

Speläologische Untersuchungen mit Radiomagnetotellurik (RMT)

Gerhard Zacher, Köln,
Rainer Ahrweiler*, Attendorn

Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität zu Köln

* Höhlenkundliche Arbeitsgemeinschaft Raum Attendorn

1 Einführung

Die Radiomagnetotellurik-Methode (RMT) stellt eine Erweiterung des VLF-R-Verfahrens (Very Low Frequency - Resistivity) im Frequenzbereich dar, da die elektrischen und magnetischen Felder nicht nur des Längswellen- (10–30 kHz), sondern auch des Lang- und Mittelwellenbereiches (30–3000 kHz) gemessen werden. Dies ermöglicht eine Anwendung des Verfahrens zur Sondierung des oberflächennahen Untergrundes, je nach spezifischem elektrischen Widerstand zwischen einigen Metern und 100er Metern. Da in diesem Frequenzbereich viele Sender aus unterschiedlichen Richtungen zur Verfügung stehen, kann analog zur Magnetotellurik (MT) eine tensorielle Auswertung vorgenommen werden. Das RMT-Verfahren hat sich bereits für viele Aufgaben in der Flacherkundung bewährt, insbesondere für die Untersuchung von Altlasten (Zacher et al., 1996).

In den Massenkalken im Raum Attendorn sind vielerorts Karsterscheinungen anzutreffen, am Bekanntesten dürfte die Atta-Höhle sein. Solche Höhlen- und Kluftbildungen sind zum Einen für die Höhlenforscher (Speläologen) von großem Interesse, zum Anderen stellen sie manchmal eine Gefahr für Bauwerke dar. Da Hohlräume eine Anomalie mit extrem hohem elektrischen Widerstand darstellen, erscheint eine Erkundung mittels RMT sehr erfolgversprechend. Die 'Höhlenkundliche Arbeitsgemeinschaft Raum Attendorn' (HARRA) stellte dafür ein geeignetes Untersuchungsobjekt zur Verfügung (Ahrweiler, 1995), wobei die Lage der höhlenkundlich erschlossenen Bereiche exakt eingemessen war (siehe Abb. 1).

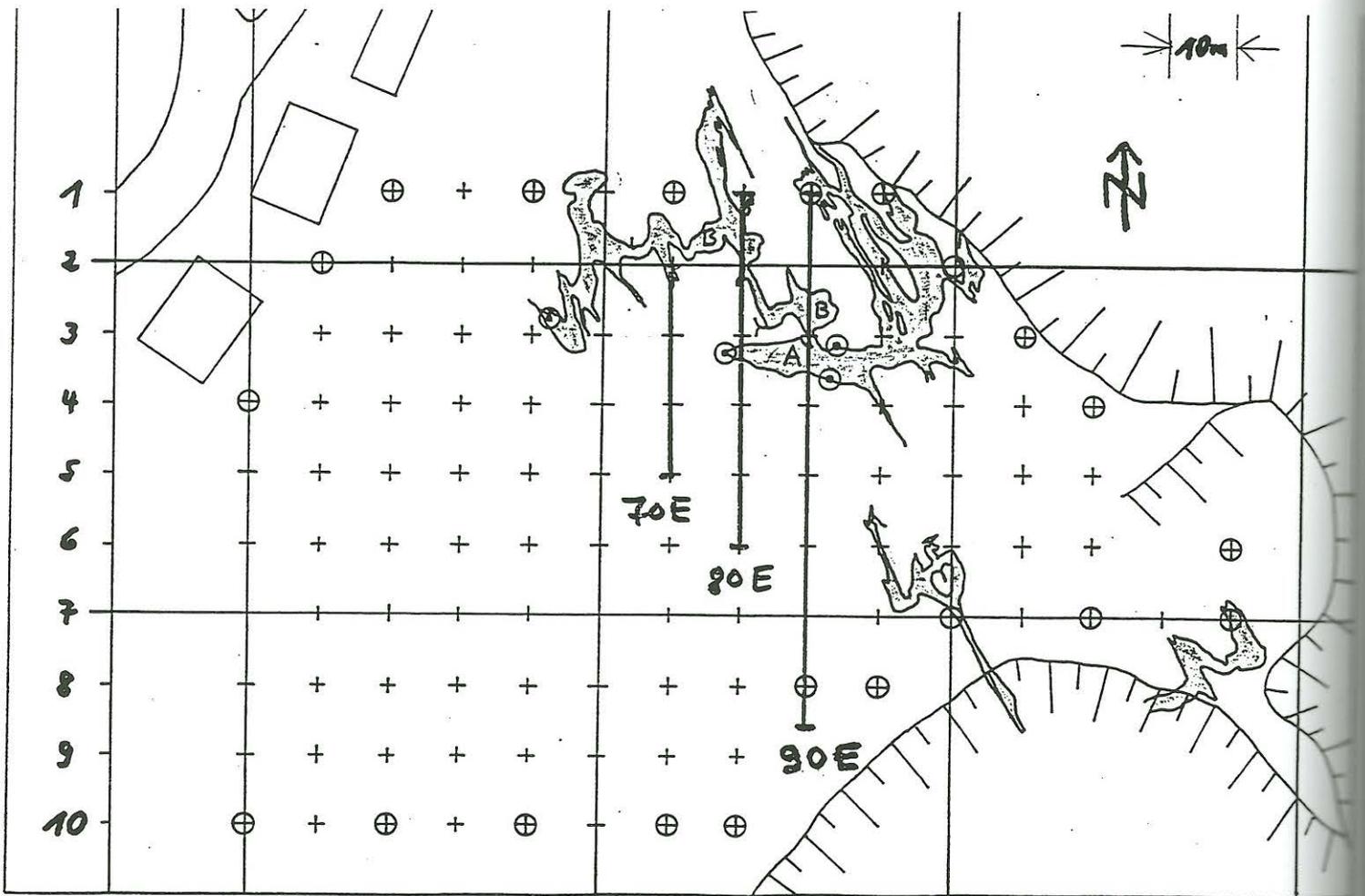


Abbildung 1: Grundriß des Höhlensystems und Lage der RMT-Profile. Kreuze stellen die von der HARA eingemessenen Punkte dar, die y-Achse ist in 10er Metern numeriert (Profilmeter).

2 Vorbereitung und Durchführung der RMT-Messungen

Zur Vorbereitung der RMT-Meßprofile vermarkten Mitglieder der HARA das Testgelände mittels eines großräumiges Meßpunktrasters auf einer Fläche von 4100 m² (siehe Abb. 1, Kreuze). Die Basis hierfür bildete ein aus vorangegangenen topographischen Vermessungen übernommener Fixpunkt im Eingangsbereich des Höhlenkomplexes. Im Raster von 50m x 50m wurden Pflöcke zur Kennzeichnung verwendet und ermöglichten eine exakte geographische Zuordnung der RMT-Messungen. Teilweise dichter Bewuchs mit Sträuchern verhinderte in manchen Bereichen das Einmessen des Geländes.

Für die RMT-Testmessungen wurde zuerst ein Profil gewählt, welches einen möglichst

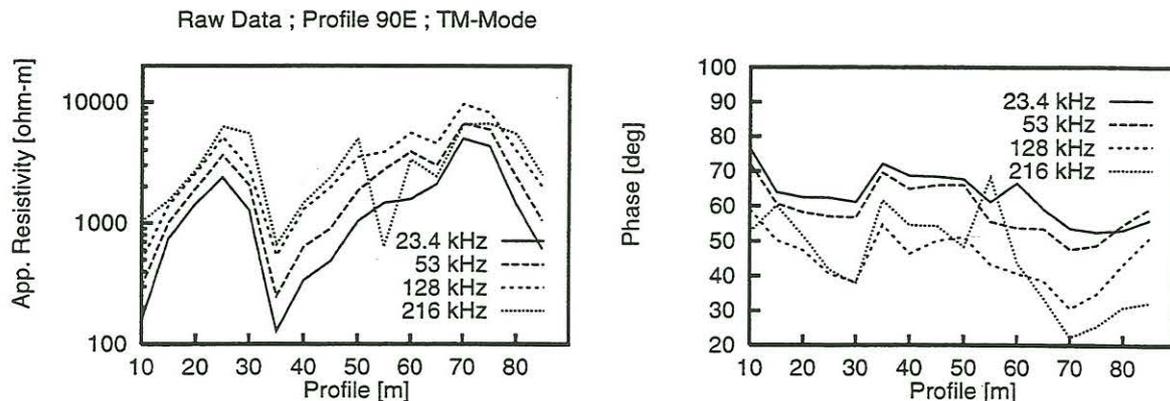


Abbildung 2: Rohdaten der scheinbaren Widerstände und Phasen (TM-Mode) für Profil 90E.

großen bekannten Hohlraum kreuzt (Profil 90E). Parallel nach Westen wurden in Abständen von 10m und 20m zwei weitere Profile gelegt, um eine eventuelle Fortsetzung des Hohlraumes zu erkunden. Die Abstände der RMT-Meßpunkte betragen 5m, auf Profil 70E sogar nur 2.5m. Das längste Profil 90E kommt am Anfangs- und am Endpunkt bis auf 10m an einen steilabfallenden Abhang heran, mit topographischen Effekten muß deswegen gerechnet werden.

3 Ergebnisse und Interpretation

In Abb. 2 sind die Meßdaten für die Nord-Süd-Sender (TM-Mode) exemplarisch für Profil 90E aufgetragen. Deutlich erkennbar sind positive ($y = 25, 75$) wie auch negative Widerstandsanomalien ($y = 10, 35, 85$), die Widerstände liegen in der Regel über $1000 \Omega\text{m}$. Eine Interpretation der Meßdaten ist durch eine qualitative Begutachtung der Meßdaten nicht möglich, eine 2D-Modellierung durch die großen lateralen Kontraste somit unumgänglich. Die zweidimensionalen Modellrechnungen wurden mit dem 2D-Inversionsprogramm von Smith & Booker (1991) durchgeführt. Die Endergebnisse für die Inversion der TM-Mode (Nord-Süd-Sender) sind für die Profile 90E, 80E und 70E in Abb. 3,4 und 5 dargestellt. Der Widerstand des Kalksteins beträgt ca. $500 - 2000 \Omega\text{m}$. Überlagert sind den Abbildungen die jeweils relevanten Höhlenprofile, die an Hand der eingemessenen Höhlendaten durch die HARA erstellt wurden. Die mit 'A' und 'B' gekennzeichneten Höhlengänge verzweigen sich bei Profilmeter 30 des Profiles 90E (siehe dazu Abb. 1). Deutlich erkennbar sind Anomalien erhöhter sowie erniedrigter Widerstände, die jeweils mit vorhandenen Hohlräumen korrelieren. Sofern in den Hohlräumen Ton eingelagert ist (schraffierte Bereiche in den Höhlenschnitten), wurde eine Erniedrigung des Widerstandes festgestellt. Bei Fehlen solcher tonigen Einlagerungen ergibt sich eine Anomalie mit erhöhten Widerständen.

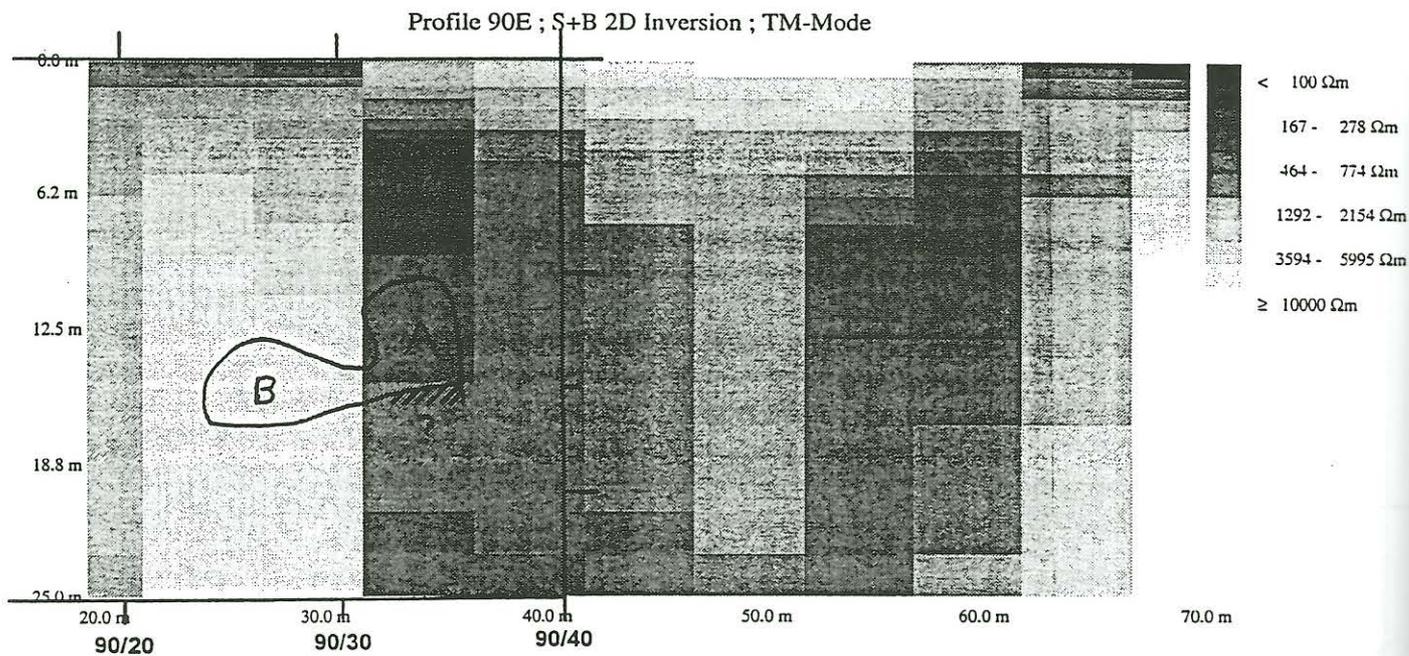


Abbildung 3: Ergebnis der 2D-Inversion (TM) für Profil 90E, überlagert von dem entsprechenden Höhlenprofil (schraffiert sind tonige Bereiche unbekannter Mächtigkeit).

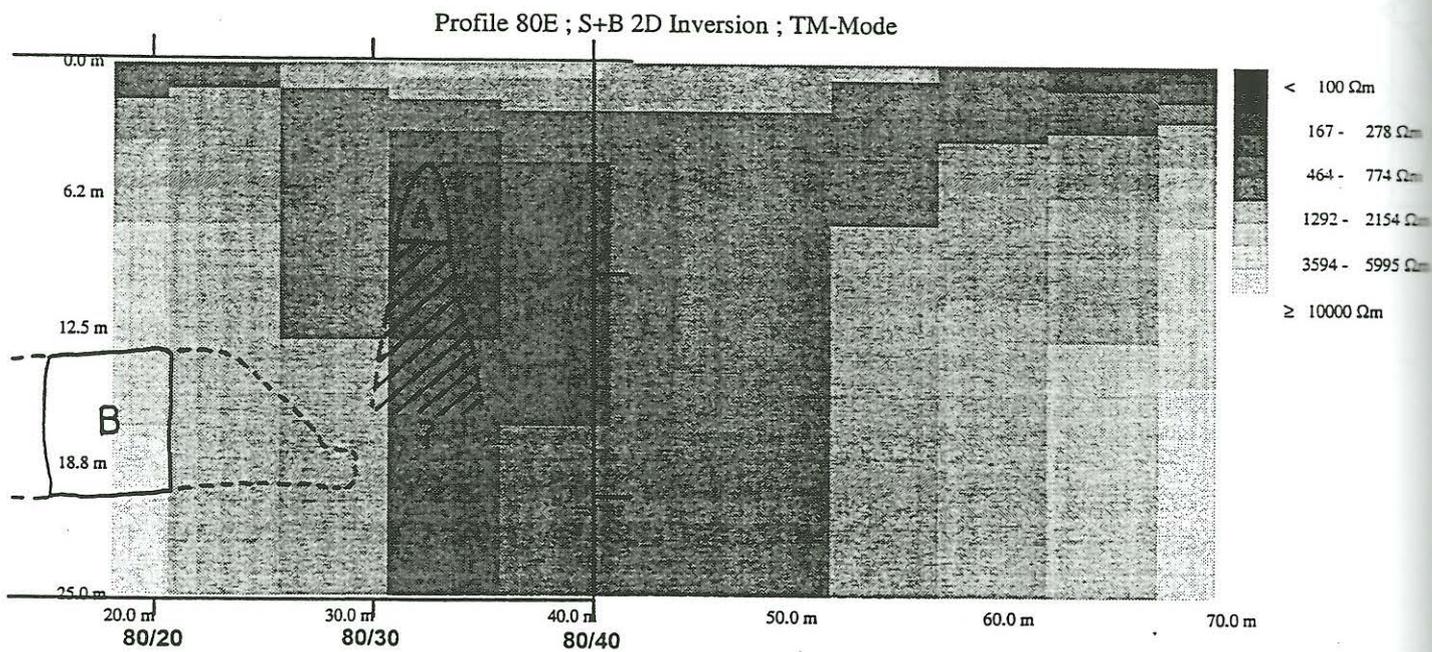


Abbildung 4: Ergebnis der 2D-Inversion (TM) für Profil 80E, überlagert von dem entsprechenden Höhlenprofil (schraffiert sind tonige Bereiche unbekannter Mächtigkeit).

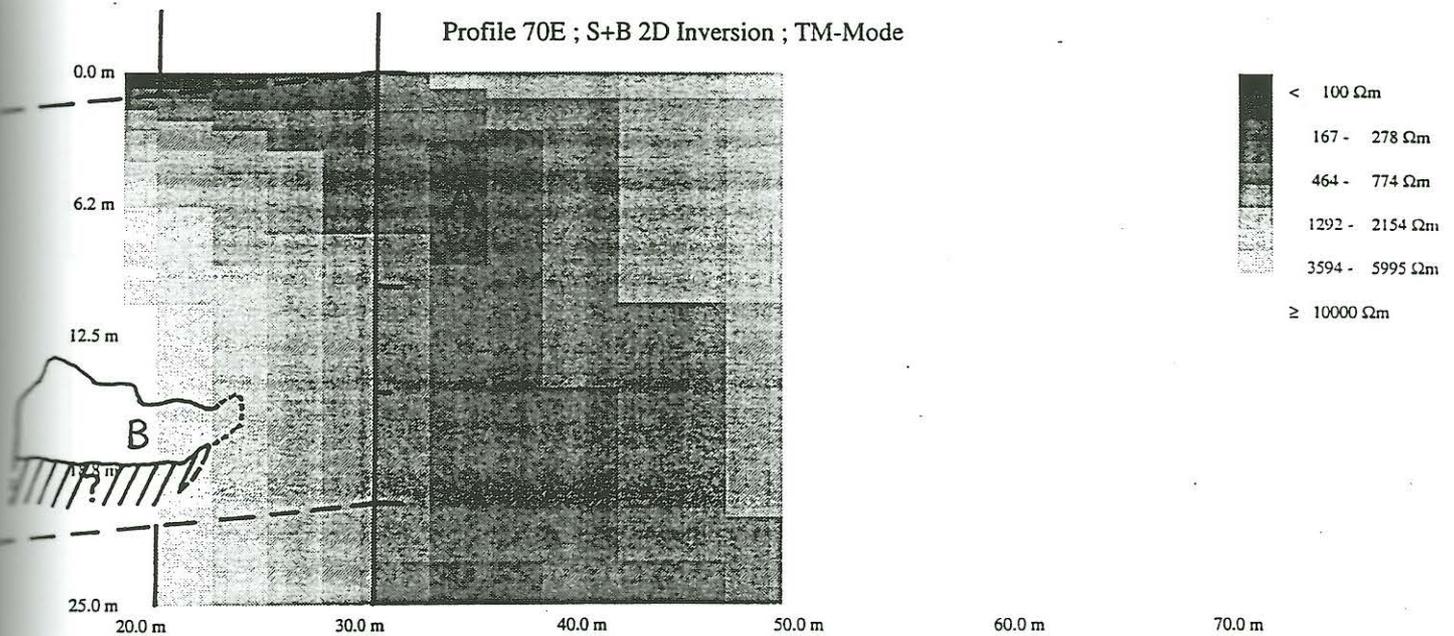


Abbildung 5: Ergebnis der 2D-Inversion (TM) für Profil 70E, überlagert von dem entsprechenden Höhlenprofil (schraffiert sind tonige Bereiche unbekannter Mächtigkeit).

Die laterale Übereinstimmung ist jeweils sehr gut, doch die Tiefenlage ist stark verfälscht. Dies liegt zum einen daran, daß die TM-Mode für die Interpretation verwendet wurde, bei der erfahrungsgemäß alle Strukturen in die Tiefe verzerrt wiedergegeben werden, zum anderen daran, daß der Verlauf der Klüftung nicht genau senkrecht zur Profilrichtung gerichtet ist und somit nur leicht verzerrte Daten zur Verfügung stehen. Eine Drehung der Daten, wie bei der Magnetotellurik üblich, ist leider nicht möglich, da die Elemente Z_{xx} und Z_{yy} des Impedanztensors nicht gemessen werden können und somit nicht zur Verfügung stehen.

Die mit 'A' gekennzeichnete Höhle ist wegen ihrer starken Tonablagerungen als gutleitende Anomalie erkennbar und setzt sich auch bis Profil 70E in westliche Richtung fort, wird jedoch zunehmend schwächer und schmaler. Dies deutet eindeutig darauf hin, daß der Hohlraum Richtung Westen auskeilt, und nicht, wie es höhlenkundlich gedeutet werden könnte, dieser Hohlraum nach Westen hin lediglich zusedimentiert wurde.

Weiterhin ist bei Profil 90E (Abb. 3) eine Anomalie geringen Widerstandes bei Profilmeter 55 – 60 erkennbar. In diesem Bereich ist laut Höhlenplan kein Hohlraum eingezeichnet. Es ist aber durchaus denkbar, daß es sich hierbei um eine Parallelklüftung zu dem im südlichen Teil erschlossenen Höhlensystem handelt (siehe Abb. 1).

Daß sich die Daten durch die Modellrechnung erfolgreich anpassen ließen, ist in der Gegenüberstellung der Modell- mit den Meßdaten für alle 4 Meßfrequenzen in Abb. 6 ersichtlich.

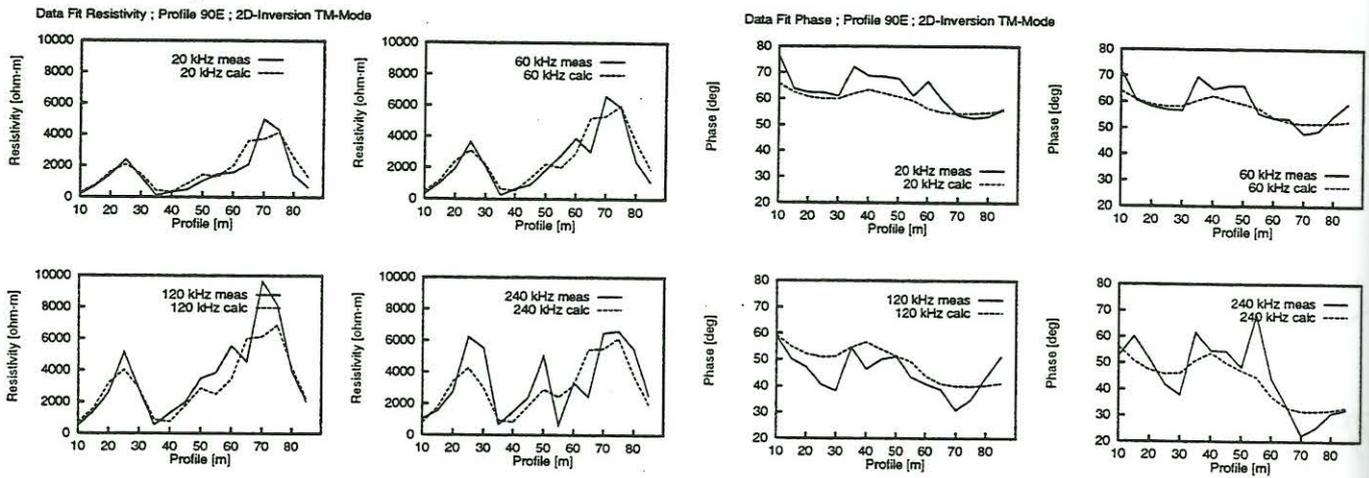


Abbildung 6: Anpassung der Modelldaten (gestrichelt) an die gemessenen Daten.

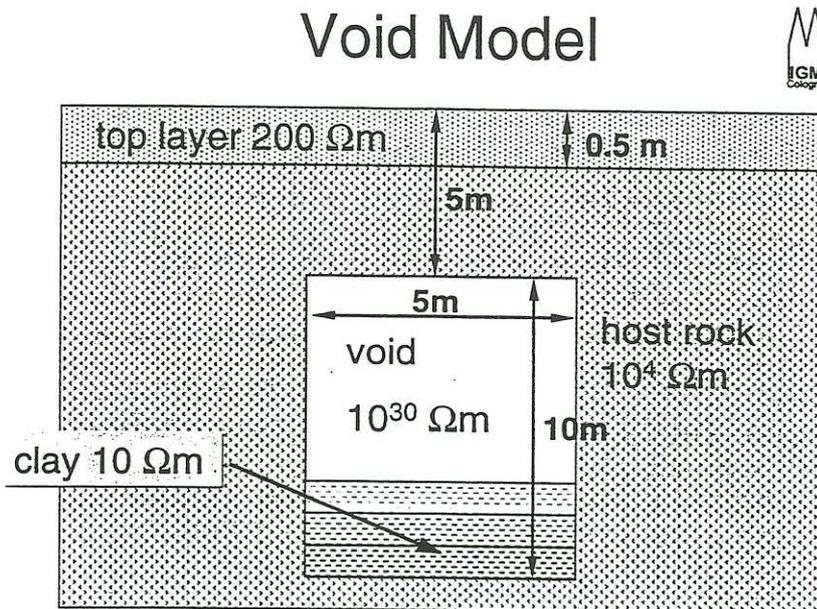


Abbildung 7: Skizze des Hohlraum-Modells für die 2D-Vorwärtsrechnung.

4 Modellrechnungen zur Tonverfüllung eines Hohlraumes

Um den Einfluß von Toneinlagerungen in einem Hohlraum auf die TE- und TM-Mode zu untersuchen, wurden 2D-Vorwärtsrechnungen mit dem Programm von Wannamaker et al. (1987) für das in Abb. 7 dargestellte Modell durchgeführt. Die Mächtigkeit der Toneinlagerung wurde sukzessive von 0–10m in Meterschritten variiert. Die scheinbaren Widerstände wurden für ähnliche Frequenzen, wie die bei den Messungen verwendeten, berechnet und sind in Abb. 8a-d (TE-Mode) und Abb. 9a-d (TM-Mode) für verschiedene Verfüllungsgrade gezeigt. Für die TE-Mode macht sich ein Hohlraum nur sehr schwach bemerkbar, sobald dieser jedoch mit 1m Ton verfüllt ist, ist bereits eine deutliche Er-

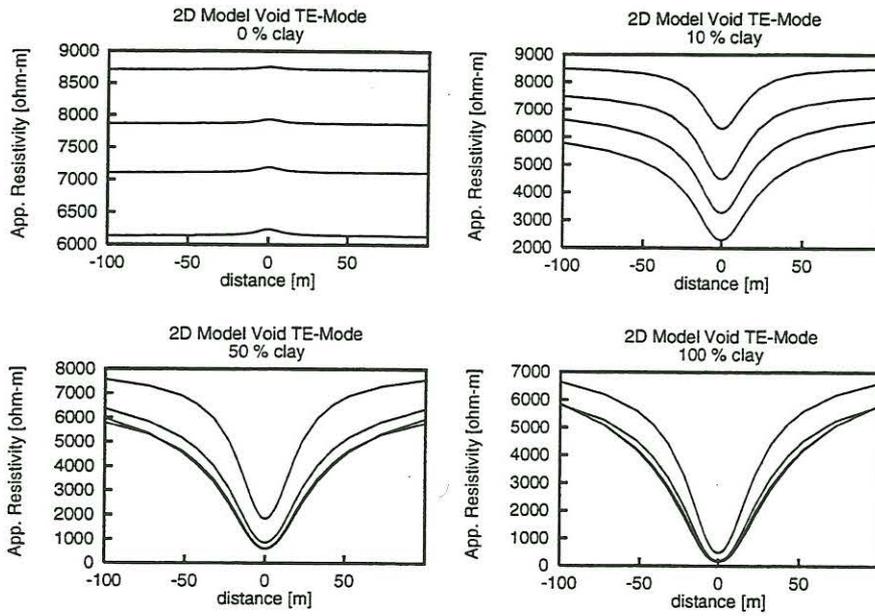


Abbildung 8: Modelldaten der scheinbaren Widerstände (TE-Mode) für unterschiedliche Tonverfüllungsgrade.

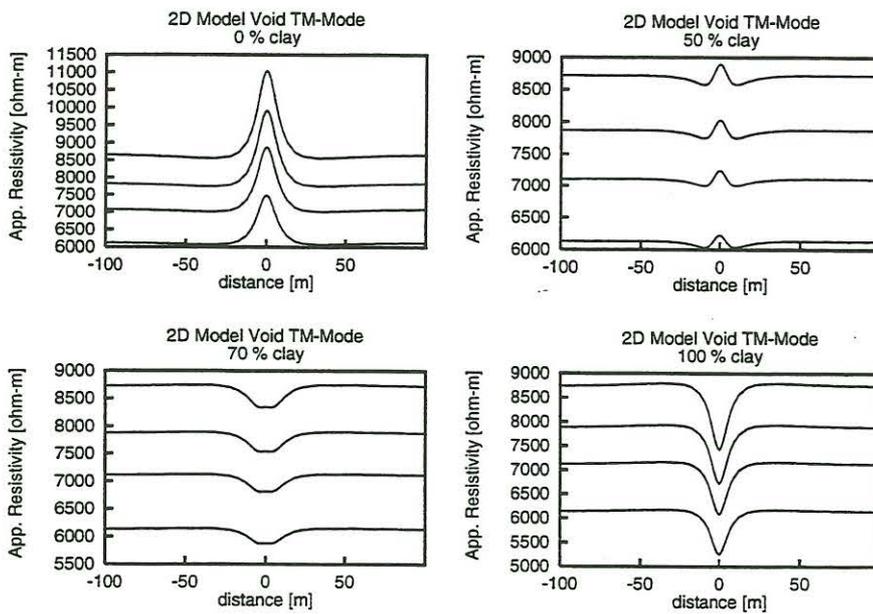


Abbildung 9: Modelldaten der scheinbaren Widerstände (TM-Mode) für unterschiedliche Tonverfüllungsgrade.

niedrigung des Widerstandes erkennbar. Die Daten der TM-Mode hingegen weisen eine deutliche Erhöhung des Widerstandes für einen Hohlraum auf, sogar bis hin zu einem Verfüllungsgrad von 50 %. Erst ab da ergibt sich eine Erniedrigung des Widerstandes.

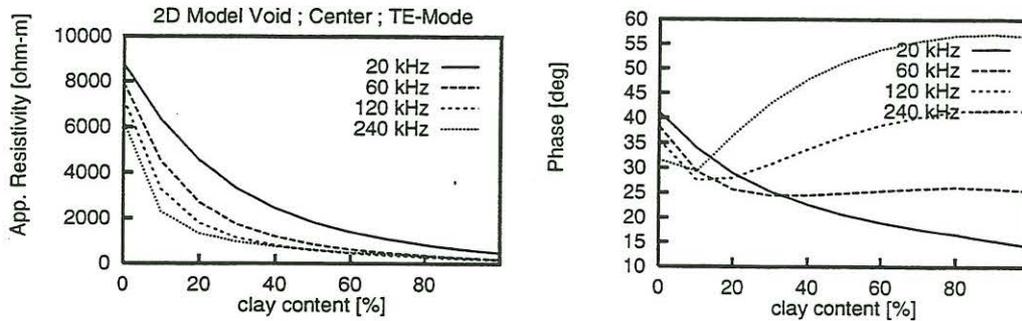


Abbildung 10: a+b: Modelldaten (TE-Mode, scheinbarer Widerstand a) und Phase b)) über der Hohlraummitte in Abhängigkeit von der Tonverfüllung.

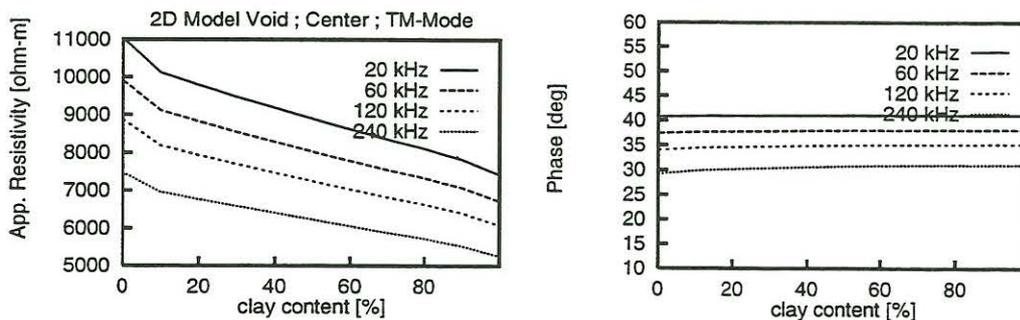


Abbildung 11: a+b: Modelldaten (TM-Mode, scheinbarer Widerstand a) und Phase b)) über der Hohlraummitte in Abhängigkeit von der Tonverfüllung.

Trägt man nun den scheinbaren Widerstand und die Phase für den Meßpunkt direkt über dem Hohlraum in Abhängigkeit vom Verfüllungsgrad auf, so ergibt sich das in Abb. 10a,b (TE-Mode) und Abb. 11a,b (TM-Mode) aufgezeigte Verhalten. Für die TE-Mode sinkt der Widerstand mit steigendem Tongehalt sehr schnell ab, die Phasenwerte ändern sich gleichfalls sehr stark. Bei der TM-Mode hingegen bleiben die Phasenwerte weitgehend unbeeindruckt und die Widerstände weisen ein nahezu lineares Verhalten i.A. des Tongehaltes auf.

5 Schlußfolgerungen und Ausblick

- Bekannte Hohlräume konnten mittels RMT-Messungen in allen Fällen eindeutig nachgewiesen werden.
- Weiterhin war eine Unterscheidung nach Hohlräumen mit und ohne Sedimentablagerungen (Tonen) möglich.
- Die mutmaßliche Fortsetzung des Hohlraums 'A' Richtung Westen konnte an Hand der RMT-Messungen ausgeschlossen werden.
- Die Tiefenlage der Strukturen ist sehr schlecht aufgelöst. Erster Schritt für eine bessere quantitative Erfassung der Hohlräume ist eine möglichst exakte Ausrichtung der Profile senkrecht zur Kluftrichtung des Höhlensystems.
- Durch weitere geplante Testmessungen in diesem Gebiet mit verbesserter Meßanordnung soll erreicht werden, daß sowohl die TM- als auch die TE-Mode quantitativ interpretiert werden können, und vielleicht sogar Rückschlüsse auf die Mächtigkeit der abgelagerten Tone in den Hohlräumen möglich sind (siehe Modellstudie).

Literaturverzeichnis

- Ahrweiler, R., 1995: Höhlenforschung in der Attendorn-Elsper Doppelmulde, in: Karst und Höhle 1991/92, S. 11-203, München.
- Smith, J. T. und Booker, J. T., 1991: Rapid inversion of Two- and Threedimensional Magnetotelluric Data. Journal of Geophysical Research, **96**, No. B3, 3905-3922.
- Wannamaker, P. E., Stodt J. A., Rijo, L., 1987: A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric models, Geophys. J. R. astr. Soc., 277-296, 88.
- Zacher, G., Tezkan, B., Neubauer, F.M., Hördt, A., Müller, I., 1996: Radiomagnetotellurics: A Powerful Tool For Waste Site Exploration, European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Geophysical Press, Montpellier, 139-159, 2.