Parameter basieren auf der Anpassung der Phase)



**Abb. 4:** 2-D Verteilung der LPM-Parameter und Anpassungsfehler (Lübars)

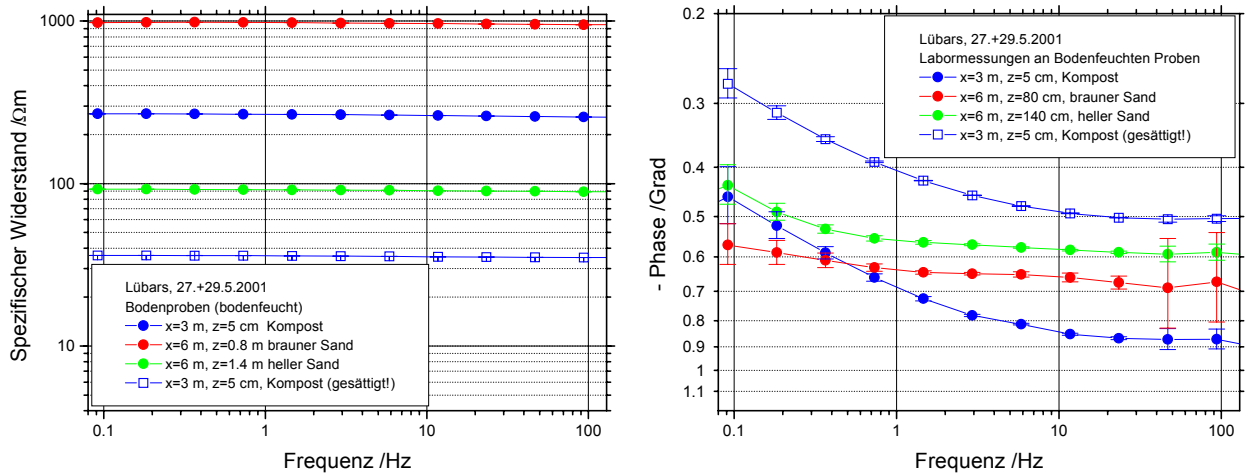
### 2.3 Verifikation der SIP-Felddaten anhand von Labormessungen an Proben

An den Orten, für die Spektren dargestellt wurden (Abb. 3), wurden Proben genommen. Die Proben wurden im Labor mit einer Apparatur vom Typ SIP-Fuchs (*Radix Research*) bergfeucht vermessen.

Es zeigt sich, dass

- die Feldmessungen am Kompost und an den in mittlern und großen Tiefen genommenen Sandproben stimmen sowohl hinsichtlich ihrer Frequenzcharakteristik als auch hinsichtlich ihre Stärke gut mit den 2-D SIP-Inversionsergebnissen überein.
- das Phasenspektren des Komposts weist ein Phasenextremum (40 Hz) auf und unterscheidet sich damit in der Frequenzcharakteristik signifikant von dem des Sandes. Aus diesem Grund kann es mit dem Linear Phase Modell nur schlecht angepasst werden.

Geringe Abweichungen können bei allen Proben bei den niedrigsten Frequenzen beobachtet werden. Möglicherweise werden bei der Probenahme vor allem die von größeren Strukturen herrührenden IP-Effekte verändert. Eine weitere Einflussgröße ist, dass die Oberflächenmessung mehrere Tage vor der Probenahme erfolgte.



**Abb. 5:** Ergebnis der SIP-Messungen an Bodenproben. Die Orte der Probennahme stimmen auf einige Dezimeter genau überein mit dem Herkunftsort der in Abbildung 3 dargestellt Spektren.

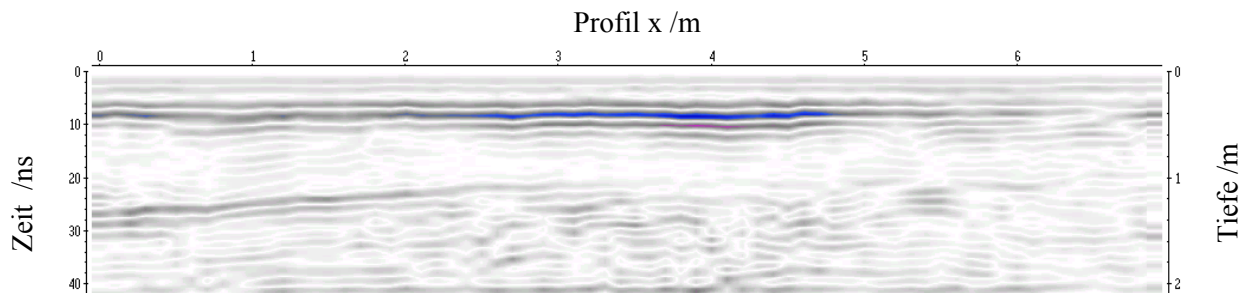
Um den Einfluss von Niederschlägen abzuschätzen, wurde der der Witterung am stärksten ausgesetzte Kompost mit Leitungswasser vollständig gesättigt und erneut vermessen (Abb. 5). Es zeigt sich, dass

- der Widerstand erwartungsgemäß um den Faktor 8 stark abnimmt,
- die Stärke des IP-Effekts auf die Hälfte abnimmt,
- dass die Frequenzcharakteristik nur unwesentlich verändert wird

Die Unempfindlichkeit der Frequenzcharakteristik, insbesondere von  $c_{IP}$ , gegenüber dem Sättigungsgrad erleichtert die Identifikation des Komposts unterhalb und oberhalb der Grundwasseroberfläche bzw. zu verschiedenen Jahreszeiten (feucht/trocken).

## 2.4 Radar

Bei der Probennahme am Profilpunkt  $x=3m$  wurde in 98 cm Tiefe ein nur 2 cm mächtiger Tonhorizont vorgefunden. Im Radargramm kann dieser durchgehend vom Profilanfang bis zur Profilmittle verfolgt werden. Danach ist allenfalls ein leichter Materialwechsel zu beobachten, was sich bei der Probennahme am Profilpunkt  $x=6m$  auch bestätigte.



**Abb. 6:** Auf dem SIP-Profil gemessenes Radargramm. In etwa einem Meter Tiefe zeigt das Radargramm einen Tonhorizont der zum Profilanfang hin abfällt und zum Profilende hin auskeilt. Zwischen 2.5 und 4.5 m weist der Kompost einen erhöhten Wassergehalt auf und dämpft so das Radarsignal.

Parameter der Messung: 400 MHz, Offset: 0.5 m,  $v=0.1$  m/ns.

### 3 Petrophysikalische Deutung der Ergebnisse

#### 3.1 Unterscheidung von organischem Material und Sanden

Holz aus archäologischen Grabungen (Weller et al. 2001) weist unter den nicht mineralisierten Materialien ein ausgeprägteres Maximum im Phasenspektrum auf. Es hat damit eine Frequenzcharakteristik, die dem von Erzmineralen ähnelt. Den Cole-Cole Spektren von Erzen liegt jedoch die Elektrodenpolarisation zugrunde, die nur an Elektronen leitenden Metallgittern auftritt. Bei Holz haben wir es, wie bei porösen nicht mineralisierten Sanden, mit einer Membranpolarisation zu tun. Ein ausgeprägtes Phasenmaximum bedeutet, dass ein einzelner Relaxationsprozess mit der Zeitkonstante  $\tau$  den IP-Effekt dominiert. Eine dominierende Zeitkonstante steht jedoch stets mit einer vorherrschenden Strukturgröße (Weglänge) im Zusammenhang. Die Pflanzenzellen der untersuchten Hölzer besitzen eine etwa einheitliche Form und können daher zur Erklärung herangezogen werden. Kompost stammt hingegen von unterschiedlichen Pflanzen und ist zudem bereits teilweise zersetzt. Es wird mehrere Relaxationsprozesse geben und ein flacheres Phasenmaximum ist daher wenig verwunderlich. Wenn man diese Überlegung fortführt, dann gelangt man zu den komplex strukturierten Sanden mit ihren sehr flachen Phasenverläufen.

#### 3.2 Abschätzung der hydraulischen Permeabilität $k$

BÖRNER et al. (1996) haben eine Methode vorgeschlagen und erprobt, die es erlaubt die hydraulische Permeabilität von Sandsteinen aus dem komplexen spezifischen Widerstand zu schätzen. Ausgangspunkt sind die empirische Archie Gleichung (Gln. 2) und die Paris Gleichung (Gln. 3).

$$F = \frac{\sigma_w}{\sigma_0} = \frac{a}{\Phi^m}, \quad \frac{\sigma_t}{\sigma_0} = (S_w)^n \quad (2)$$

$$k = \frac{475}{F (S_{por})^{3.1}} \quad (3)$$

Börner fand für tonarme Sandsteine einen proportionalen Zusammenhang zwischen der volumenbezogenen inneren Oberfläche  $S_{por}$  und dem Imaginärteil der komplexen spezifischen Leitfähigkeit (Gln. 4).

$$S_{por} = 86 \operatorname{Im}(\sigma(\omega_0)) \quad (4)$$

$S_{por}$  geht etwa mit der dritten Potenz in die Berechnung der Permeabilität ein. Daher ist ein geringer Messfehler Voraussetzung für eine verlässliche Schätzung. Allerdings gibt es weitere Fehlerquellen, vor allem dann, wenn man, wie von KEMNA (2001) vorgeschlagen, die Gleichung 5 für teilgesättigte Gesteine erweitert.

$$F = \frac{\sigma_w (S_w)^n}{\operatorname{Re}(\sigma(\omega_0)) - \operatorname{Im}(\sigma(\omega_0)) / l} \quad (5)$$

$$\text{mit } l = \operatorname{Im}(\sigma_{int}) / \operatorname{Re}(\sigma_{int})$$

Nach PAPE et al. (1987) entwickeln Sandsteine während ihrer Diagenese eine fraktale Struktur der inneren Oberfläche aus. Das Nebeneinander von kleinen, mittleren und große Strukturen bedingt, dass das Polarisationssignal sich aus der Überlagerung unterschiedlichster Relaxationszeiten zusammensetzt. In



dem betrachteten Frequenzbereich um 0.15 Hz stellt sich eine konstante Phase ein (BÖRNER et al., 1996).

Die Phasenspektren der tieferliegenden Sande in Lübars weisen im betrachteten Frequenzbereich ebenfalls eine nahezu konstante Phase auf. Es kann daher angenommen werden, dass auch hier eine ähnliche fraktale innere Oberfläche vorliegt wie bei vielen Sandsteinen und dass die Permeabilitätsabschätzungsmethode auch hier angewandt werden kann. In Tabelle 1 wird für den Bereich in 1.3 m Tiefe ein k-Wert abgeschätzt.

Messwerte:	Annahmen:	Ergebnis:
$\omega_0 = 1 \text{ Hz}$ $\rho(\omega_0) = 200 \text{ } \Omega\text{m}$ $\varphi(\omega_0) =  -0.4 \text{ Grad} $	$\sigma_w = 0.1 \text{ S/m}$ $S_w = 0.3$ $l = 0.02$ $n = 2$ $m = 1.3$ $a = 1$	$F = 3.0$ $S_{por} = 3 (\mu\text{m})^{-1}$ $k = 5.3 \text{ Darcy}$ $\Phi = 0.43$

**Tab. 1:** Schätzung der hydraulischen Permeabilität eines teilgesättigten Sandes auf der Basis dessen komplexer spezifischer elektrischer Leitfähigkeit. m=1.3 unverfestigter Sand (Schön, 1996).

$k$ : Abs. hydraulische Permeabilität [ $1 \text{ Darcy} \approx 10^{-12} \text{ m}^2 \approx 10^{-5} \text{ m/s}$ ] $S_{por}$ : Volumenbezogene innere Oberfläche $\Phi$ : Porosität $F$ : Formationsfaktor $\sigma_t$ : Formationsleitfähigkeit $\sigma_0$ : Formationsleitfähigkeit bei vollständiger Sättigung $\sigma_w$ : Leitfähigkeit des Formationswassers $\sigma_{int}$ : Interfaceleitfähigkeit $S_w$ : Sättigung $n$ : Sättigungs exponent $\approx 2$ $m$ : Zementations exponent $\approx 1.3 - 2.2$ $a$ : $\approx 0.6 - 1.5$ $\omega_0$ : 1 Hz
---

#### 4 Ausblick

1620 Sondierungsdaten (Betrag und Phase), die bei einer Frequenz von 0.97 Hz auf 11 parallelen Profilen mit je einem Meter Elektrodenabstand gemessen wurden, konnten mit dem Programm RES3DINV innerhalb von 25 Minuten invertiert werden. Es deutet sich damit an, dass auch eine 3-D Multifrequenzinversion zu vertrauenswürdigen Ergebnissen führen wird. Dies gilt es in naher Zukunft zu verifizieren.

Der Vergleich der oben vorgestellten Messdaten mit den an gleicher Stelle eine halbes Jahr zuvor gemessenen Ergebnissen bestätigt die bereits aufgrund der Labormessungen vermutete großen Bedeutung der Witterung auf die elektrischen Eigenschaften der vadosen Zone. Die zeitliche Variation der Parameter gilt es daher zu messen und auszuwerten.

Die SIP-Apparatur SIP256C verwendet zur Datenübertragung optische Fasern. Dies wird es ermöglichen noch schnellere und zugleich noch genauere SIP-Messungen bei Frequenzen >50 Hz durchzuführen. Für nicht so zeitkritische Untersuchungen können mit einer Apparatur vom Typ SIP-Fuchs (*Radic Research*) SIP-Messungen sogar bis 12 kHz durchgeführt werden.

Die Ableitung petrophysikalischer Parameter steht trotz der umfänglichen bisherigen Forschungsarbeiten noch immer in den Anfängen. Es gilt hier systematisch die elektrischen Eigenschaften sämtlicher relevanter Gesteinstypen und Porenraumfluide einschließlich möglicher Kontaminaten zu untersuchen.

#### Literatur

- BÖRNER, F. D., SCHOPPER, J. R., and WELLER, A. (1996): Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements. *Geophysical Prospecting* 44, 583-601.
- KEMNA, A. (2000): Tomographic inversion of complex resistivity. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Der Andere Verlag, Reihe A, Nr. 56.
- LOKE, M. H., and BARKER, R. D. (1996): Rapid least-square inversion of the apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- PAPE, H., RIEPE, L., and SCHOPPER J. R. (1987): Theory of self similar network structures in sedimentary and igneous rocks and their investigation with microscopical and physical methods. *J. Microscopy*, 148, 121-147.
- RADIC, T. (1997): Induzierte Polarisation, In (Hrsg.) KNÖDEL, K., KRUMMEL, H. und LANGE, G., Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3 – Geophysik, Springer, Berlin.
- RADIC, T. (1998): Lockersedimentenerkundung mittels Spektraler Induzierter Polarisation. In (Hrsg.) Kirsch, R., DGG Sonderband II/1999 zum 5. DGG Seminar Umweltgeophysik, Neustadt a.d. Weinstraße, 22.4. - 24.4.1998.
- RADIC, T., KRETZSCHMAR, D., and NIEDERLEITHINGER, E. (1998): Improved characterization of unconsolidated sediments under field conditions based on complex resistivity measurements, Ext. Abst. für Tagungsband zur EEGS 14.-17.9.98, Barcelona, 1998.