

Strategien zur Erkundung einer schmalen vertikalen Leitfähigkeitsanomalie mit TEM-Methoden

O. Koch, S. L. Helwig, B. Tezkan,¹ Das DESERT-Team

Zusammenfassung

Ergebnisse aktiver seismischer Experimente an der Arava-Störung in Jordanien deuten auf eine kleinräumige vertikale Anomalie mit reduzierten seismischen Geschwindigkeiten hin [Haberland et al. [2003]]. Es stellt sich die Frage, ob die Geschwindigkeitsanomalie mit einer Leitfähigkeitsanomalie korreliert. TEM-Messungen können helfen, eine kleinräumige gut leitende Struktur zu lokalisieren und deren Dimensionen zu bestimmen. Simulationsrechnungen zeigen, dass die Transienten horizontaler Magnetfeldsensoren im Zentrum eines Spulensenders genutzt werden können, um die Lage einer vertikalen Leitfähigkeitsstruktur zu ermitteln. Mit Hilfe der Transienten vertikaler Magnetfeldsensoren innerhalb eines Spulensenders, der die Anomalie überdeckt, kann darüberhinaus die Ausdehnung der Anomalie genauer festgestellt werden. Für die praktische Umsetzung dieser Erkenntnisse ist an der Universität zu Köln ein kompaktes Spulensystem konstruiert worden, das gleichzeitig Signale horizontaler als auch vertikaler Magnetfelder aufzeichnen kann.

Einleitung

Im Rahmen des Dead-Sea-Rift-Transec(DESERT)- Projekts wurden zahlreiche geophysikalische Experimente an der Dead-Sea-Transform(DST)-Störung durchgeführt. Ziel des Projekts ist es, die Natur der Scherzone zu erforschen und mehr Informationen bezüglich der grundlegenden Mechanismen von Scherzonen allgemein zu sammeln [DESERT Research Group [2000]]. Die Arava-Störung ist dabei von zentraler Bedeutung im DST-Störungssystem [Ritter et al. [2003]]. Sie erstreckt sich vom Roten Meer bis zum ca. 200 km weiter nördlich gelegenen Toten Meer. Mit aktiven seismischen Experimenten wurde im Jahr 2000 die kleinräumige Struktur dieser Störung näher untersucht [Haberland et al. [2003]]. Aufgrund der Beobachtung von Guided Waves schloss man auf die Existenz einer vertikalen Zone niedriger seismischer Geschwindigkeit von etwa 10 m bis 30 m Breite, welche mit der Damage Zone der Arava-Störung einhergeht. Es stellt sich nun die Frage, ob diese Damage Zone auch mit einer vertikalen Leitfähigkeitsanomalie korreliert, da ähnliche Phänomene an anderen Scherzonen beobachtet worden sind [Hoffman-Rothe [2002]]. Im Folgenden soll eine Möglichkeit gezeigt werden, wie eine schmale vertikale Leitfähigkeitsanomalie mit TEM-Messungen untersucht werden kann.

Theorie

Auf einem homogenen leitfähigen Untergrund sind bei TEM-Messungen im Zentrum eines Spulensenders keine horizontalen Magnetfeldkomponenten vorhanden, die eine Spannung induzieren können. (siehe Abb. 1). Die induzierten Stromsysteme sind in diesem Fall rotationssymmetrisch bezüglich des Zentrums des Senders, wo nur ein vertikales magnetisches Feld entsteht. Auch bei einer horizontalen Schichtung existieren keine horizontalen Magnetfelder im Zentrum eines Spulensenders.

Sobald jedoch eine vertikale leitfähige Struktur hinzu kommt, werden die induzierten Stromsysteme verzerrt (Abb. 2). Ein Empfänger, der im Zentrum des Senders positioniert ist und die Veränderung der horizontalen Magnetfelder detektiert, kann dann ein Signal aufzeichnen. Ein veränderliches horizontales Magnetfeld im Zentrum eines Spulensenders ist ein eindeutiges Indiz für eine mehrdimensionale Leitfähigkeitsstruktur.

Strategie

Zuerst werden auf einem langen Messprofil, das die Anomalie überdeckt, Signale der horizontalen Magnetfeldkomponenten im Zentrum eines Spulensenders aufgezeichnet. Anhand der Amplituden der Daten, kann die Position der Anomalie näher lokalisiert werden, wie man im Folgenden an zwei Beispielen

¹Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln

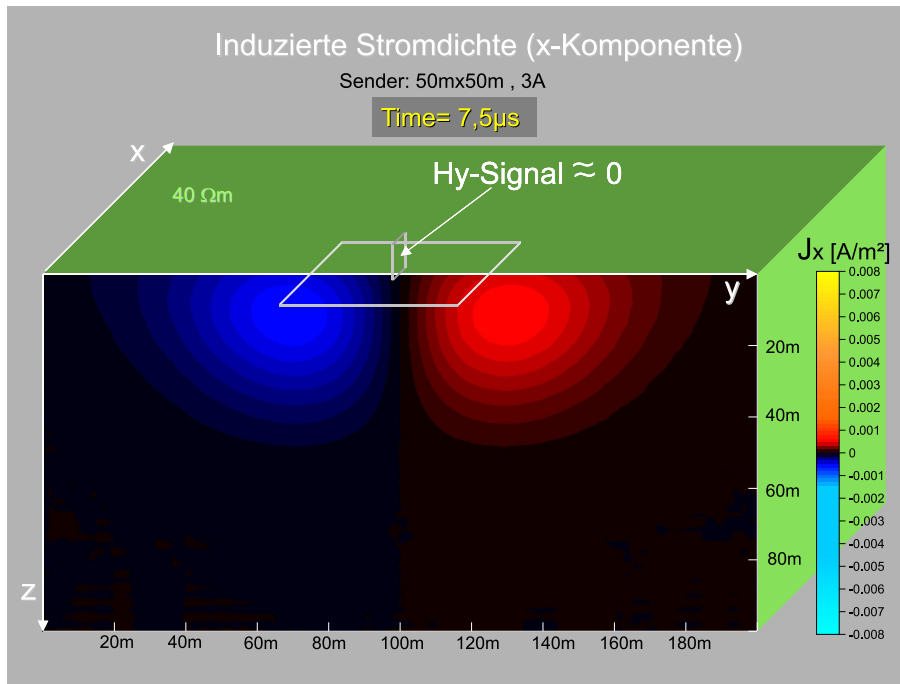


Abbildung 1: Induzierte Stromsysteme verursachen keine horizontalen Magnetfelder im Zentrum eines Spulen-Senders auf einem homogenen Halbraum. Das Signal eines nahe dem Zentrum des Senders vertikal aufgestellten Hy-Empfängers ist verschwindend gering.

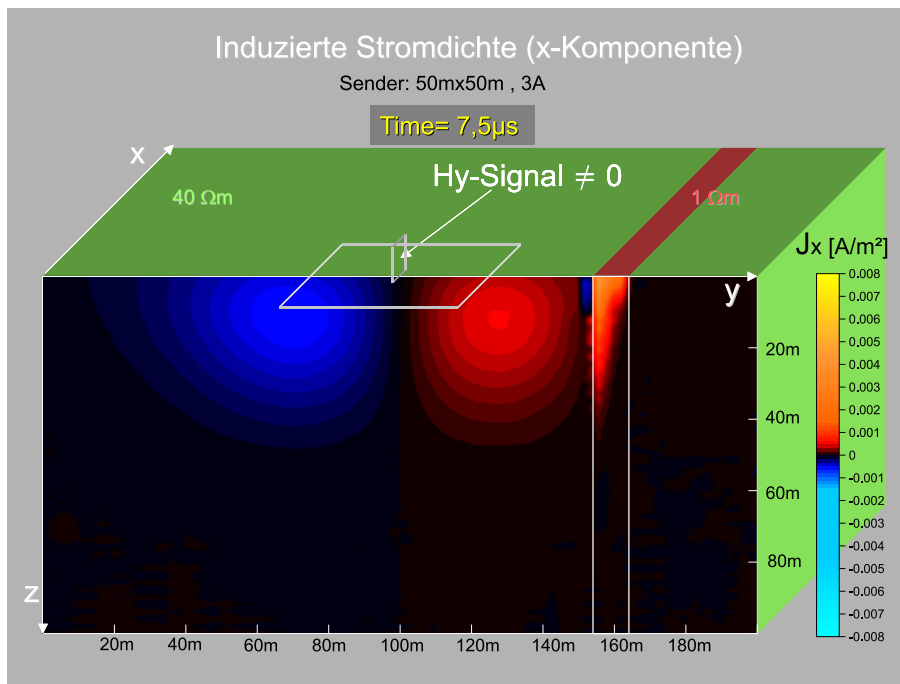


Abbildung 2: Vertikale Leitfähigkeitsanomalie verzerrt induzierte Stromsysteme. Im Zentrum des Senders existiert eine Magnetfeld-Komponente in y-Richtung. Hy-Empfänger registriert ein signifikantes Signal.

len sehen wird. Als erstes Beispiel wird eine vertikale Leitfähigkeitsanomalie in einem homogenen Halbraum betrachtet (Abb. 3). Die Koordinatenachsen seien so gewählt, dass die x-Achse nach Norden und die y-Achse nach Osten zeigt. Die Anomalie erstreckt

sich in y-Richtung von 4m bis 14m und ist unendlich in x-Richtung ausgehend. Ihr ist ein spezifischer Widerstand von $1 \Omega m$ zugeordnet. Der spezifische Widerstandswert der Umgebung ist $40 \Omega m$. Der Widerstandswert der Umgebung ist eine Abschätzung

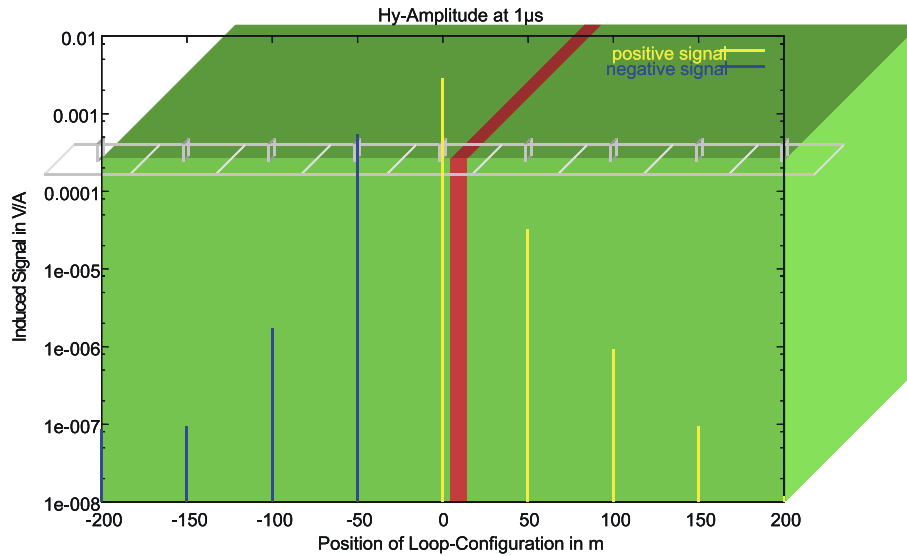


Abbildung 3: Synthetische Daten eines Profils über eine vertikale Anomalie. Dargestellt ist das verwendete Modell mit den Konfigurationen der Stationen. Überlagert sind die synthetischen Hy-Signale $1\mu s$ nach Abschalten der Sender an den Positionen der jeweiligen Empfänger.

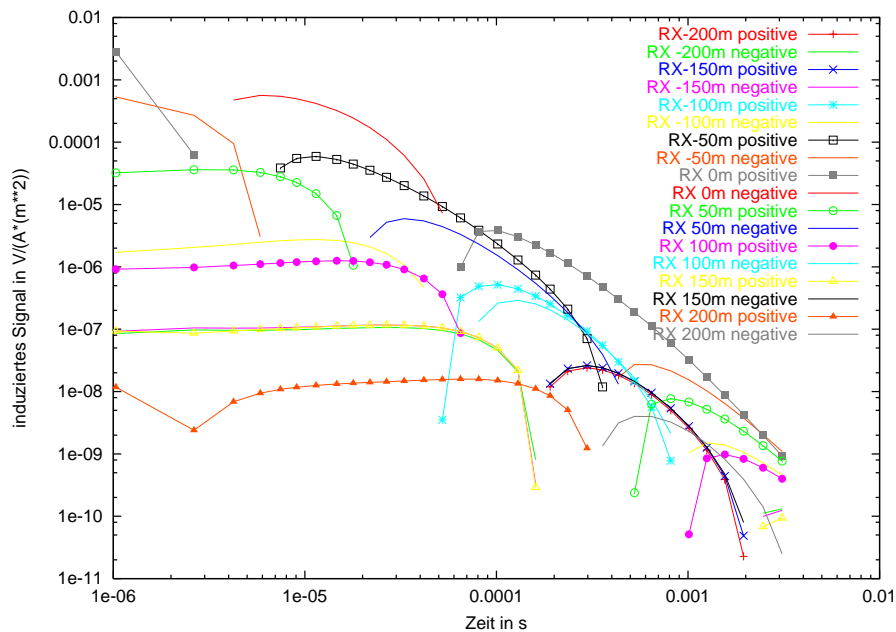


Abbildung 4: Synthetische Hy-Daten der wie in Abbildung 3 dargestellten Messkonfiguration.

des mittleren Widerstands aufgrund von Messergebnissen [Koch et al. [2003b] und Ritter et al. [2003]] in der zu untersuchenden Region. Der Widerstandswert der Anomalie orientiert sich an Ergebnissen von Hoffman-Rothe [2002]. Mit diesem Modell wurden die von der Magnetfeldkomponente in y-Richtung induzierten Spannungen im Zentrum der Sendespule berechnet. Die Sendespule hat die Ausmaße $50m \times 50m$. Sie ist an 9 Stellen im Abstand von $50m$ beginnend bei $-200m$ auf einem Profil senkrecht zur Streichrichtung der Anomalie positioniert. Ein Empfänger, der die Spannung aufzeichnet, welche nur durch Variation der Magnet-

feldkomponente in y-Richtung induziert wird, soll im weiteren Verlauf als Hy-Empfänger bezeichnet werden. Analog sind Hx- und Hz-Empfänger definiert. In Abbildung 3 sind die Signale der Hy-Empfänger dem Modell an den jeweiligen Positionen der Empfänger überlagert. Zur besseren Übersicht wurden nur die Daten zu einem bestimmten Zeitpunkt nach dem Abschalten des Sendestroms ausgewählt (in diesem Fall $1\mu s$). Je geringer die Distanz zwischen Anomalie und Messstation ist, desto größer ist die Amplitude. Beim Überqueren der Anomalie wechselt das Vorzeichen der Daten. Um zu entscheiden, welche Station die

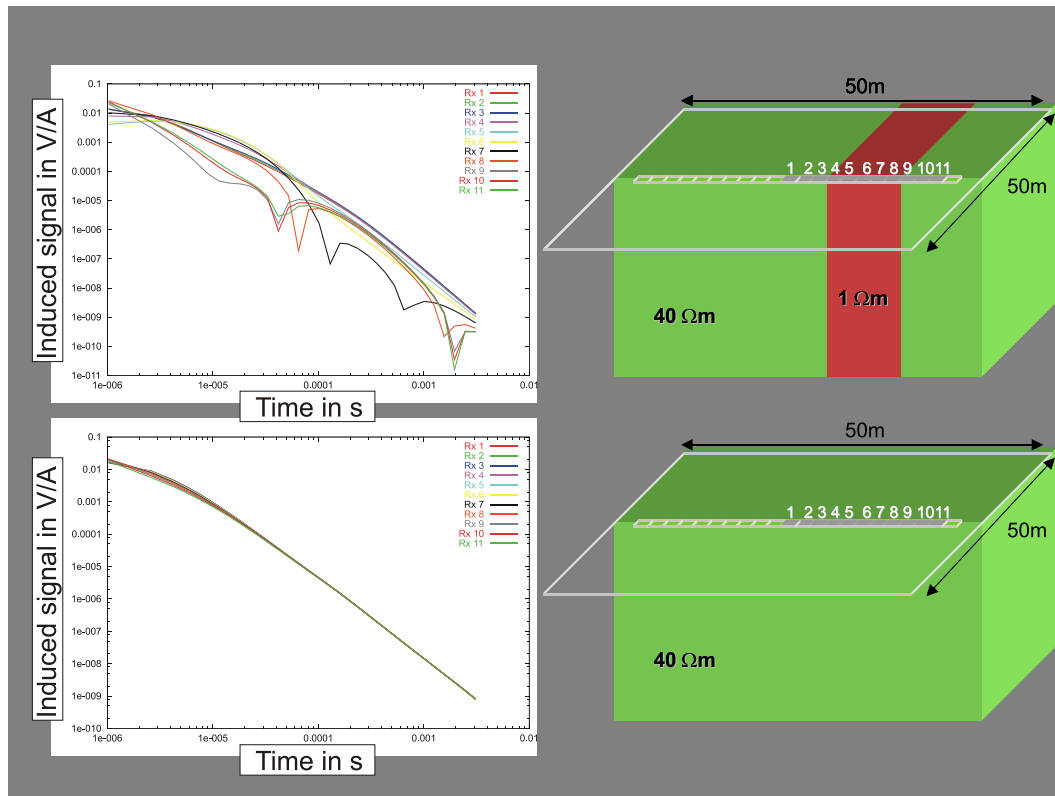


Abbildung 5: Synthetische Hz-Signale innerhalb eines Senders auf einem homogenen Halbraum mit und ohne Leitfähigkeitsanomalie. Den Positionen der Empfänger und den zugehörigen Datenkurven sind Nummern zugeordnet.

Anomalie überlagert, muss man nur die größte positive oder negative Amplitude der Messdaten zu einem festen Zeitpunkt suchen. Aufgrund der maximalen Amplitude bei dem Empfänger an der Position 0m kann man deshalb schließen, dass sich die Anomalie innerhalb des zugehörigen Senders befindet. Bei der Wahl des Zeitpunktes, an dem die Amplituden verglichen werden, muss man darauf achten, dass kein Vorzeichenwechsel die Stärke der Amplituden beeinflusst. In Abbildung 4 sind die synthetischen Empfangssignale in einem Zeitbereich von $1E-06$ s bis $3E-03$ s dargestellt. Wie man erkennen kann, könnte man z.B. auch den Zeitpunkt $3E-05$ s wählen, um die Amplituden zu vergleichen. Natürlich können auch Inversionsrechnungen helfen, die korrekte Lage der Anomalie zu ermitteln. Sie befinden sich zur Zeit aber im Entwicklungsstadium.

Es wäre außerdem denkbar, anhand der Messdaten eines Hy- und Hx-Empfängers Rückschlüsse über die Streichrichtung der Anomalie zu ziehen. Aus dem Hx- und Hy-Signal könnte man einen Vektor berechnen, der senkrecht zur Streichrichtung steht.

Nachdem die Position der Anomalie eingegrenzt worden ist, werden im nächsten Schritt die Signale von Hz-Empfängern innerhalb eines Senders, welcher die Position der Anomalie überdeckt, bestimmt. Hz-Empfänger eignen sich in diesem Fall besser zur De-

tektion der Anomalie als Hx- oder Hy-Empfängern. Die Signale von Hz-Empfängern innerhalb eines Spulen-Senders auf einem homogenen oder horizontal geschichteten Untergrund sind einander sehr ähnlich aufgrund der Homogenität des vertikalen Magnetfeldes. Im Gegensatz dazu zeigen die Signale der Hx- und Hy-Empfänger bereits auf einem homogenen oder horizontal geschichteten Untergrund eine starke Abhängigkeit von der ihrer Position innerhalb des Senders. Eine lokale Störung der Magnetfeldverteilung, welche durch eine vertikale Leitfähigkeitsanomalie verursacht wird, lässt sich daher am deutlichsten beim Vergleich der Signale der Hz-Empfänger erkennen.

In Abbildung 5 sind die synthetischen Signale der Empfänger zu sehen. Im unteren Teil sind zum Vergleich die synthetischen Daten über einem Modell ohne Anomalie zu sehen. Es fällt auf, dass die Anomalie einen starken Effekt auf die Signale der Empfänger hat. Bei dem Modell ohne Anomalie zeigen alle Signale einen ähnlichen Verlauf. Die Signale zu dem Modell mit Anomalie sind jedoch untereinander sehr unterschiedlich und es treten Vorzeichenwechsel in den Daten auf. Auf einem homogenen oder horizontalen geschichteten Untergrund können keine Vorzeichenwechsel bei Hz-Empfängern innerhalb eines Spulen-Senders entstehen. Darüber hinaus kann

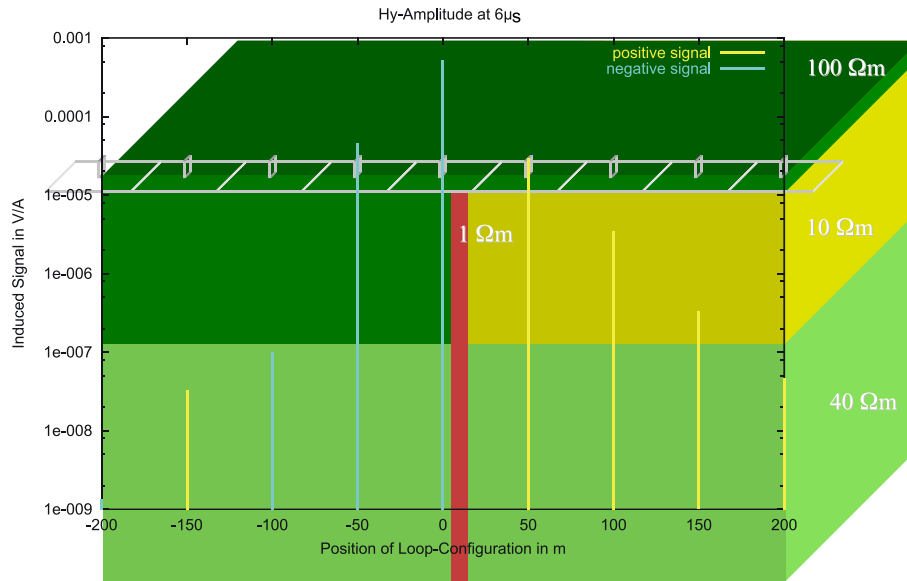


Abbildung 6: Synthetische Daten eines Profils über eine vertikale Anomalie. Dargestellt ist das verwendete Modell mit den Konfigurationen der Stationen. Überlagert sind die synthetischen Hy-Signale $6 \mu s$ nach Abschalten der Sender an den Positionen der jeweiligen Empfänger.

man erkennen, dass die Messkurven der Empfänger, die unmittelbar oberhalb der Anomalie liegen, einen anderen Verlauf haben als die Messkurven der Empfänger neben der Anomalie. Insgesamt ist daher zu erwarten, dass sich die Breite der Anomalie genauer mit Hilfe von zukünftigen Modellrechnungen oder Inversionen bestimmen lässt.

Zusätzlich wurden auch Modellrechnungen mit einem Modell durchgeführt, welches sich an den Ergebnissen einer Central-Loop-Vorerkundung in der Region orientiert [Koch *et al.* [2003a]]. Das Modell beinhaltet eine 5m dicke Deckschicht mit $100 \Omega m$. Die Anomalie ist wie im vorherigen Modell positioniert und besitzt wieder den spezifischen Widerstand von $1 \Omega m$. Westlich der Anomalie dehnt sich unterhalb der Deckschicht eine horizontale Schicht mit $100 \Omega m$ bis in 100m Tiefe aus. Im gleichen Tiefenbereich befindet sich östlich der Anomalie eine horizontale Schicht mit $10 \Omega m$. Unter 100m Tiefe folgt sowohl östlich als auch westlich der Anomalie eine unendlich ausgedehnte Schicht mit $40 \Omega m$. In Abbildung 6 sind die synthetischen Daten der Hy-Empfänger zum Zeitpunkt $6 \mu s$ zu sehen. Auch mit diesem Modell vergrößert sich die Amplitude der Messdaten bei Annäherung an die vertikale Leitfähigkeitsdiskontinuität. Ebenfalls ist beim Überqueren der Diskontinuität ein Vorzeichenwechsel in den Daten zu beobachten. Allerdings zeigen Modellstudien, dass ein ähnliches Verhalten der Amplituden bereits ohne eine sehr gut leitfähige Zone von $1 \Omega m$ zustande kommt. Trotzdem kann auf diese Weise der Ort der Anomalie näher eingegrenzt werden, da diese an der Stelle der Störung vermutet wird. Die Grenze zwischen östlicher und westlicher Leitfähigkeitsverteilung und somit der Ort der Stö-

rung wird sowohl mit als auch ohne Anomalie klar von den Daten angezeigt.

Im nächsten Schritt werden wiederum die Hz-Empfänger innerhalb eines Spulen-Senders positioniert, der die Diskontinuität überdeckt. In Abbildung 7 sind die synthetischen Daten der Empfänger zu sehen. Im Vergleich zu Rechnungen mit einem Modell, welches keine gut leitfähige Zone enthält (siehe Abbildung 7 unten), zeigen sich auch in diesem Fall deutliche Unterschiede. Daher ist es wahrscheinlich, dass die Dimensionen der leitfähigen Zone abermals durch zukünftige Modellstudien und Inversionsrechnungen ermittelt werden können.

Umsetzung

An unserem Institut haben wir bereits einen Prototyp einer 3D-Spule entwickelt. Als 3D-Spule ist eine Kombination aus drei Spulen gemeint, mit der sowohl die Signale der horizontalen als auch vertikalen Magnetfelder gleichzeitig gemessen werden können (siehe Abb. 8).



Abbildung 8: Testmessung mit dem 3D-Spulensystem

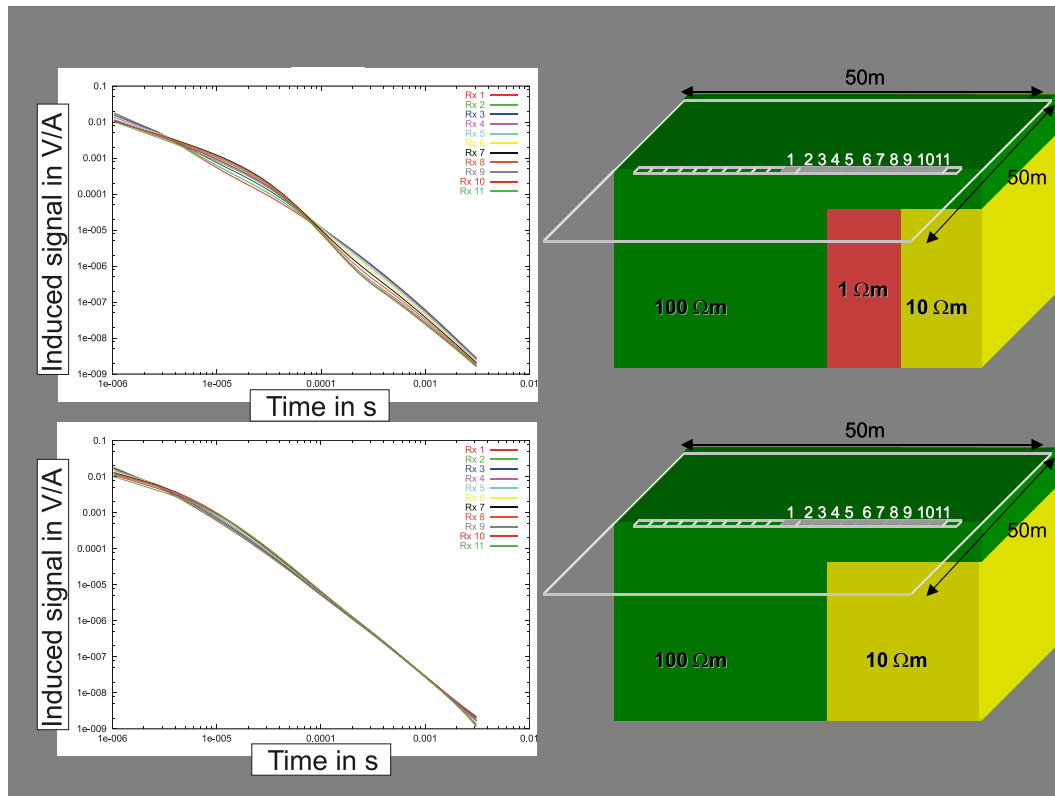


Abbildung 7: Synthetische Hz-Signale innerhalb eines Spulen-Senders, der die zu sehenden Modelle überdeckt.

Die Funktionsfähigkeit des neuen Spulensystems wurde durch Testmessungen sichergestellt. Als Referenz dienten dabei die Signale von bisher benutzten Empfängern. Nach einigen weiteren Testmessungen soll das Spulensystem voraussichtlich im Frühjahr 2004 an der Arava-Störung zum Einsatz kommen.

Literatur

- DESERT Research Group, Multinational geoscientific research effort kicks off in the middle east, *Eos Trans. AGU*, (50), 609,616–617, Dezember 2000.
- Haberland, C., A. Agnon, R. El-Kelaniand, N. Maercklin, I. Quabbani, G. Rümpker, T. Ryberg, F. Scherbaum und M. Weber, Modeling of seismic guided waves at the dead sea transform, *J. Geophys. Res.*, 108(B7), 2342,doi:10.1029/2002JB002309, 2003.
- Hoffman-Rothe, A., Combined structural and magnetotelluric investigation across the West Fault Zone in northern Chile, Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Universität Potsdam, 2002.
- Koch, O., S. L. Helwig, C. Scholl, B. Tezkan und das DESERT Team, TEM-Messungen zur Erforschung der Dead-Sea-Transform im Rahmen des DESERT-Projekts, Kolloquiumsband „Elektromagnetische Tiefenforschung, Königstein, März 2003a.
- Koch, O., S. L. Helwig, B. Tezkan und das DESERT Team, Strategien zur Erkundung einer schmalen vertikalen Leitfähigkeitsanomalie mit TEM-Messungen, Kolloquiumsband Elektromagnetische Tiefenforschung, Königstein, März 2003b.
- Ritter, O., T. Ryberg, U. Weckmann, A. Hoffmann-Rothe, A. Abueladas, Z. Garfunkel und DESERT Research Group, Geophysical images of the dead sea transform in jordan reveal an impermeable barrier for fluid flow, *Geophysical Research Letters*, 30, (14), 1741, 2003.