

Berechnung der Widerstandsverteilung aus im Radiofrequenzbereich gemessenen magnetischen Übertragungsfunktionen

Tino Radic und Michael Becken

Institut für Angewandte Geophysik, TU Berlin

Einführung

Zur Bestimmung der Widerstandsverteilung im oberflächennahen Untergrund (bis einige 10 Meter Tiefe) stehen eine Vielzahl von erprobten geophysikalischen Messverfahren zur Verfügung. In der Regel handelt es sich um aktive Verfahren, die dank jahrzehntelanger Optimierung einen Stand erreicht haben, der eine effiziente Untersuchung von kleinflächigen Objekten mit hoher Genauigkeit und guter räumlicher Auflösung erlaubt. Prinzipiell lassen sich mit den gleichen Methoden auch großflächige Objekte mit hoher Auflösung erkunden. Sind jedoch wirtschaftliche Randbedingungen zu berücksichtigen, dann sind meist nur grobmaschige Vermessungen finanzierbar. Schnellere aerogeophysikalische Methoden (ATEM, Dighem...) erreichen in Zentraleuropa häufig aufgrund der notwendigen Mindestflughöhen (Bewuchs, Bebauung...) nicht die erforderliche Auflösung (Christensen et al. 2000).

Ein Verfahren, das diese Lücke zukünftig schließen könnte, basiert auf der schnellen, bodengestützten Messung und Auswertung magnetischer Übertragungsfunktionen (Tipper) im Radiofrequenzbereich. Messmethodisch handelt es sich hierbei um eine Erweiterung des altbekannten VLF-Verfahrens im Hinblick auf:

1. die gleichzeitige Registrierung aller Sender bis ~1 MHz
2. die Berücksichtigung aller Magnetfeldkomponenten: B_x , B_y , B_z .
3. die Transformation des Tipplers in den scheinbaren spezifischen Widerstand

Letzteres sollte ein fester Bestandteil dieser Erkundungsmethodik sein da, der spezifische elektrische Widerstand leichter interpretierbar ist als der Tipper und zudem die Grundlage für eine Modellierung mit eingeführten MT-Programmen bildet.

Methoden zur 2D-Transformation des Tipplers in scheinbare spezifische Widerstände

Verschiedene Autoren (Stiefelhagen, 1998), (Chouteau et al., 1996) haben hierzu Vorschläge erarbeitet. Im Rahmen einer Studienarbeit am TUB-Institut (Becken, 1999) wurden die theoretischen Grundlagen erweitert und eine Routine implementiert, die diese Transformation im Falle einer zweidimensionalen Widerstandsverteilung durchführt.

Die Faraday-Gleichung für eine zweidimensionale Widerstandsverteilung $\rho(x,z)$ lautet:

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -i\omega\mu H_z \quad \text{mit } B = \mu H$$

Die Division beider Seiten durch die x-Komponente des magnetischen Feldes H_x führt zu einer inhomogenen linearen Differentialgleichung in Z_{yx} :

$$\frac{\partial Z_{yx}}{\partial x} + Z_{yx} \frac{1}{H_x} \frac{\partial H_x}{\partial x} = -i\omega\mu T_x$$

Es gilt

$$Z_{yx} := \frac{E_y}{H_x}; \quad T_x := \frac{H_z}{H_x} = \frac{H_{za}}{H_{x0} + H_{xa}}; \quad H_{xn} := \frac{H_{xa}}{H_{x0}}$$

Die Lösung der Differentialgleichung lässt sich dann angeben mit:

$$Z_{yx}(\zeta) = \frac{1 + H_{xn}(0)}{1 + H_{xn}(\zeta)} \left\{ -i\omega\mu \int_0^{\zeta} T_x(x) \left(\frac{1 + H_{xn}(x)}{1 + H_{xn}(0)} \right) dx + Z_{yx}(0) \right\} \quad (1)$$

Um den Verlauf der scheinbaren spezifischen Impedanz Z_{YX} entlang eines Profils zu berechnen, wird der Tipper $T_X(x)$ in Profilrichtung und die scheinbare Impedanz am Profilanfang $Z_{YX}(0)$ benötigt. Nach Becken (1999) kann die unbekannte Größe H_{XN} aufgrund der nachfolgenden Beziehung iterativ berechnet werden:

$$H_{xn}(\zeta) = - \left(1 + \frac{1}{\pi T_x(\zeta)} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{H_{xn}(x)}{\zeta - x} dx \right)$$

Felderprobung

Zur Datengewinnung bedarf es des Einsatzes eines hochempfindlichen, breitbandigen Vektormagnetometers sowie einer schnellen Datenerfassungs- und Signalverarbeitungselektronik. Das zu diesem Zweck an der TU Berlin entwickelte Messgerät sowie die notwendigen Algorithmen zur Berechnung des Tipper werden in diesem EMTF-Band an anderer Stelle (Radic et al, 2000) diskutiert.

Die Felderprobung wurde am Teststandort Schöneiche bei Berlin durchgeführt. Auf sechs, im Abstand von 10 Metern, in N/S-Richtung verlaufenden Profilen wurden magnetische Übertragungsfunktionen zwischen 40 und 741 kHz gemessen. Die Ergebnisse für 145.9 kHz sind in Abbildung 1 in Form Schmucker'scher Induktionspfeile (Schmucker and Weidelt: Electromagnetic Induction in the Earth. Unpublished Lecture Notes, Aarhus, 1975) aufgetragen. Der Real-Pfeil weist in lateral inhomogenen Untergründen in guter Näherung in die Richtung der größten Widerstandszunahme. Für einen ersten qualitativen Vergleich mit den Ergebnissen der Gleichstromgeoelektrik ist diese Art der Darstellung besser geeignet als der Kippwinkel.

In Abbildung 2 ist die Widerstandsverteilung wiedergegeben, wie sie sich aus Gleichstrommessungen für eine Tiefe von 2.5 Metern ergibt. Diese Tiefe entspricht in etwa der mittleren EM-Schwerpunkttiefe im Messgebiet bei 145 kHz. Tatsächlich stehen die Real-Pfeile, wie erwartet, senkrecht zu den Linien gleichen Widerstandes und weisen zum Zentrum einer hochohmigen Sandlinse. Größere laterale Widerstandsgradienten korrespondieren zudem mit längeren Induktionspfeilen.

Die entlang des Profils gemessene N/S-Komponente T_X des Tippers wurde unter Verwendung von Gleichung 1 transformiert und das Ergebnis in Abbildung 3 dem einer RMT-Messung gegenübergestellt. Der Startwert $Z_{YX}(0)$ wurde aus dem am Profilanfang gemessenen RMT-Widerstand abgeleitet. Der so berechnete scheinbare Widerstand ist typischerweise sehr glatt und gibt den Verlauf des gemessenen RMT-Widerstandes in akzeptabler Näherung wieder. Die Abweichungen werden zum Profilende hin stetig etwas größer - vor allem in der Phase. Für die Tippermessungen wurde anstelle des sonst verwendeten Induktionsspulentrippels ein Hochtemperatur SQUID-Vektormagnetometer verwendet.

Im weiteren wurden auch die T_X -Komponente der magnetischen Übertragungsfunktionen der anderen Profile transformiert. Der jeweils am südlichen Ende jedes Profils gemessene scheinbare spezifische Widerstand diente dabei als Startwert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 zusammengestellt.

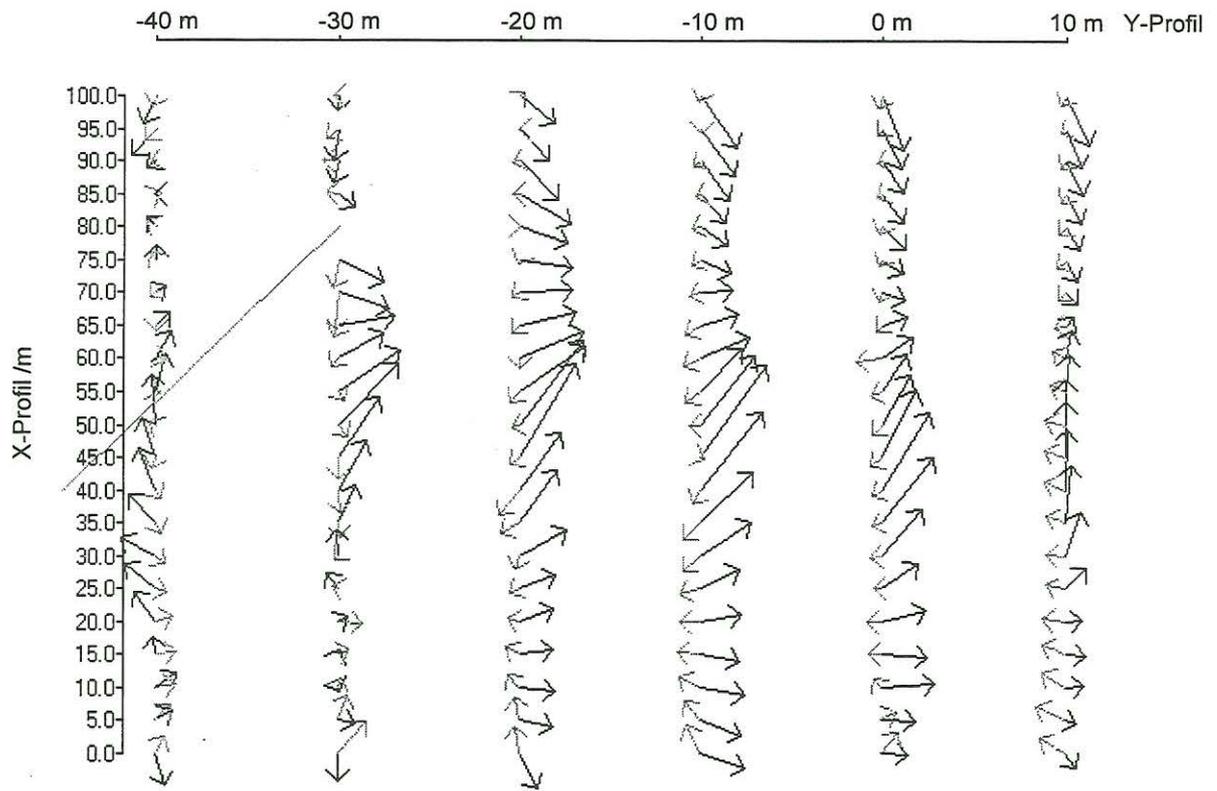


Abb.1: Am Teststandort gemessene Schmucker'sche Induktionspfeile (Schmucker et al., 1975). Schwarz: Real-Pfeil, grau: Imaginär-Pfeil. Das Bild ist in O/W-Richtung gestreckt dargestellt. Frequenz=145.9 kHz.

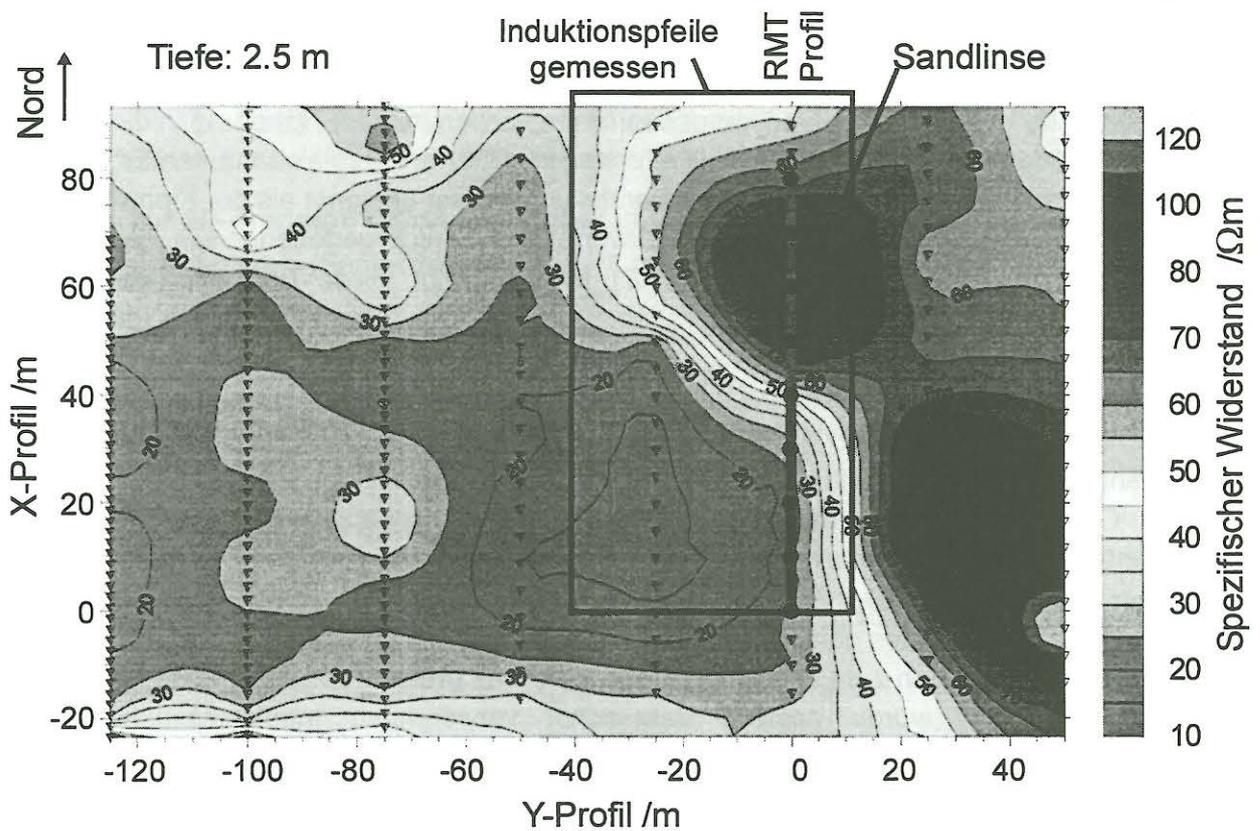


Abb.2: Ergebnis der gleichstromgeoelektrischen Vermessung des Teststandortes Schöneiche. Dargestellt ist die Widerstandsverteilung in einer Tiefe von 2.5 m. Die Messprofile sind durch Dreiecke gekennzeichnet. Zur Inversion der Messdaten wurde das Programm Res2DInv verwendet. Die Fläche, innerhalb der die in Abbildung 1 gezeigten Induktionspfeile gemessen wurden, ist umrahmt.

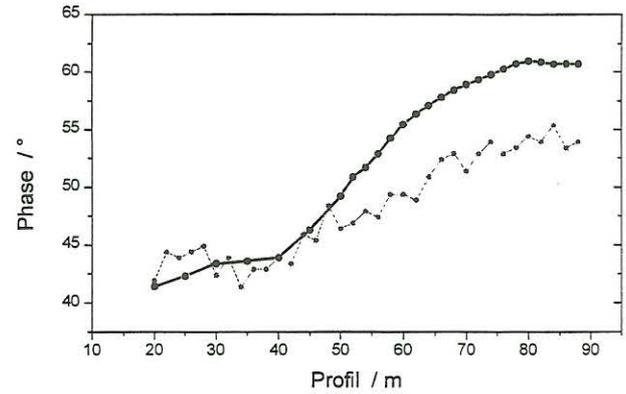
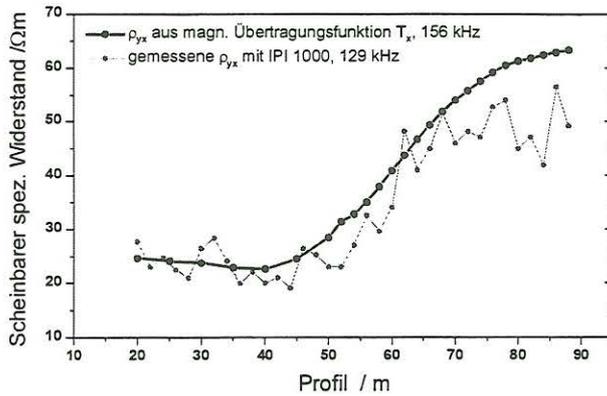


Abb.3: Gegenüberstellung von gemessenem und transformiertem scheinbarem spezifischen Widerstand: Schwarze Symbole: ρ_{S-YX} aus Tipper, graue Symbole: ρ_{S-YX} aus RMT-Messung. Schöneiche, Profil: $y=0$ m. Hinweis: Vom Wert der Profillachse sind 20 Meter abzuziehen.

Eine mögliche tiefenabhängige Variation des spezifischen Widerstandes würde sich in einer frequenzabhängigen magnetischen Übertragungsfunktion ausdrücken. Abbildung 5 stellt daher exemplarisch alle auf dem Profil $y=10$ m gemessenen Induktionspfeile dar. Bei der niedrigsten Frequenz (hier 40 kHz) wird die größte Eindringtiefe, gleichzeitig aber auch die geringste laterale Variation (Auflösung) erzielt. Dies wird besonders deutlich in der Umgebung des Punktes $x=65$ m, wenn man den langsamen Richtungswechsel der Pfeile bei den niedrigen Frequenzen mit dem fast übergangslosen Wechsel bei der höchsten Frequenz vergleicht.

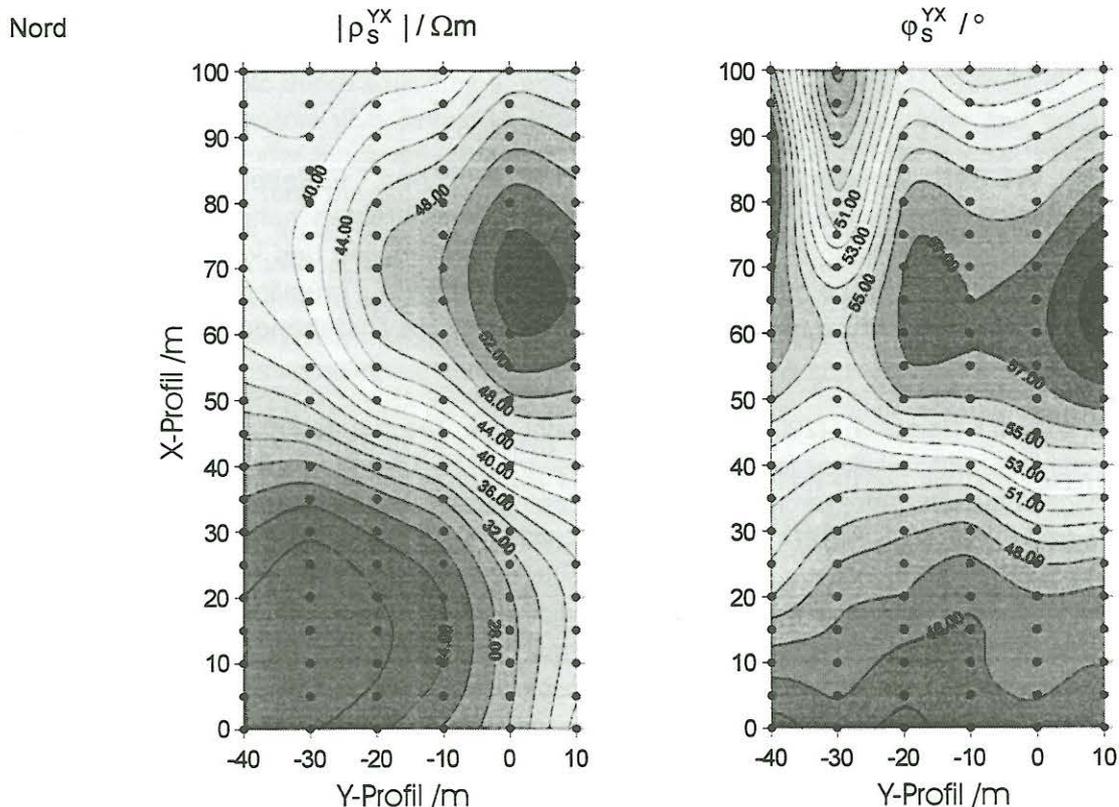


Abb.4: Aus den magnetischen Übertragungsfunktionen berechnete Verteilung des scheinbaren spezifischen Widerstands ρ_{S}^{YX} bei 145 kHz. Hierzu wurden die T_X -Komponenten des Tippervektors eines jeden N/S-Profiles transformiert (Chouteau et al., 1996) und die Ergebnisse zusammengestellt.

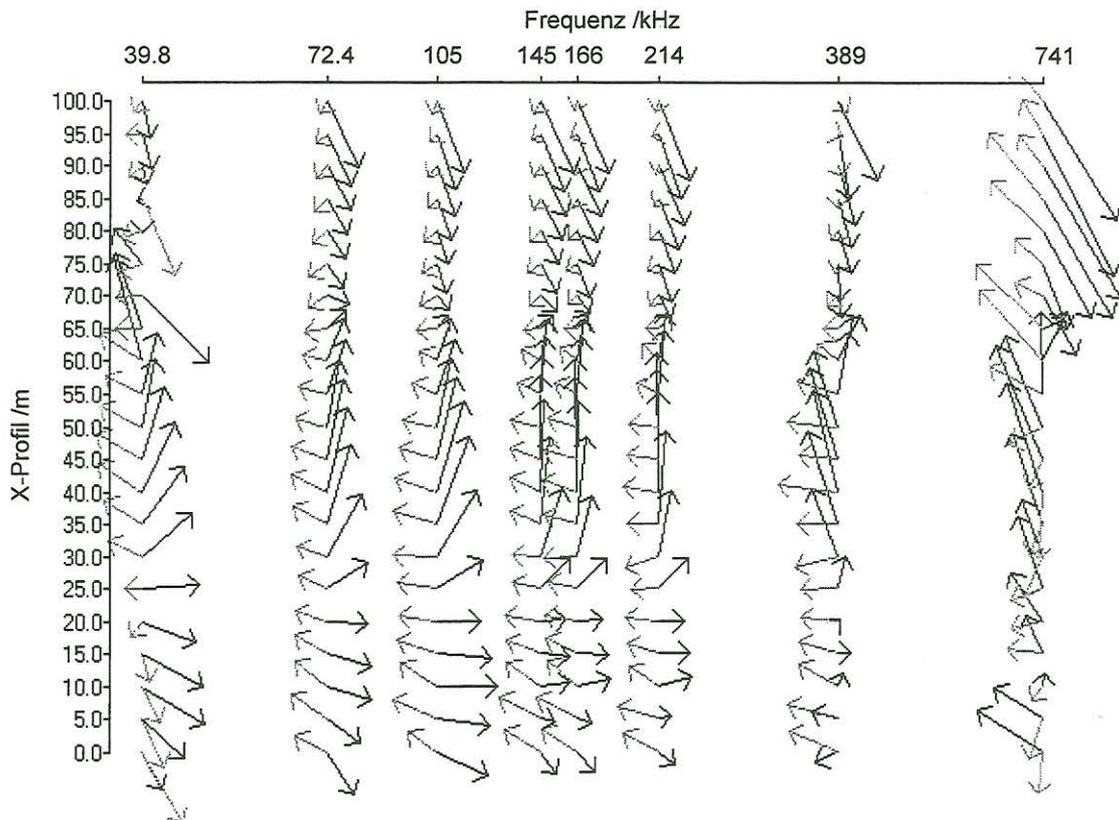


Abb.5: Am Teststandort auf dem Profil: $y=10$ m gemessene Induktionspfeile für unterschiedliche Frequenzen. Schwarz: Real-Pfeil, grau: Imaginär-Pfeil.

Ausblick

Sämtliche in der Einleitung formulierten methodischen Erweiterungen konnten für Einzelmessung erreicht werden. Zur Erreichung des angestrebten hohen Messfortschritts ist jedoch noch eine Umstellung des Messgerätes auf einen mobilen und kontinuierlichen Betrieb erforderlich. Dabei erscheint die permanente optimale räumliche Ausrichtung des Vektormagnetometers während der Fahrt als die schwierigste anstehende Aufgabe.

Literatur

- Burkhardt, H. und Radic, T. (2000): Abschlussbericht des Teilprojekts "Klärung des methodischen Potentials einer vielkanaligen geophysikalischen RMS-Apparatur mit Hochtemperatur SQUID-Magnetometern". Im Verbundvorhaben „Geophysikalisches Radiomagnetisches Sondierungsverfahren mit HTSL-SQUID“. BMBF-FKZ: 13N6435A/9.
- Becken, M. (1999): Methode zur Berechnung des scheinbaren spezifischen Widerstandes aus den magnetischen Übertragungsfunktionen im Radiofrequenzbereich. Studienarbeit, TU Berlin.
- Chouteau, M., Zhang, P. and Chapellier, D. (1996): Computation of apparent resistivity profiles from VLF-EM data using linear filtering. *Geophysical Prospecting*, Vol. 44, p215-232.
- Christensen, N.B., Soerensen, K, Christiansen, A., Rasmussen, T. and Poulsen L. (2000): An analysis of airborne transient electromagnetic data for hydrogeological investigations. Proceedings of the 6th Meeting of Environmental and Engineering Geophysical Society- European Section, Bochum.
- Radic, T. und Becken, M. (2000): Widerstandstensor- und Tippermessungen im Radiofrequenzbereich. In (Hrsg.) Stoll, J. und Hoerd, A.: Protokoll über das 18. DDG-Kolloquium „Elektromagnetische Tiefenforschung“, ISBN 0946-7467, Köln.
- Stiefelhagen W. (1998): Radio Frequency Electromagnetics (RF-EM): Kontinuierlich messendes Breitband-VLF, erweitert auf hydrogeologische Problemstellungen. Dissertation, Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Neuchatel.