

TEM-Messungen zur Erforschung der Dead-Sea-Transform im Rahmen des DESERT-Projekts

O. Koch, S. L. Helwig, C. Scholl, B. Tezkan¹, Das DESERT-Team

Zusammenfassung

Innerhalb des Dead-Sea-Rift-Transec(DESERT)-Projekts werden unter anderem elektromagnetische geophysikalische Methoden eingesetzt, um die Leitfähigkeitsstruktur im Untergrund der Dead-Sea-Transform (DST) zu bestimmen. Im September 2002 wurden in diesem Rahmen Long-Offset-Transient-Electromagnetics (LOTEM)- und Central-Loop-TEM-Messungen durchgeführt. Diese Messungen sollen im Vergleich zu Magnetotellurik (MT)-Messungen die Leitfähigkeit des Untergrundes auf einem mittelskaligen (LOTEM) und kleinskaligen (Central-Loop-TEM) Bereich auflösen. Erste 1D-Ergebnisse der Central-Loop-TEM-Messungen zeigen deutlich eine Leitfähigkeitsdiskontinuität im Bereich der Störung. Bei der LOTEM-Datenauswertung stellte sich heraus, dass die Daten von einigen Stationen, die am weitesten westlich der Störungszone liegen, durch die Annahme einer eindimensionalen Leitfähigkeitsstruktur ausreichend erklärt werden können. Die eindimensionalen Ergebnisse dieser Stationen decken sich im wesentlichen mit den Ergebnissen der MT. Anhand der gesamten 1D-LOTEM-Modelle wurde ein simples 2D-Modell entwickelt, welches Phänomene in den Daten erklären kann, die nicht durch 1D-Modelle reproduzierbar sind. Darüber hinaus wurden zweidimensionale Inversionsrechnungen der LOTEM-Daten durchgeführt. Da sich das hierzu notwendige Inversionsprogramm noch in der Entwicklungsphase befindet und zuvor auf keinen realen Datensatz angewendet worden ist, geht die Inversion der Messdaten mit der Programmverbesserung einher. Erste 2-D-Ergebnisse zeigen im wesentlichen eine gute Übereinstimmung mit dem 2D-Modell der MT.

Einleitung

Das Ziel des DESERT-Projekts ist es, die Beschaffenheit der Dead-Sea-Transform-(DST)-Störung zu erforschen und Rückschlüsse auf die Natur von anderen Scherzonen zu ziehen [DESERT Research Group [2000]]. Hierzu werden verschiedene Methoden eingesetzt, um verschiedene physikalische Parameter des Untergrundes auf unterschiedlichen Skalen aufzulösen. Die Ergebnisse aller Methoden sollen letztendlich gemeinsam interpretiert werden. Im September 2002 wurden innerhalb des Projekts eine Long-Offset-Transient-Electromagnetics (LOTEM)- und eine Central-Loop-TEM-Messung an der Arava-Störung in Jordanien durchgeführt (siehe Abb. 1). Die Arava-Störung ist in der Region zwischen Totem und Rotem Meer Teil der DST und zeichnet sich durch eine besonders einfache Struktur aus [Ritter et al. [2003]]. Die verwendeten elektromagnetischen Verfahren sollen die Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund auf einem im Vergleich zur Magnetotellurik(MT) mittelskaligen (LOTEM) und kleinskaligen (Centra-Loop-TEM) Bereich erforschen.

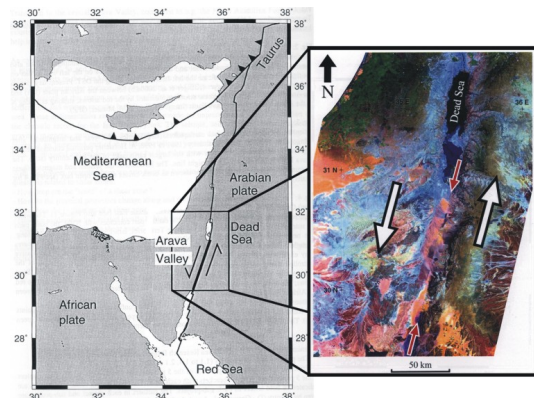


Abbildung 1: Lage des Dead-Sea-Störungssystems. Rote Pfeile markieren die Arava-Störung. [DESERT Research Group [2000]].

Lage der Messstationen

Das LOTEM-Profil befand sich auf dem südlichsten MT-Profil und erstreckte sich auf einer Länge von 10 km senkrecht über die Arava-Störung (siehe Abb. 2).

¹Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln

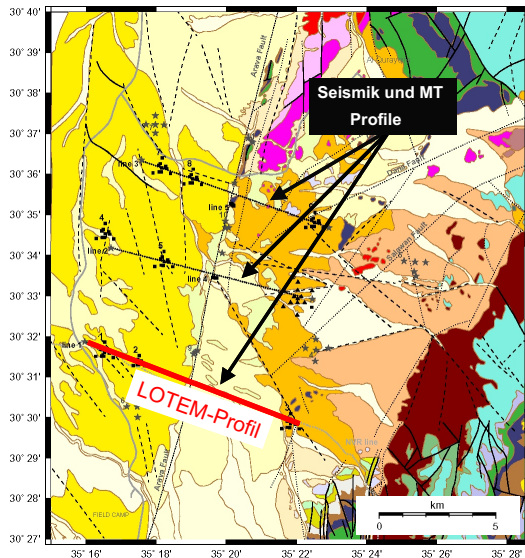


Abbildung 2: Lage des LOTEM-Profiles. (Die Karte zeigt außerdem geologische Formationen an, deren Eigenschaften hier nicht näher erläutern werden sollen)

Insgesamt wurden 4 Sender und 65 Empfangsstationen aufgebaut. Der Aufbau des Profils wurde bewusst symmetrisch zum Verlauf der Arava-Störung gewählt, um später ein zweidimensionales Leitfähigkeitsmodell der Störung zu entwickeln (siehe Abb. 3). Das Central-Loop-TEM Profil befindet sich im Zentrum des LOTEM-Profiles und überdeckte einen Bereich von 1050 m Länge. Insgesamt wurden dabei 22 Stationen aufgebaut (Sender: 50 m x 50 m, Empfänger: 20 m x 20 m). Die Central-Loop-Messung sollte dabei vor allem als Vorerkundung für weitere Messungen dieser Art dienen, aber auch Informationen über die kleinräumige Leitfähigkeitsverteilung unmittelbar an der Störung liefern.

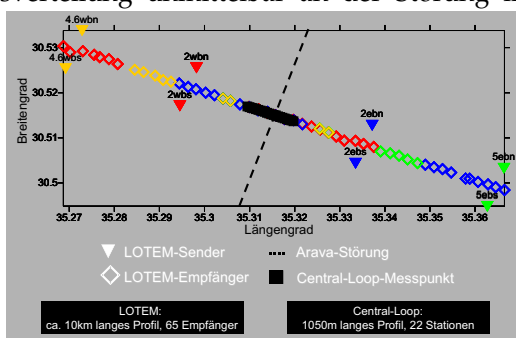


Abbildung 3: Lage der LOTEM- und Central-Loop-TEM-Stationen. Die aus MT-Messungen angezeigte Lage der DST ist mit einer gestrichelten Linie markiert

Auswertung

Bei der Auswertung der TEM-Daten wurden zunächst Inversionsrechnungen mit eindimensionalen Modellen durchgeführt. Bei den Inversionen wurde stets das Occam-Verfahren [Constable et al. [1987]] mit un-

terschiedlichen Glättungsbedingungen angewandt. Durch die Abweichung der Rechnungen mit verschiedenen Glättungsbedingungen lassen sich Aussagen über die Auflösungsgrenze der Messdaten treffen [Commer [1999]]. Bei der Auswertung der LOTEM-Daten wurden zusätzlich auch Joint Inversionen durchgeführt, bei denen mehrere gemessene LOTEM-Komponenten gemeinsam in einer Inversionsrechnung interpretiert werden. Grundsätzlich wurden für die 1D-Inversionen Daten vernachlässigt, die nicht durch ein 1D-Modell erklärbar sind. Aufgrund der 1D-Inversionsergebnisse wurde dann ein 2D-Modell entwickelt. Mit Hilfe einer 3D-TEM-Vorwärtsrechnung, welche nach der Spektralen-Lanzos-Dekompositionsmethode arbeitet [Druskin und Knizhnerman [1988]], wurden zu diesem Modell synthetische Daten erzeugt.

Darüber hinaus wurden 2D-Inversionsrechnungen der TEM-Daten durchgeführt. Da die Entwicklung des hierzu notwendigen Inversionsprogramms noch nicht abgeschlossen ist und es erstmalig auf reale Datensätze angewendet wird, geht die Inversion der Messdaten mit der Programmverbesserung einher.

Ergebnisse

In Abbildung 4 ist eine interpolierte Übersicht der 1D-Modelle dargestellt, welche sich aus Inversionsrechnungen mit den Central-Loop-TEM-Daten ergeben. Man kann erkennen, dass der westliche oberflächennahe Bereich des Profils (bis 5000 m) deutlich schlechter leitend ist als der östliche Bereich. Dieses Phänomen ist besonders markant bis in ca. 10 m Tiefe, setzt sich jedoch bis in 100 m Tiefe fort. Die Lage dieser Diskontinuität stimmt mit der Lage der Diskontinuität aus den MT-Ergebnissen überein. Die Störung scheint daher die Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund sowohl im kleinskaligen als auch großskaligen Bereich zu beeinflussen. Man muss jedoch hervorheben, dass die Widerstände nahe der Störung aufgrund der dort herrschenden Mehrdimensionalität möglicherweise nicht korrekt durch 1D-Inversionen bestimmt werden können. Deshalb ist z.B. der außergewöhnliche schlecht leitende Bereich bei 4900m des Messprofils in etwa 50m Tiefe wahrscheinlich ein Artefakt der 1D-Auswertung.

Die LOTEM-Daten lassen sich größtenteils sehr gut durch die 1D-Inversionsrechnungen anpassen. Bei einigen Stationen konnten die gemessenen Komponenten außerdem durch 1D-Joint-Inversionen zufriedenstellend angepasst werden (siehe Abb. 5). Daraus lässt sich folgern, dass der aufgelöste Untergrundbereich dieser Stationen eindimensional interpretiert werden kann. Einige Datensätze weisen jedoch, wie zu erwarten war, eindeutige Merkmale mehrdimensionaler Strukturen auf. So müssen z.B. bei den Messdaten zum Sender 2eb vor der 1D-Inversion Vorzeichenwechsel am Ende entfernt werden, was dazu führen

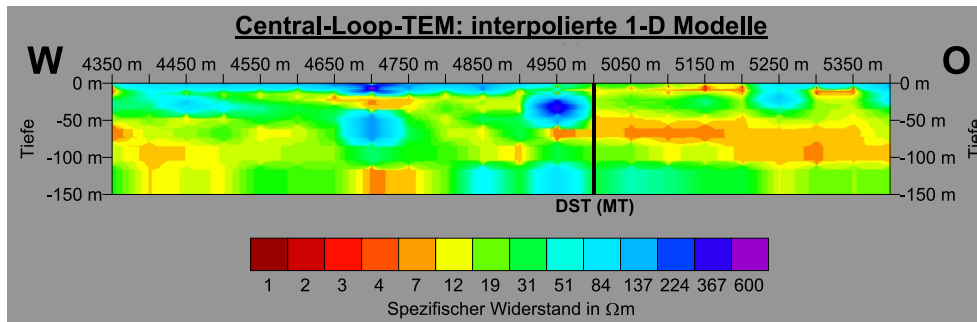


Abbildung 4: Interpolierte Übersicht der 1D-Inversionsresultate der Central-Loop-TEM Messungen. Die schwarze Linie kennzeichnet die Lage der Dead-Sea-Transom wie sie aus den MT-Ergebnissen hervorgeht.

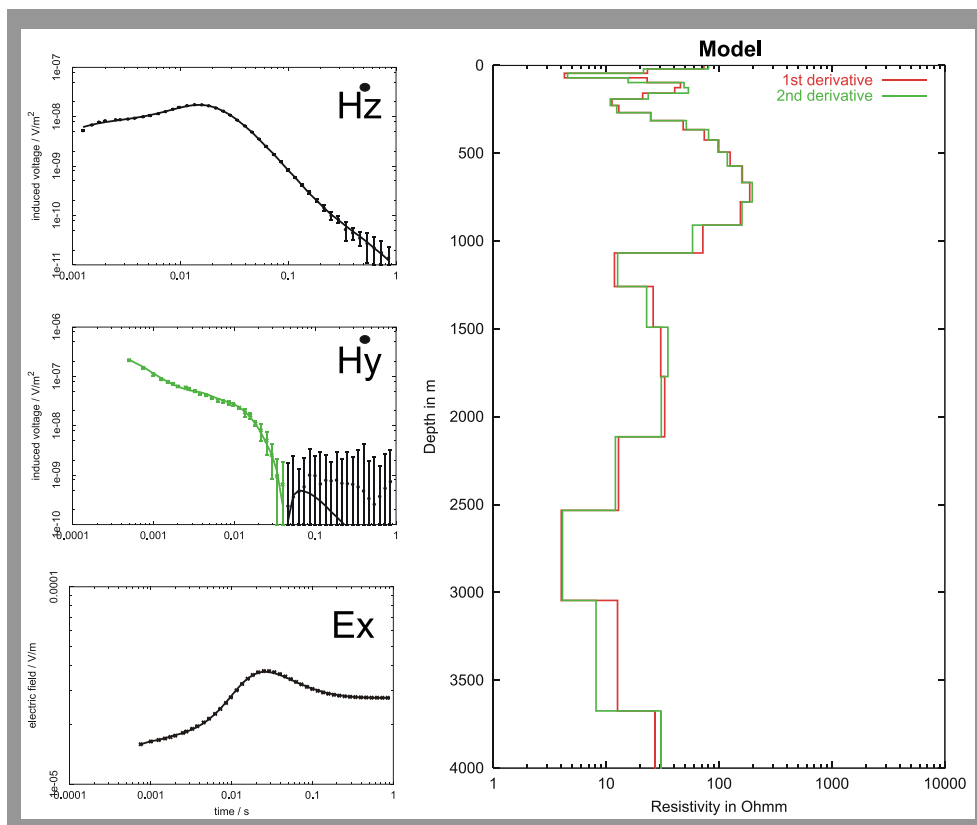


Abbildung 5: Beispiel gut angepasster LOTEM-Messdaten durch 1D Joint Inversion.

kann, dass die verbleibenden Datenpunkte fälschlicherweise durch Modelle angepasst werden, die im unteren Bereich schlecht leitende Strukturen besitzen. Die berechneten 1D-Modelle können daher insgesamt nur als Orientierung für spätere mehrdimensionale Interpretationen dienen. Man kann sie beispielsweise verwenden, um ein Startmodell für zukünftige 2D-Inversionsrechnungen zu erstellen. In Abbildung 6 die resultierenden 1D-Modelle der LOTEM-Hz-Daten zu jedem Sender interpoliert dargestellt. Als Hz-Daten werden die Daten der Empfänger bezeichnet, welche die Ableitung des vertikalen Magnetfelds aufzeichnen. Zum Vergleich sind im oberen Teil die Ergebnisse der MT aufgeführt. Wie man er-

kennen kann, stimmt westlich der Störung die Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund der MT-Resultate größtenteils mit der der LOTEM-Resultate überein. Allerdings beinhalten die 1D-LOTEM-Modelle im Vergleich zum MT-Modell zwei gut leitende Schichten im Tiefenbereich von 0 m bis ca. 700 m. Bei den 1D-LOTEM Ergebnissen zum Sender 2wb erstreckt sich unter einer schlechtleitenden Deckchicht mit Widerstandswerten über 100 Ωm eine gut leitende Schicht in etwa 100m bis 250m Tiefe mit Widerständen unter 10 Ωm . Unterhalb der ersten gut leitenden Schicht folgt eine schlechtleitende Struktur mit Werten um 50 Ωm bis in ca. 400m Tiefe. Von ca. 400m bis 600m zeigt sich in den Ergebnissen zu Sender 2wb erneut

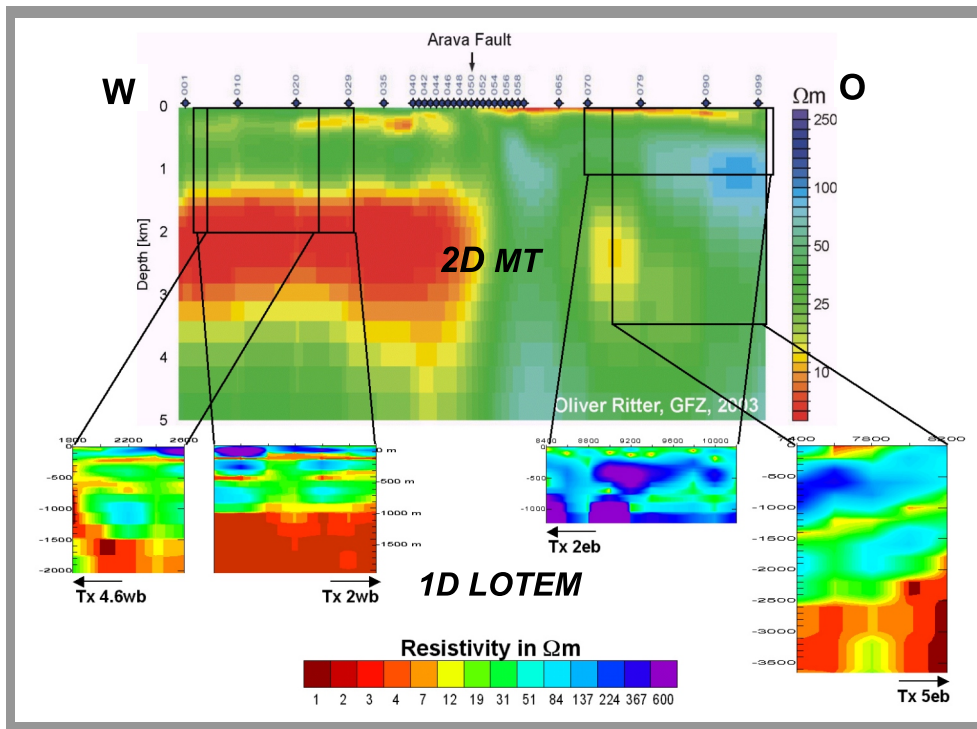


Abbildung 6: Vergleich der interpolierten 1D LOTEM-Modelle der Hz-Messdaten mit dem 2D Modell der MT [Ritter et al. [2003]]

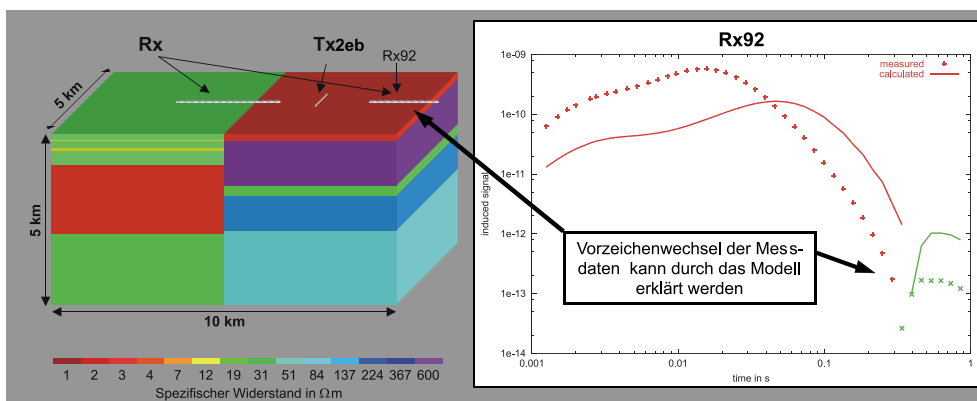


Abbildung 7: erstes 2D-Modell mit dem die Vorzeichenwechsel in den Messdaten qualitativ erklärt werden können.

eine gut leitende Schicht. Darunter bis in ca. 1000m Tiefe treten vergleichsweise schlechtleitenden Strukturen auf. Ab 1000m Tiefe beginnt eine sehr gut leitende Struktur mit Widerstandswerten unter $5 \Omega m$, deren Unterkante tiefer als 2000m zu liegen scheint und von der LOTEM-Messung nicht mehr aufgelöst werden kann. Bei den 1D-Ergebnissen zu Sender 4.6wb zeigt sich eine ähnliche Schichtabfolge wie bei den 1D-Ergebnissen zum Sender 2wb. Allerdings beginnt die unterste sehr gut leitende Struktur in größerer Tiefe als bei den Modellen zu Sender 2wb. Ebenso scheint die zweite gut leitende Schicht von der Oberfläche aus tiefer zu liegen bei etwa 500m bis 700m. Darüberhinaus scheint der westliche Rand des Mo-

dells zu Sender 4.6wb auf eine horizontale Änderung in der Leitfähigkeitsverteilung am westlichsten Rand des Messprofils hinzudeuten. Auch ist die Anpassung der Daten zum Sender 4.6wb durch 1D-Modelle deutlich schlechter als bei den Daten zum Sender 2wb, was durch einen mehrdimensionalen Untergrund im Westen des Messprofils erklärbar ist. Im Osten der Störung zeigt sich bei dem interpolierten 1D-Modell zu Sender 5eb im Westen im Einklang mit den MT-Ergebnissen eine gut leitende Deckschicht bis in etwa 200m Tiefe über einer schlecht leitenden Struktur, die sich bis in ca. 1300m erstreckt. In ca. 1300m Tiefe beginnt wiederum eine gut leitende Struktur, die bis ca. 1700m Tiefe reicht und im MT-Modell nicht erkennbar

ist. Es folgen schlechter leitende Strukturen bis in ca. 2400m Tiefe. Darunter existiert eine sehr gut leitende Struktur, die auch im MT-Modell zu sehen ist. Nach Osten hin liegen die erwähnten Strukturen deutlich näher an der Oberfläche. Die gut leitende Deckschicht ist in diesem Bereich nicht mehr vorhanden. Auch im MT-Modell verschwindet diese Deckschicht in diesem Bereich. Die zweite gut leitende Struktur tritt bereits in 1000m Tiefe auf und die Unterste reicht von etwa 1500m bis mindestens 3600m. Da sich die Leitfähigkeitsverteilung des interpolierten Modells signifikant horizontal ändert, scheint der Bereich nicht eindimensional beschaffen zu sein. Die zunehmende Größe der untersten gut leitfähigen Struktur könnte auf die Existenz eines gut leitfähigen Bereichs am östlichen Rand des Messprofils zu Sender 5eb hinweisen. Zum Sender näher gelegene Stationen würden die leitfähige Struktur besser auflösen, was sich in einem 1D-Modell in einer größer werdenden leitfähigen Schicht äußern kann. Das MT-Modell zeigt jedoch am östlichen Rand des Messprofils zu Sender 5eb im Tiefenbereich von 1000m bis 3600m schlecht leitende Strukturen an. Die gut leitende Struktur der MT am unteren linken Rand des Abschnitts müsste sich bei einer eindimensionalen Interpretation in einer nach Westen dicker werdenden leitfähigen Schicht äußern. Das interpolierte 1D-Modell zu Sender 2eb zeigt eine gut leitende Deckschicht bis in etwa 250m Tiefe. Darunter folgen schlecht leitende Strukturen, die wahrscheinlich durch die beginnenden Vorzeichenwechsel in den Daten verursacht werden. Es wird sich schließlich zeigen, ob 2D-Inversionen der LOTEM-Daten ein ähnliches Bild der Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund erzeugen.

Die signifikanten Strukturen der 1D-Modelle wurden in einem zweidimensionalen Modell zusammengefasst. Vorwärtsrechnungen mit diesem Modell können bereits die für eine mehrdimensionale Untergrundstruktur charakteristischen Vorzeichenwechsel erklären, die bei der Mehrzahl der Stationen östlich des Senders 2eb auftreten (siehe Abb. 7). Ein feinstrukturiertes 2D-Modell kann jedoch nur durch 2D-Inversionsrechnungen bestimmt werden.

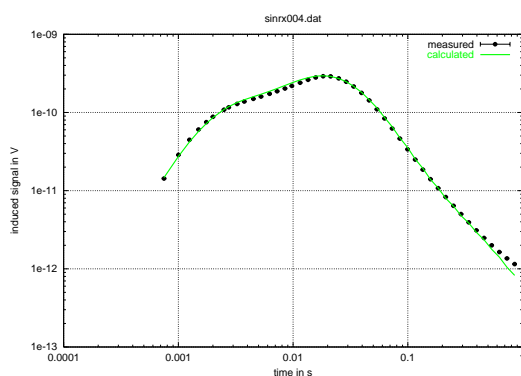


Abbildung 8: Beispiel gut angepasster LOTEM-Hz-Daten durch 2D-Inversion

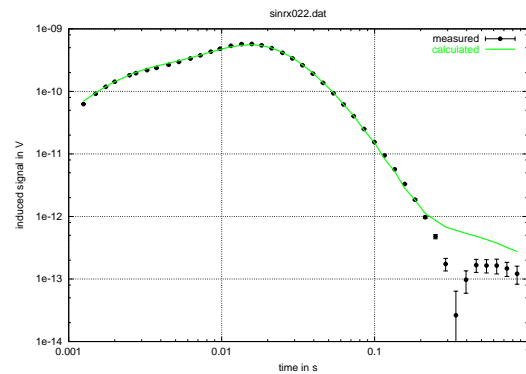


Abbildung 9: Beispiel von LOTEM-Hz-Daten deren Vorzeichenwechsel durch die 2D-Inversion nicht angepasst werden.

In Abbildung 10 ist ein Modell zu sehen, welches durch erste 2D-Inversionsrechnungen der LOTEM-Daten zu Stande kam. Hierbei wurden alle Daten der vertikalen Magnetfelder (Hz-Daten) zum Sender 2eb benutzt. Bereits die erste Anwendung des 2D-Inversionsprogramms auf reale Daten, erzielte bei einigen Datensätzen eine hervorragende Anpassung (siehe Abb. 8). Manche Datensätze werden jedoch noch nicht ausreichend angepasst. Außerdem können Vorzeichenwechsel in den Daten bisher durch die Inversionsrechnungen nicht reproduziert werden (siehe Abb. 9). Um das Ergebnis in Abbildung 10 zu beurteilen, sind in Abbildung 11 die Sensitivitäten der Modellzellen dargestellt. Die Sensitivität, die den Einfluss eines Modellparameters auf die Datenanpassung darstellt, der in diesem Fall der jeweilige Widerstand einer Modellzelle ist, ist logarithmisch aufgetragen. Grüne bis blaue Gebiete haben einen hohen Einfluss auf die Datenanpassung und rote bis weiße einen geringen bzw. vernachlässigbaren Einfluss. Der Sender 2eb befindet sich bei den Koordinaten $y=0\text{km}$ und $z=0\text{km}$. Die Störung verläuft ungefähr bei $y=-2\text{km}$ in x -Richtung. Wie bei dem MT-Modell zeigt sich im LOTEM-Modell eine sehr gut leitfähige Schicht bis in ca. 250m Tiefe östlich der Störung, die sich westlich um 250m Tiefe verschoben fortsetzt. Im Westen wird sie beim LOTEM-Modell von einer sehr schlecht leitfähigen Schicht überlagert. Aufgrund der Sensitivität in diesem Bereich sind aber durchaus Zweifel an dem absoluten Widerstand dieser Region berechtigt. Ebenso ist der schlecht leitende Bereich ab ca. 1,5km Tiefe östlich des Senders und der oberflächennahe Bereich am oberen rechten Bildrand nicht gut aufgelöst. Interessant ist, dass sich ein sehr gut leitfähiger Bereich östlich der Störung ab einer Tiefe von etwa 1,5km im Modell befindet, welcher auch gut aufgelöst zu sein scheint. Im MT-Modell ist dieser Bereich in der Form nicht zu erkennen. In Abbildung 11 fallen außerdem die scheinbar gut aufgelösten vertikalen Balken am linken und rechten Modellrand auf. Dieses Phänomen liegt an der gewählten Modelldiskretisierung. Die ho-

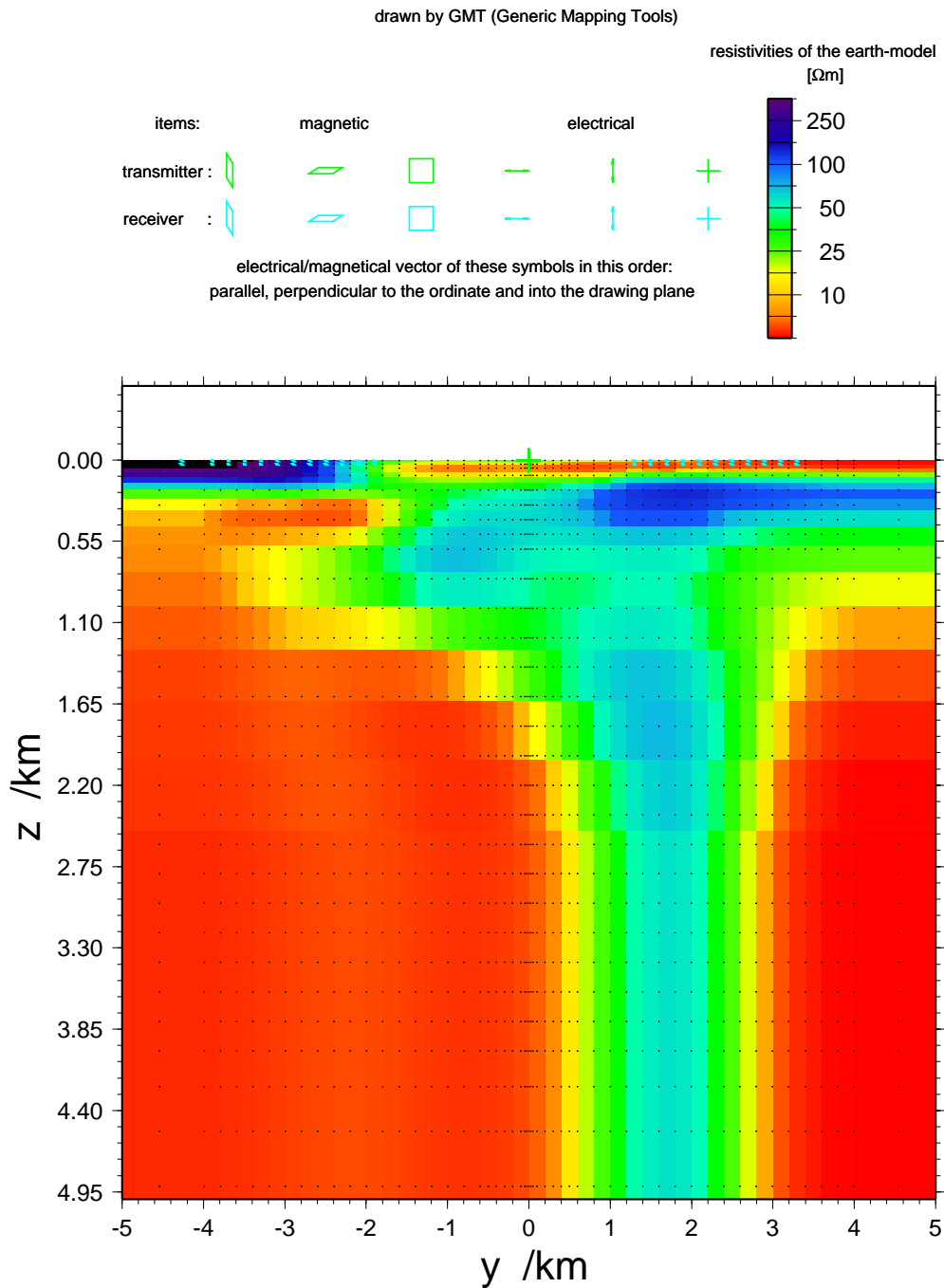


Abbildung 10: erstes 2D-Inversionsmodell der LOTEM-Hz-Daten des Senders 2eb

horizontale Ausdehnung der äußeren Modellzellen wurde offensichtlich zu groß gewählt, so dass ihr Einfluss auf die Datenanpassung im Verhältnis zu den anderen Modellzellen zu dominierend ist.

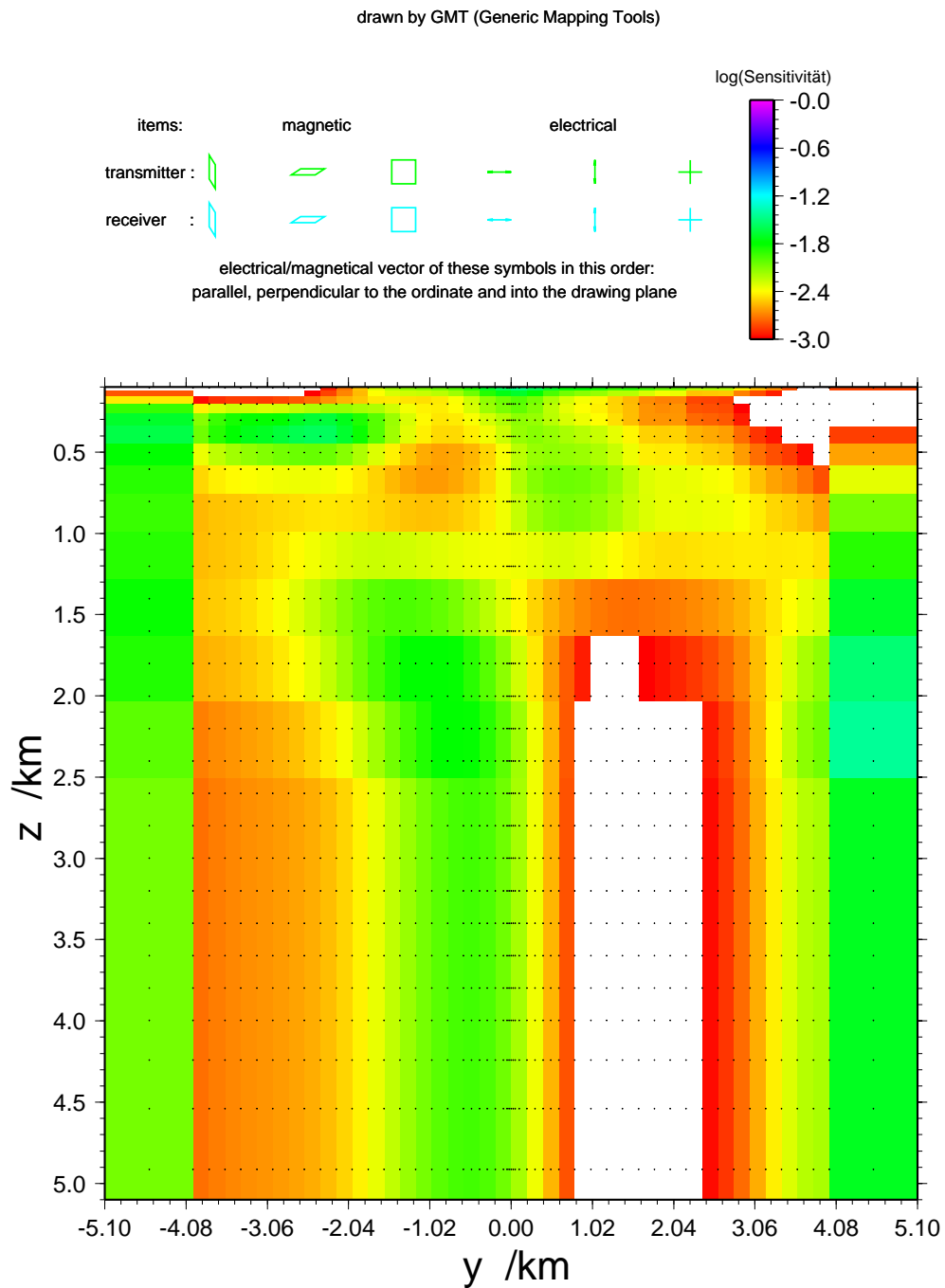


Abbildung 11: Einfluss der Modellzellen gegenüber der Datenanpassung. (Aufgetragen ist der farblich kodierte Logarithmus der normierten Summe der transformierten Einträge einer Spalte der Jacobimatrix an dem jeweiligem Ort des zugehörigen Parameters).

Diskussion

Die Ursache für den starken Leitfähigkeitskontrast, der sich in den bisherigen Central-Loop-TEM-Ergebnissen zeigt, ist bisher nicht bekannt. Man kann vermuten, dass die leitfähigen Strukturen durch Sedimentablagerungen zustande kommen. Eine detailliertere geologische Erklärung steht aber noch aus. Für einen gesicherten Vergleich der LOTEM- und MT-Ergebnisse fehlen derzeit noch endgültige 2D-Inversionsmodelle, die Informationen aller gesammelten Daten, insbesondere der gemessenen elektrischen Felder, beinhalten. Die ersten 2D-Inversionsmodelle und die erzielte Datenanpassung sind jedoch sehr vielversprechend. Zur Zeit wird verstärkt an der Weiterentwicklung des 2D-Inversionsprogramms gearbeitet, welches später auch zur dreidimensionalen Auswertung elektromagnetischer Daten erweitert werden soll [Martin [2003] und Scholl *et al.* [2003]]. Als nächstes wird versucht, eine 2D-Inversion von LOTEM-Daten durchzuführen, die zu mehreren Sendern gehören, wobei auch die Daten der elektrischen Felder hinzugenommen werden sollen. Eine gemeinsame zweidimensionale Inversion der Central-Loop-TEM- und LOTEM-Daten ist momentan wegen des benötigten Speichervolumens nicht möglich. Daher wird parallel zu der 2D-Inversion der LOTEM-Daten an einer 2D-Inversion der Central-Loop Daten gearbeitet. Dieses Inversionsproblem ist aufwendiger. Für jede Station muss eine eigene Modelldiskretisierung vorgenommen werden, da jeder Empfänger zu einem eigenen Sender gehört. Zusätzlich sind im Frühjahr 2004 TEM-Messungen mit einem induktiven Sender in einer Konfiguration geplant, die es erlaubt, in allen drei Raumrichtungen ein Signal aufzuzeichnen. Auf diese Weise soll versucht werden, kleinräumige mehrdimensionale leitfähige Strukturen an der Störungszone aufzulösen (siehe Koch *et al.* [2003]).

Literatur

- Commer, M.**, Ein spezielles Verfahren der eindimensionalen kombinierten Inversion von Long-Offset Transient Electromagnetic (LOTEM) – und Magnetotellurik (MT) – Daten, Diplomarbeit, Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, Februar 1999.
- Constable, S. C., R. L. Parker und C. G. Constable**, Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, *Geophysics*, 52, 289–300, 1987.
- DESERT Research Group**, Multinational geoscientific research effort kicks off in the middle east, *Eos Trans. AGU*, , (50), 609,616–617, Dezember 2000.
- Druskin, V. L. und L. A. Knizhnerman**, A spectral semi-discrete method for the numerical solution of 3D-nonstationary problems in electrical prospecting, *Physics of the solid Earth*, 24, 641–648, 1988.
- Koch, O., S. L. Helwig, B. Tezkan und das DESERT Team**, Strategien zur Erkundung einer schmalen vertikalen Leitfähigkeitsanomalie mit TEM-Messungen, Kolloquiumsband Elektromagnetische Tiefenforschung, Königsstein, März 2003.
- Martin, R.**, 3D-TEM Sensitivitäten mit zugeordneten Greenschen Funktionen, Kolloquiumsband Elektromagnetische Tiefenforschung, Königsstein, März 2003.
- 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.
- Scholl, C., R. Martin, M. Commer, S. L. Helwig und B. Tezkan**, 2d-Inversion von LOTEM-Daten, Kolloquiumsband Elektromagnetische Tiefenforschung, Königsstein, 2003.