

Auswertung transientelektromagnetischer Meßdaten aus dem Makhtesh Ramon, Israel, mit mehrdimensionalen Modellen

Stefan L. Helwig, Köln; Mark Goldman, Holon, Israel; Andreas Hördt, Köln

1 Einleitung

Die transiente Elektromagnetik (TEM) dient dazu, die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Erdinneren zu erkunden. Auf der Erdoberfläche wird ein Sender, meist eine große Rechteckspule oder ein langer geerdeter Dipol, aufgebaut, in dem ein starker Gleichstrom an-, aus- oder umgeschaltet wird. Die dabei in die Erde induzierten elektromagnetischen Felder diffundieren in den Untergrund und werden durch seine elektrische Leitfähigkeitsverteilung beeinflusst. Mittels Sensoren an der Erdoberfläche läßt sich das zeitliche Verhalten der verschiedenen Feldkomponenten registrieren, und es können daraus Rückschlüsse auf die Leitfähigkeitsverteilung gewonnen werden.

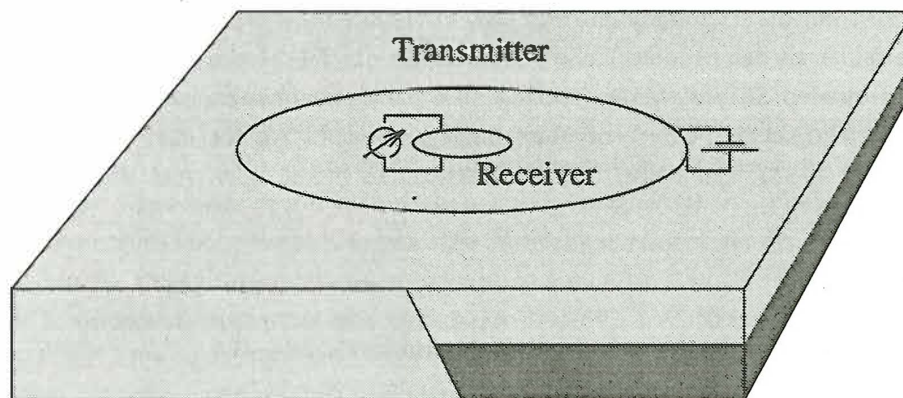


Abbildung 1: TEM-Messung mit central-loop-Anordnung. Die Empfängerspule befindet sich in der Mitte der Senderspule.

Die benutzten Sender-Empfänger-Anordnungen sind je nach Zielsetzung verschieden. Zum Erreichen größter Eindringtiefen benutzt man z.B. bei der LOTEM-Methode (Strack, 1985, 1992) starke Bipolsender und positioniert die Empfänger mehrere Kilometer vom Sender entfernt. Bei geringeren Eindringtiefen von einigen hundert Metern sind central-loop-Anordnungen aber eine wesentlich praktikablere Lösung (Helwig, 1994). Bei dieser Art der Anordnung befindet sich eine Empfängerspule, die die Änderung des vertikalen Magnetfeldes mißt, genau in der Mitte der Senderspule (Abb. 1).

Mit einer derartigen Anordnung wurden 1987 im Rahmen einer Machbarkeitsstudie des Institute for Petroleum Research and Geophysics, Holon, Israel, 16 TEM-Sondierungen im Makhtesh Ramon im zentralen Negev (Abb. 2 und 4) durchgeführt.

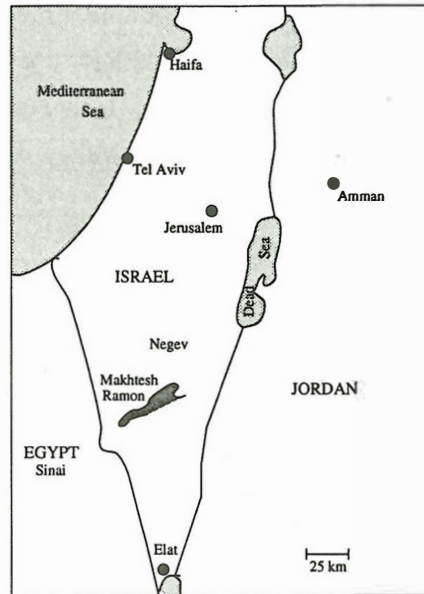


Abbildung 2: Lage des Makhtesh Ramon im Zentralnegev, Israel.

2 Vorstellung des Meßgebietes

Das Makhtesh Ramon ist eine Erosionsmulde, die etwa 40 km lang und an ihrer breitesten Stelle etwa 9 km breit ist. In ihr sind Quarzsyenitstrukturen aufgeschlossen (Abb. 3), die wegen ihres Reichtums an Erzmineralen unter Umständen von wirtschaftlicher Bedeutung sein könnten.

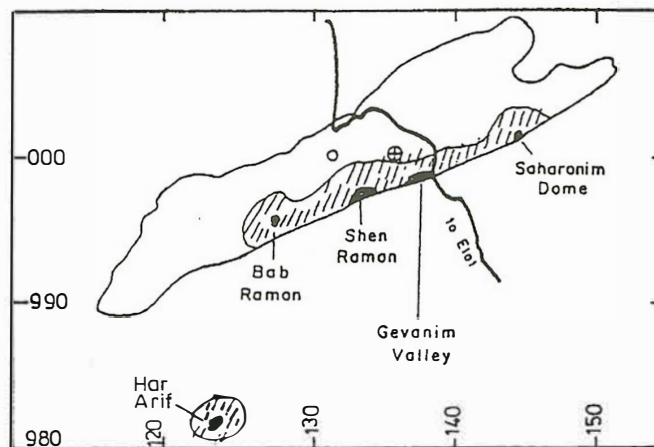


Abbildung 3: Verteilung der Quarzsyenite im Makhtesh Ramon. Schwarze Flächen markieren Aufschlüsse, schraffierte Flächen stellen die vermutete Verteilung unter der Oberfläche dar. Das Kreuz markiert die Lage des Ramon I-Bohrlochs. Aus Itamar und Baer (1986).

Ziel der Messungen war es, genauere Kenntnisse über die unterirdische Verbreitung dieser Quarzsyenite zu erhalten, die sich als schlechte Leiter von der gut leitenden sedimentären Um-

gebung abheben. Insbesondere interessierte man sich dafür, ob zwischen dem Shen Ramon und dem Gevanim Valley eine unterirdische Verbindung existiert, wie bereits in den fünfziger Jahren von Bentor (1952) und Mazor (1955) vermutet wurde. Daher wurden die TEM-Sondierungen alle in dem Gebiet zwischen Shen Ramon und Gevanim Valley durchgeführt (Abb. 4).

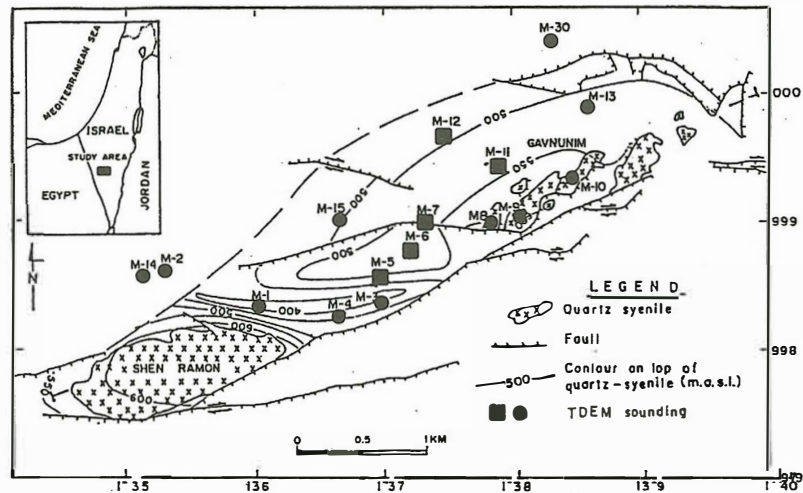


Abbildung 4: Karte des Meßgebiets. Die schwarzen Punkte und Quadrate stellen die Lage der Meßstellen dar. Die Konturlinien geben die Tiefe des schlechten Leiters nach Ergebnissen der 1D-Inversionen an. Aus Goldman et al. (1989).

3 Vorstellung der Stationen

Eine eindimensionale Interpretation der Daten, die von Goldman et al. (1989) veröffentlicht wurde, zeigt, daß bestimmte Teile der Daten sich nicht mehr mit eindimensionalen Modellen erklären lassen. Wir werden hier im weiteren besonders auf die Sondierungen M5, M6, M7 und M11 eingehen, um die verschiedenen Effekte an Hand dieser Datensätze zu diskutieren. Abbildung 5 zeigt die Spätzeitkurven des scheinbaren spezifischen Widerstandes für diese Stationen als Punkte, die Ergebnisse der 1D-Inversionen als durchgezogene Linien sowie die dazugehörigen Erdmodelle.

Es zeigt sich, daß die Kurven von M5, M6 und M11 alle drei in etwa den gleichen Verlauf haben. Man erkennt zunächst eine abfallende Flanke, dann ein Minimum und anschließend eine klar aufsteigende Flanke. Die dazugehörigen Modelle zeigen jeweils eine gut leitende Schicht über einem schlecht leitenden Basement. Die Anpassung der synthetischen Kurve an die gemessenen Daten ist aber bei M11 deutlich schlechter als bei den anderen Meßpunkten. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich, daß die Kurve bei M11 durch eindimensionale Modelle überhaupt nicht angepaßt werden kann. Ähnlich wie bei eindimensionalen geoelektrischen Modellkurven kann

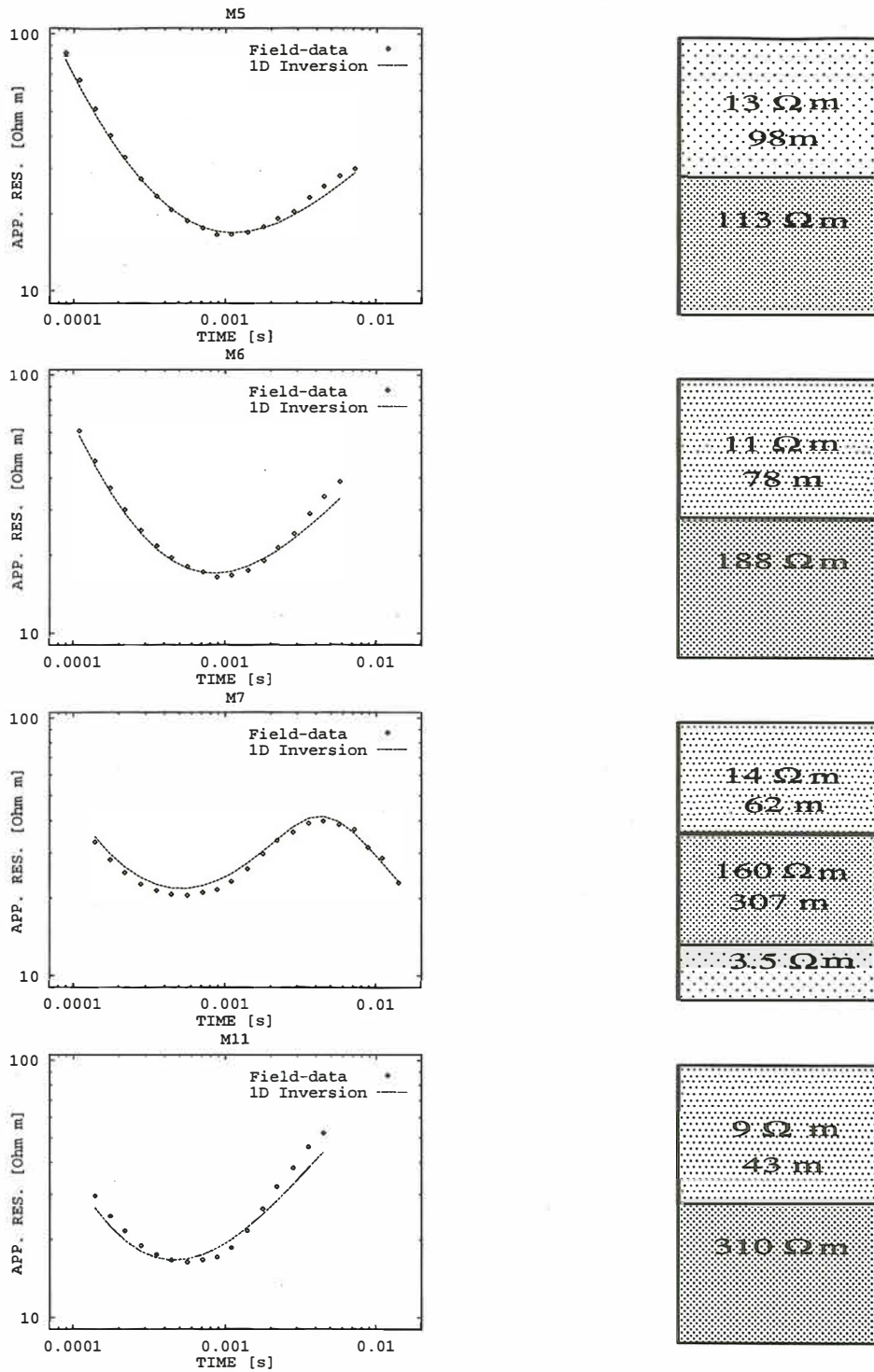


Abbildung 5: 1D-Inversionsergebnisse und Erdmodelle für die Stationen M5, M6, M7 und M11.

3.1 Erkennbare 3D-Effekte

auch bei 1D-TEM-Modellrechnungen nur eine bestimmte maximale Steigung der synthetischen Kurve erreicht werden, die für eine Anpassung der Kurve M11 nicht ausreicht.

Die an diesem Meßpunkt gewonnenen Daten sind also klar auf eine mehrdimensionale Geologie zurückzuführen. Ihre Interpretation wird in Abschnitt 3.1 genauer besprochen.

Eine völlig anderes Bild zeigt sich an der Station M7. Die dort gewonnenen Daten können zwar mit einer 1D-Inversion angepaßt werden, das Modell paßt aber nicht zu denen der anderen Stationen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von allen anderen Punkten zeigen die Inversionen dieser Meßstelle ein gut leitendes Basement. Da die Station M7 aber direkt neben einer geologischen Störung aufgebaut war (Abb. 4), wurde schon in der ersten Veröffentlichung über das Projekt von Goldman et al. (1989) darauf hingewiesen, daß möglicherweise die Daten durch 3D-Effekte hervorgerufen werden. Diese Möglichkeit wird in Abschnitt 3.2 besprochen.

3.1 Erkennbare 3D-Effekte

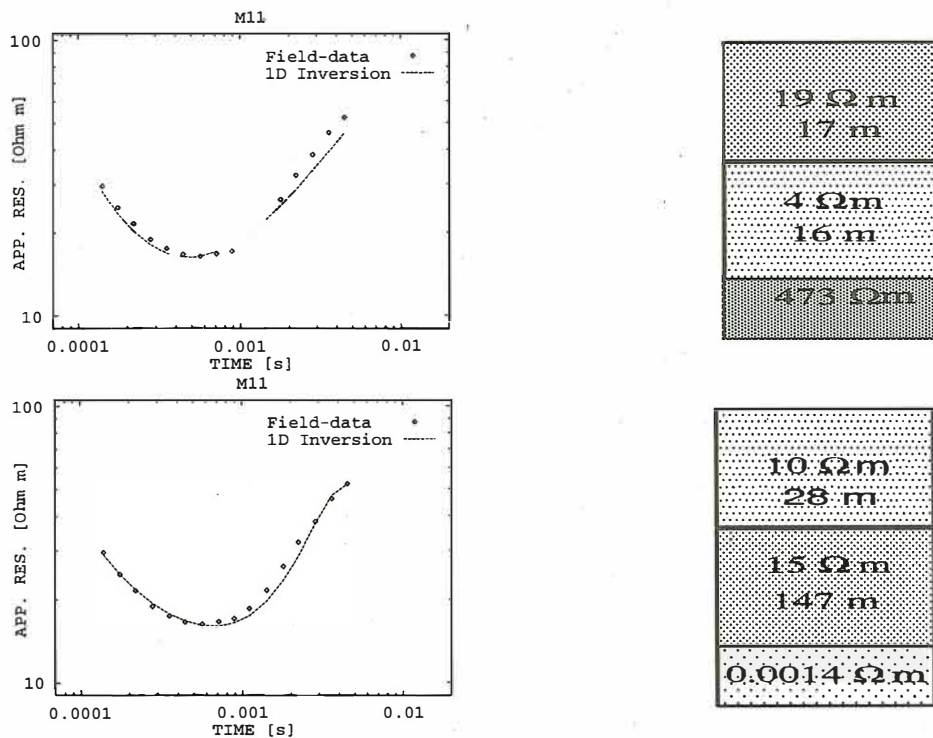


Abbildung 6: Durch Einfügen einer sehr gut leitenden Schicht wird die Anpassung an die gemessenen Daten deutlich verbessert.

Der im vorangegangenen Kapitel bereits angesprochene Effekt, daß die Steilheit der Meßkurve von M11 durch normale 1D-Vorwärtsrechnungen nicht erzeugt werden kann, wird auf Abbildung 6 noch einmal verdeutlicht. Beide Graphiken zeigen Ergebnisse von 1D-Inversionen mit drei Schichten für den Datensatz M11. Im ersten Fall wurde ein Startmodell mit zwei gleich gut

leitenden Schichten über einer schlecht leitenden Schicht, im zweiten Fall eins mit zwei gut leitenden Schichten über einer extrem gut leitenden Schicht benutzt. Die dabei gewonnenen Ergebnisse sind sehr unterschiedlich.

Im ersten Modell ist die berechnete Kurve trotz eines Leitfähigkeitskontrastes von 1:100 nicht steil genug, um sich mit den gemessenen Daten zu decken. Daran ändert auch eine weitere Erhöhung des Kontrastes kaum etwas.

Es ist jedoch möglich, eine bessere Anpassung an die gemessenen Daten zu erhalten, wenn der Widerstand der untersten Schicht des Startmodells der Inversion extrem niedrig ($< 0.001\Omega m$) gewählt wird. Der Kontrast zwischen zweiter und dritter Schicht ist dann so stark, daß relativ zur dritten Schicht der Widerstand der zweiten extrem groß wird. Die erzeugte synthetische Kurve steigt nach dem Minimum sehr steil an, um dann ebenso steil wieder abzufallen. Auf Abbildung 6 ist dieser steile Abfall nicht mehr zu sehen, da er außerhalb des dargestellten Zeitbereichs liegt. Nach Goldman et al. (1992) ist ein derartiges Modell geeignet, um genauere Werte für die Parameter der ersten Schicht zu erhalten. Eine Fehlinterpretation des Widerstandes des Basements ist dabei ausgeschlossen, da dieser Wert weit außerhalb des Bereiches liegt, der geologisch sinnvoll wäre.

Goldman (1992) benutzte Modelle mit derartig niedrigen Widerständen, um synthetische Daten eindimensional anzupassen, die er zuvor mit zweidimensionalen rotationssymmetrischen Modellen erzeugt hatte. Es lag also die Vermutung nahe, daß Daten, die mittels sehr gut leitender Schichten angepaßt werden können, umgekehrt auch durch zweidimensionale rotationssymmetrische Modelle interpretierbar sind.

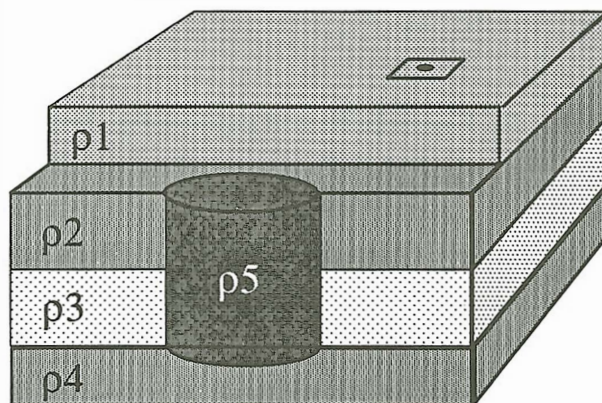


Abbildung 7: Rotationssymmetrisches Modell eines Zylinders in einem geschichteten Halbraum. Das Quadrat mit dem Punkt im Inneren symbolisiert die Sender-Empfänger-Anordnung.

Den Grundaufbau eines solchen Modells zeigt Abbildung 7. In einem geschichteten Halbraum wird ein senkrecht stehender Zylinder eingebaut. Steht dabei die Sender-Empfänger-Anordnung genau auf der Z-Achse des Zylinders, so ist das gesamte Modell rotationssymmetrisch und damit

3.1 Erkennbare 3D-Effekte

zweidimensional. Ist die Sender-Empfänger-Anordnung hingegen von der Z-Achse verschoben, so bleibt zwar das Erdmodell zweidimensional, das Primärfeld wird aber dreidimensional, weswegen dann von 2.5D-Modellen gesprochen wird.

Zur Berechnung derartiger Modelle stand uns ein Programm von Tabarovsky und Rabinovich (1988) zur Verfügung, das den 2D-Fall mittels der Methode der finiten Differenzen löst und den 2.5D-Fall durch eine Potenzreihenentwicklung auf den 2D-Fall zurückführt.

Mit diesem Programm wurden, ausgehend von den Ergebnissen der 1D-Rechnungen, zahlreiche Vorwärtsrechnungen durchgeführt, um ein Modell zu finden, das die Kurve von M11 möglichst gut anpaßt. Dabei wurden nach jedem Modellauf die synthetischen Daten mit den gemessenen verglichen und die Modellparameter so lange verändert, bis eine zufriedenstellende Übereinstimmung erreicht war.

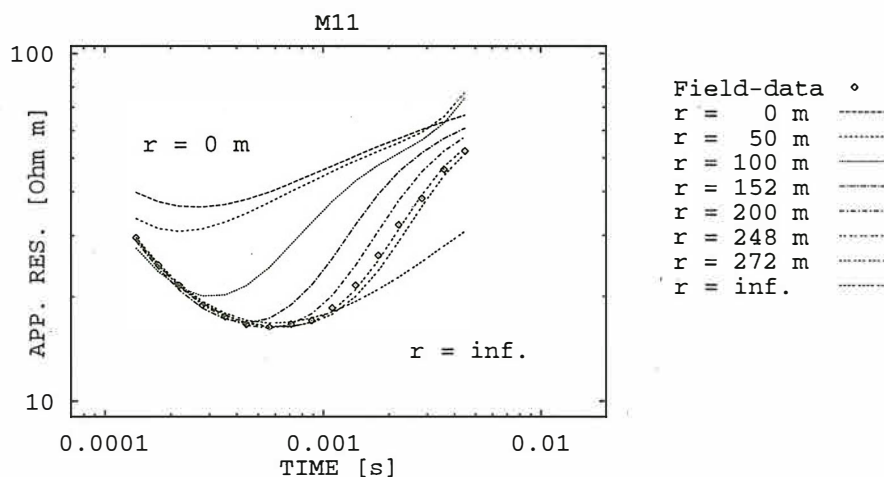


Abbildung 8: Abhängigkeit der Kurvenform des scheinbaren spezifischen Widerstandes vom Radius des Zylinders. Man erkennt die Annäherung an die Grenzfälle Radius = 0 bzw. ∞ .

Es zeigte sich, daß die Steigung der Flanke ganz wesentlich von der Größe des Zylinderradius beeinflusst wird. Sowohl bei zu großem als auch bei zu kleinem Radius verflacht die Kurve, da sich die Modelle dann immer weniger von eindimensionalen Modellen unterscheiden. Auf Abbildung 8 ist der Einfluß des Radius auf die Steilheit der berechneten Kurven dargestellt. Die obere ($r = 0$) und untere ($r = \infty$) Grenzkurve wurden mit einer 1D-Vorwärtsrechnung erzeugt.

Die beste erreichte Anpassung sowie das dazugehörige Modell zeigen die Abbildungen 9 und 10.

Von vorn herein wurde bei der Erstellung der Modelle darauf geachtet, daß die Anzahl der benutzten Parameter nicht zu groß wird. Für die Anpassung der Kurve von M11 wurden lediglich zwei Widerstände, zwei Schichtmächtigkeiten und der Radius als freie Parameter benutzt (Abb. 10), so daß die Zahl der freien Parameter nicht größer ist als bei einem Dreischichtfall.

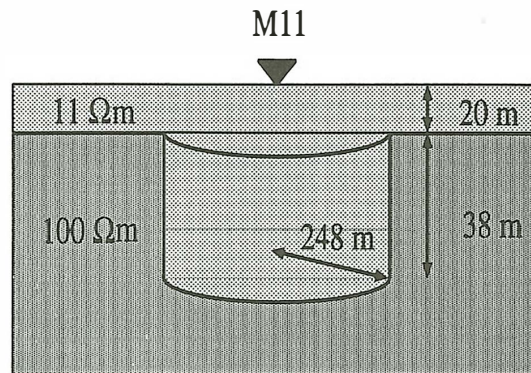


Abbildung 9: Zweidimensionales rotationssymmetrisches Modell für Punkt M11.

Man sieht, daß durch dieses Modell die Anpassung enorm verbessert werden kann. Der RMS-Fehler beträgt nur noch 2.3% wohingegen er für die Modelle von Abbildung 6 noch 13.6 % bzw 5.4 % betragen hatte.

Das bedeutet natürlich nicht, daß dieses Modell das korrekte Abbild der geologischen Strukturen darstellt. Es ist vielmehr eine Abschätzung der Größenordnung der 3D-Körper, die die starke Steigung der Kurve in M11 verursachen.

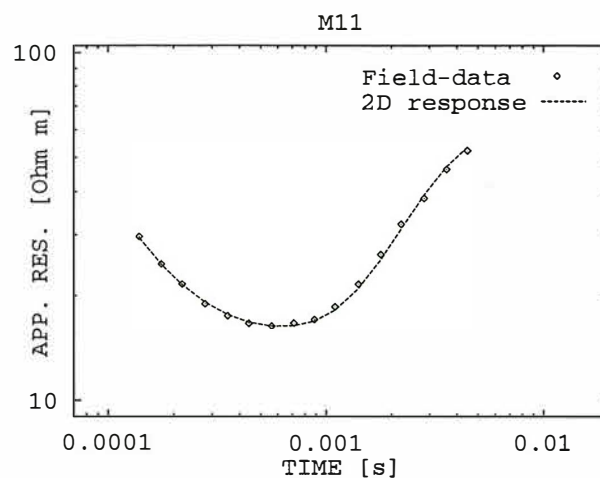


Abbildung 10: Ergebnis der Modellrechnungen für Punkt M11. Der RMS-Fehler beträgt 2.5 %

3.2 Vermutete 3D-Effekte

Im Gegensatz zu allen anderen Meßpunkten im Makhtesh Ramon zeigt sich im Verlauf der scheinbaren Widerstandskurve von M7 zu späten Zeiten ein klarer Abfall. Dieser läßt sich auf verschiedene Art und Weise interpretieren.

3.2 Vermutete 3D-Effekte

Betrachtet man die 1D-Ergebnisse, die unter der schlecht leitenden Schicht wieder einen guten Leiter anzeigen, als real vorhandene geologische Struktur, so bedeutet das, daß man am Meßpunkt M7 die Unterkante der magmatischen Intrusion aufgelöst hat. Eine geologische Erklärung für eine solche Schichtung wäre, daß das Magma etwa in Form eines pilzförmigen Laccoliths (Abb. 11) erstarrt ist.

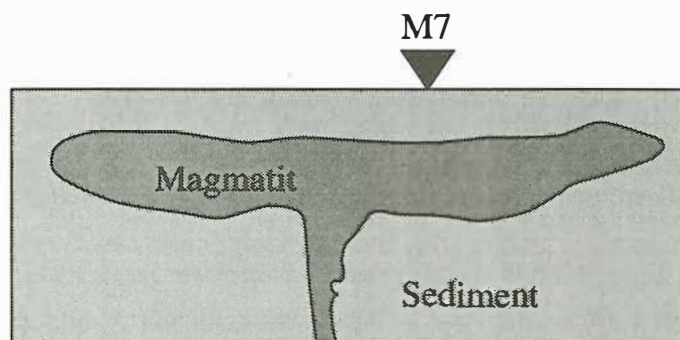


Abbildung 11: *Laccolith als mögliche Struktur für die Widerstandsverteilung von M7.*

Eine andere Erklärung wäre, daß die Kurve von M7 durch eine mehrdimensionale Untergrundstruktur hervorgerufen wurde. Die nahegelegene Verwerfung oder die den Magmatit seitlich begrenzenden gut leitenden Schichten könnten den Verlauf der Kurve beeinflussen. Um die verschiedenen Möglichkeiten zu testen, wurden Modellrechnungen durchgeführt, die die Daten von M7 erklären sollten, ohne dabei ein gut leitendes Basement anzunehmen.

Es zeigte sich, daß der Effekt einer Verwerfung wesentlich kleiner sein müßte als der in den Meßdaten beobachtete. Die weiteren Modellstudien konzentrierten sich daher auf den Einfluß der seitlich neben dem Magmatit liegenden gut leitenden Sedimente.

Zunächst wurde für diese Berechnungen wieder das rotationssymmetrische Modell von Tabarovsky und Rabinovich benutzt. Aber im Gegensatz zu dem Modell für M11 wurde bei M7 ein schlecht leitender Zylinder in eine gut leitende Umgebung eingebettet. Genau wie bei M11 wurden auch hier die synthetischen Kurven nach jedem Modellauf mit den gemessenen Daten verglichen, um die Modellparameter sukzessiv zu verbessern.

Das gewonnene Modell sowie die Anpassung an die Meßdaten von M7 zeigen die Abbildungen 12 und 13.

Dieses Modell gibt zwar eine recht befriedigende Anpassung der Daten mit einem RMS-Fehler von etwa 4%, aber einige Parameter sind nur schlecht aufgelöst. Während eine Veränderung bei Widerstand oder Mächtigkeit der Deckschicht um 5% die Anpassung der Kurve deutlich verschlechtert, haben fünfprozentige Änderungen an den Widerständen des Zylinders oder des Umgebungsmaterials kaum Auswirkungen. Noch schlechter bestimmt ist die Höhe des Zylinders. Eine fünfprozentige Vergrößerung dieses Parameters läßt sich in den synthetischen Daten kaum

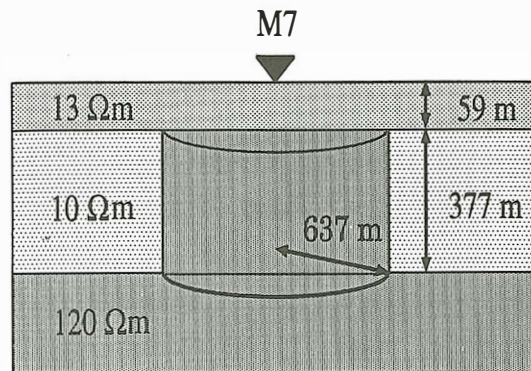


Abbildung 12: Zweidimensionales rotationssymmetrisches Modell für M7.

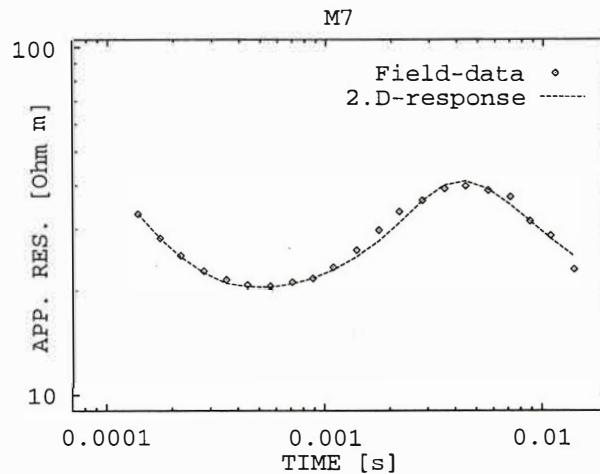


Abbildung 13: Ergebnis der 2D-Modellrechnungen für Punkt M7. Der RMS-Fehler beträgt 4%.

ausmachen. Selbst eine Verlängerung des Zylinders ins Unendliche verschlechtert lediglich die Anpassung der letzten drei Datenpunkte etwas. Die auf Abbildung 12 angegebene Höhe ist mehr als eine minimale Ausdehnung des Zylinders anzusehen, die zwar über-, aber nicht unterschritten werden darf.

Das Modell zeigt aber klar und deutlich, daß eine Kurve wie die von M7 nicht nur durch die auf Abbildung 11 gezeigte Struktur, sondern auch durch lateral an den schlechten Leiter angrenzende gute Leiter verursacht sein kann. Aber auch hier gilt wie bei M11, daß das Modell nicht als korrekte Abbildung des Untergrundes zu verstehen ist, da man für das Meßgebiet im Makhtesh Ramon nicht von einer rotationssymmetrischen Leitfähigkeitsverteilung ausgehen kann. Außerdem widerspricht das für M7 gewonnene 2D-Modell denen von anderen Punkten.

Um ein Modell zu finden, daß alle gemessenen Daten auf einmal erklärt, wurden daher aufbauend auf den 2D- auch 3D-Rechnungen durchgeführt.

4 Dreidimensionale Modellrechnungen

Dazu wurde das Programm MAXWELL von Druskin und Knizhnerman (1988) benutzt, mit dem man synthetische Daten von dreidimensionalen Strukturen erzeugen kann, die aus bis zu 50 Blöcken zusammengesetzt sind. Die Lösung der Vorwärtsrechnung wird auch bei diesem Programm mit Hilfe eines Finiten-Differenzen-Algorithmus gelöst. Allerdings ist die Rechenzeit bei MAXWELL um ein Vielfaches höher als bei der 2.5D-Vorwärtsrechnung von Tabarovsky und Rabinovich. Dadurch ist es schwieriger, eine Anpassung der synthetischen Daten an die Meßwerte zu erreichen. Man ist auf möglichst viele Vorinformationen aus den 2D- und 2.5D-Modellen angewiesen.

Das Endmodell für die Gegend zwischen dem Shen Ramon und dem Gevanim Valley zeigt Abbildung 14. Es hat in SW-NO Richtung sowie in die Tiefe eine unendliche Ausdehnung und ist in einen $5 \Omega m$ Halbraum eingebettet. Durch die geringe Y-Ausdehnung (senkrecht zu SW-NO) des schlecht leitenden Körpers ist das Modell noch stark von der gut leitenden Umgebung beeinflusst und kann die abfallenden Werte der Widerstandskurven bei M7 erklären.

An den anderen Meßpunkten tritt dieser Effekt erst zu Zeiten, die außerhalb des gemessenen Bereichs liegen, auf. Nach den synthetischen Daten müssen aber alle auf der Intrusion gemessenen Kurven im Spätzeitbereich wieder abfallen. An einigen Meßkurven wie z.B. bei M11 zeigen sich auch Anzeichen dafür.

Die Y-Ausdehnung von 1200 m stimmt nach der geologischen Karte des Makhtesh gut mit dem Verlauf einiger geologischer Störungen überein (Abb. 4). Offensichtlich bildeten diese Störungen die Grenze für die Ausbreitung des Magmas.

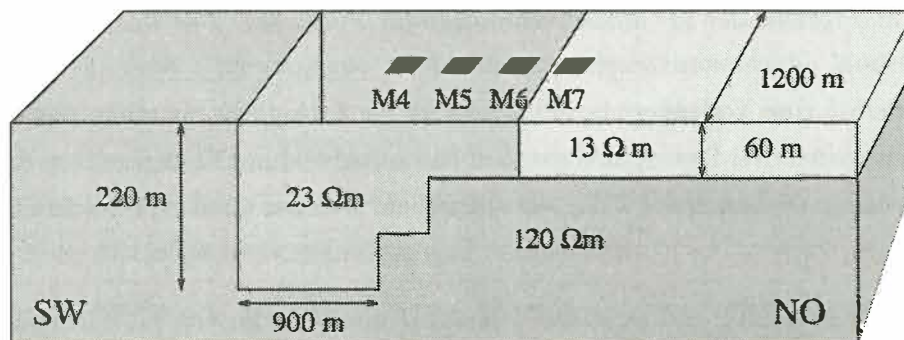


Abbildung 14: Modell für die Verteilung des Quarzsyenits im Makhtesh Ramon. Das Modell ist eingebettet in einen $5 \Omega m$ Halbraum.

Eine der Hauptfragen der Messung, ob die Aufschlüsse am Shen Ramon und am Gevanim Valley eine unterirdische Verbindung haben, wurde durch die Messung geklärt. Der schlechte Leiter wird an allen Meßpunkten zwischen diesen beiden Orten gesehen. Eine andere Frage nach dem

Gesamtvolumen des Magmatits konnte aber nicht geklärt werden, da die Messung die Unterkante der Intrusion nicht auflösen kann. Nach Berechnungen von Goldman et al. (1989) muß aber angenommen werden, daß die Intrusion mindestens einige hundert Meter mächtig ist.

Um das Bild der Verteilung der Magmatite im Makhtesh Ramon noch weiter zu vervollständigen, wurden 1993 erneut TEM-Messungen durchgeführt. Die dabei gewonnenen Daten scheinen das Modell zu bestätigen, sind aber noch nicht vollständig abgeschlossen.

Literaturverzeichnis

Bentor, Y.K., 1952, Magmatic Intrusions and Lava-sheets in the Raman area of the Negev (Southern Israel): *Geol. Mag.*, **89**, p. 129-140.

Druskin, V.L., und Knizherman, L.A., 1988, A spectral semi-discrete method for the numerical solution of 3D nonstationary problems in electrical prospecting: *Physics of the solid Earth*, **24**, p. 641-648.

Goldman, M., Steinitz, G., Baer, G., and Zafrir, H., 1989, A TDEM study of the geometry of the quartz-syenite intrusions along the southern flank of Makhtesh Ramon: *Isr. J. Earth Sci.*, **38**, p. 19-28.

Goldman, M., Tabarovsky, I., und Rabinovich, M., 1992, Interpretation of 2.5D Transient Electromagnetic Data in Terms of 1D Horizontally Layered Earth: Protokoll über das 14. Kolloquium „Elektromagnetische Tiefenforschung“, Borkheide, Seite 43-57.

Helwig, S.L., 1994, Auswertung transient elektromagnetischer Meßdaten aus dem Makhtesh Ramon, Israel, unter Benutzung rotationssymmetrischer Modelle: Diplomarbeit am Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, unveröffentlicht.

Itamar, A., und Baer, G., 1986, The implications of hydrothermal alteration and contact metamorphism associated with quartz syenite magmatism on mineralization in Makhtesh Ramon and Har Arif: *Minist. of Energy & Infrastructure, Geol. Surv. of Israel*.

Mazor, E., 1955. The magmatic occurrences of Makhtesh Ramon. M.Sc. thesis, Hebrew University, Jerusalem (in Hebräisch).

Strack, K.M., 1985, Das Transient-Elektromagnetische- Tiefensondierungsverfahren angewandt auf die Kohlenwasserstoff- und Geothermie-Exploration: Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, Heft 42.

Strack, K.M., 1992, *Exploration With Deep Transient Electromagnetics*: Elsevier Science Publishers B.V.. Amsterdam-London-New-York-Tokyo.

Tabarovsky, L. A., und Rabinovich, M.B., 1988, Mathematical modeling of transient electromagnetic fields in quasi-three-dimensional models: VINITI, N6264-B88. (In Russisch).