

# Erkundung eines Aquifers unter dem Mittelmeer vor der israelischen Küste mit LOTEM.

K. Lippert <sup>1</sup>, B. Tezkan, R. Bergers, M. Gurk, M. v. Papen, P. Yogeshwar  
Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität zu Köln

## Abstract

Im Rahmen dieses BMBF-geförderten Projektes <sup>2</sup> kommt die Long-Offset Transient Elektromagnetik (LOTEM) Methode zum ersten Mal in mariner Umgebung zur Erkundung von Grundwasseraquifere zum Einsatz. Hauptziel des Projektes ist die Detektion der Süßwassergrenze unter dem Mittelmeer an der Küste Israels. Zu diesem Zweck wurden Hardware-Modifikationen durchgeführt und bereits in einer ersten Testmessung in Israel erprobt. Des weiteren werden die Interpretationen der ersten Testmessung sowie die Modellierungsergebnisse des Küstenabschnitts vorgestellt, welche zur Planung der Hauptmessung wichtig sind.

## Einleitung

Die Bedeutung von Offshore-Süßwasserleitern für das Grundwassermanagement nahm in den letzten Jahren stark zu. Das Vorhandensein dieser Aquifere, die sich bis zu mehreren Kilometern unter dem Meeresboden erstrecken können, wurde in der Fachliteratur beschrieben: z.B. an der Küste von Guyana [Arad, 1983] oder vor den Niederlanden [Groen et al., 2005]. Der israelische Küstenaquifer ist eine der Hauptgrundwasserressourcen des Landes (vgl. Fig. 1). Aufgrund der intensiven Nutzung verschlechtert sich allerdings die Wasserqualität zunehmend. Die Gründe hierfür liegen sowohl in der anthropogenen Verschmutzung vom Land aus, als auch im Eindringen von Salzwasser.

<sup>1</sup>E-mail: lippert@geo.uni-koeln.de

<sup>2</sup>BMBF-Förderkennzeichen: 02WT0987



Figure 1: Die großen Aquifere der Region.

## Geologie und Fragestellung

Der Küstenaquifer besteht hauptsächlich aus kalkhaltigem Sandstein und Sanden und ist selbst noch in vier Sub-Aquifere unterteilt (vgl. Fig.2). Die oberen zwei grundwasserführenden Schichten werden vom Land aus anthropogen und vom Meer aus durch Salzwassereindringen verunreinigt. Bisher wurde davon ausgegangen, daß die unteren Sub-Aquifere stellenweise vom Meerwasser getrennt sind und dort keine Salzwasserintrusion stattfindet. Neuere Untersuchungen ([Kafri, U., Goldman, M., 2006],[Yechieli et. al, 2009])

hingegen deuten jedoch auf das Fortsetzen des Aquifers unter dem Meer hin. So zeigen z.B. TDEM-Messungen auf Land, nahe der Küste, einen schlechteren elektrischen Leiter  $10 (\Omega m)$  eingebettet zwischen zwei guten elektrischen Leitern ( $\sim 2 \Omega m$ ). Diese Schicht, in der Tiefe der unteren Sub-Aquifere, wird als Grundwasserführenden Schicht interpretiert (vgl. Fig.3). Die Fragestellung an die LOTEM-Methode ist nun 1. die Prüfung der Existenz des unteren Sub-Aquifers in etwa 100m Tiefe und 2. dessen Ausbreitung unter dem Mittelmeer.

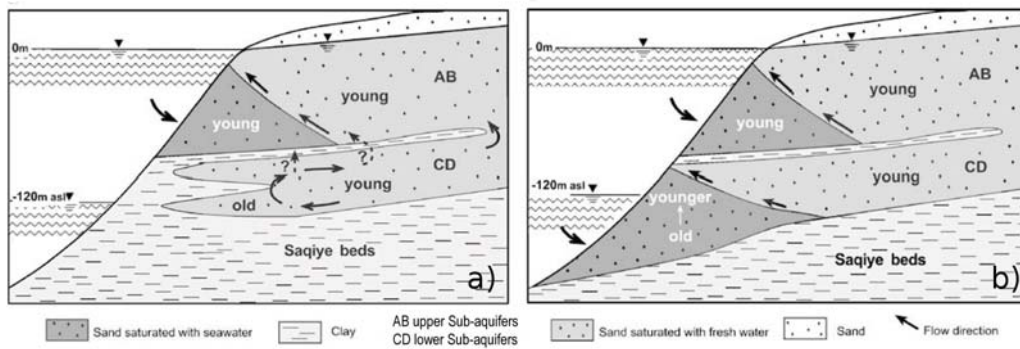


Figure 2: Möglicher Verlauf des unteren Subaquifers an der Küste [Yechieli et. al, 2009]: a) Der untere Subaquifer (CD) hat keine Verbindung zum Meer, b): Das Salzwasser dringt in den unteren Aquifer ein.

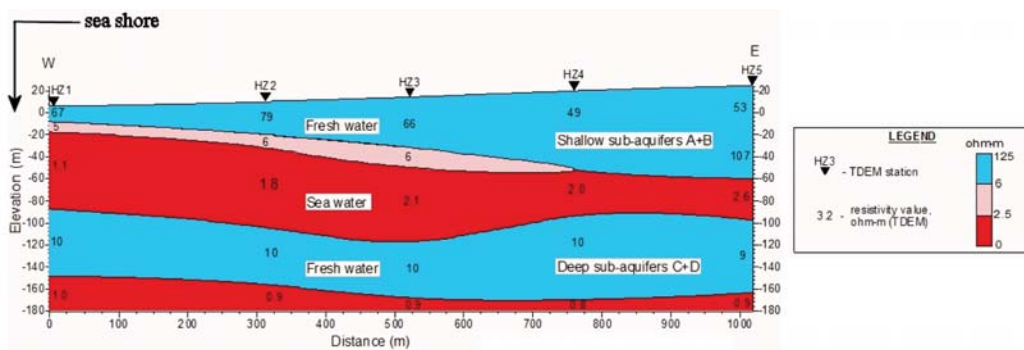


Figure 3: Onshore SHOTEM-Ergebnisse [Kafri, U., Goldman, M., 2006].

## Hardwaremodifikationen

Das Kölner LOTEM-Equipement ist für Landmessungen konzipiert. Deswegen waren einige Hardware-Modifikationen für die Offshoremessung nötig. Als Sender konnte aus logistischen Gründen nur der kleinere Kölner Sender <sup>3</sup> verwendet werden. Da dieser bei verwendeten Stromstärken von  $\sim 9\text{A}$  zuviel Wärme entwickelt, war es nötig eine zusätzliche Wasserkühlung einzubauen. Für die Einspeisung des Sendesignals wurden neue Elektroden entwickelt (vgl. Fig.4), deren Form, durch Maximierung des angekoppelten Wasservolumens, elektrochemische Vorgänge minimiert. Zusätzlich kann das Sendesignal Stromgeregelt werden, um einen konstanten Stromverlauf zu erreichen. In Fig.5 sind Sendesignale gezeigt. Links wird mit konstanter Spannung gesendet. Bei sich verändernder Ankopplung ergibt sich kein konstanter Stromverlauf. Deswegen wurde der Sendestrom nachträglich auf einen konstan-

ten Wert heruntergeregelt (Fig.5 rechts). Die verwendeten Magnetfeldsensoren <sup>4</sup> wurden in Druck- und Salzwasserbeständige Behälter verpackt (Fig.6).

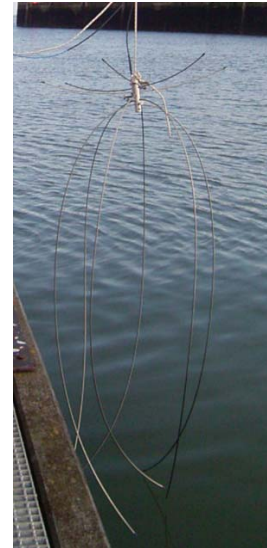


Figure 4: *Neuentwickelte Elektroden für die Einspeisung des Sendesignals.*

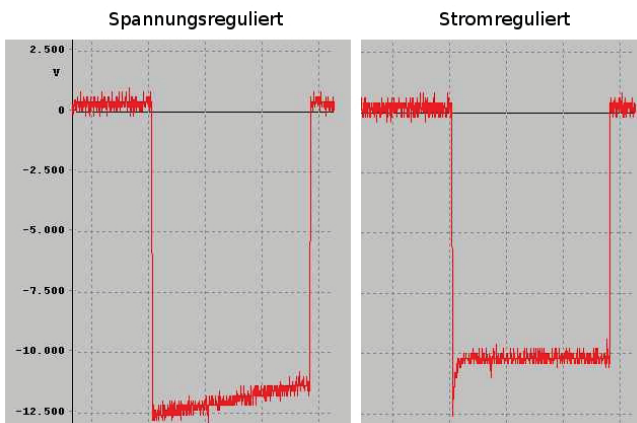


Figure 5: *Aufgezeichnete Sendesignale bei einem Test in Wilhelmshaven.*



Figure 6: *Seewasserfestes Gehäuse für die Magnetfeld-Sensoren.*

<sup>3</sup>NT-20 von Zonge Engineering & Research Organization, Inc., Tucson AZ, USA

<sup>4</sup>TEM/3-Spulen von Zonge Engineering & Research Organization, Inc., Tucson AZ, USA

## Ergebnisse Messung 2008

Anfang November 2008 wurden die ersten Messung vor Ort durchgeführt. Hierbei wurden verschiedene Messkonfigurationen getestet:

- BroadSide: Sender an der Küstenlinie, Empfänger an Land. Offset 200m. vgl. Fig.7: Tx2 und Rx3.
- BroadSide: Sender an der Küstenlinie, Empfänger im Wasser. Offset 300m. vgl. Fig.7: Tx2 und Rx2.
- BroadSide: Sender im Wasser, Empfänger an Land. Offset 500m. vgl. Fig.7: Tx1 und Rx1.

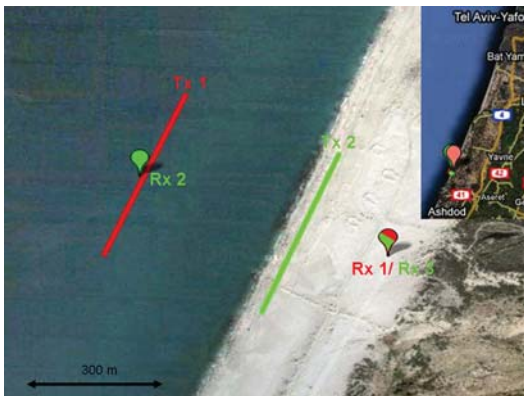


Figure 7: *Setups der Messung 2008.*

Das Setup “Sender an der Küstenlinie, Empfänger an Land” ist das einzige, welches annehmbar 1D interpretiert werden konnte. Als Beispiel ist hier die  $dHz/dt$  - Komponente gezeigt. Das Endmodell einer Marquardt-Inversion ist in Fig.9, die zugehörige Datenanpassung in Fig.8 zu sehen. Das Startmodell wurde anhand der Vorinformationen und dem Ergebnis einer Occam-Inversion gewählt <sup>5</sup>.

<sup>5</sup>Vgl. **M.v.Papen, B.Težkan**: “On the analysis of LOTEM time series from Israel and preliminary 1D inversion of data.”, Poster EMTF 2009.

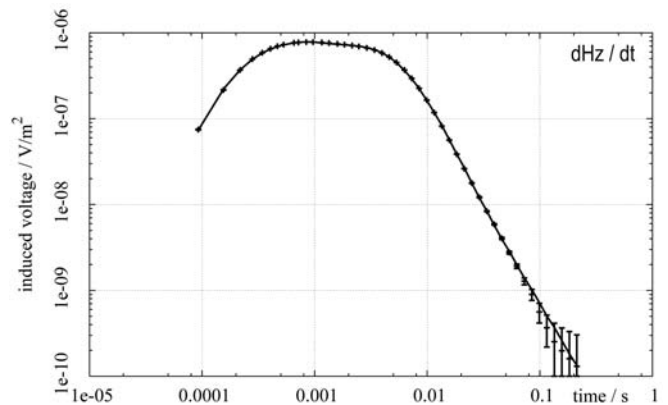


Figure 8: *Datenanpassung des “besten” Modells (rot) in Fig. 9.*

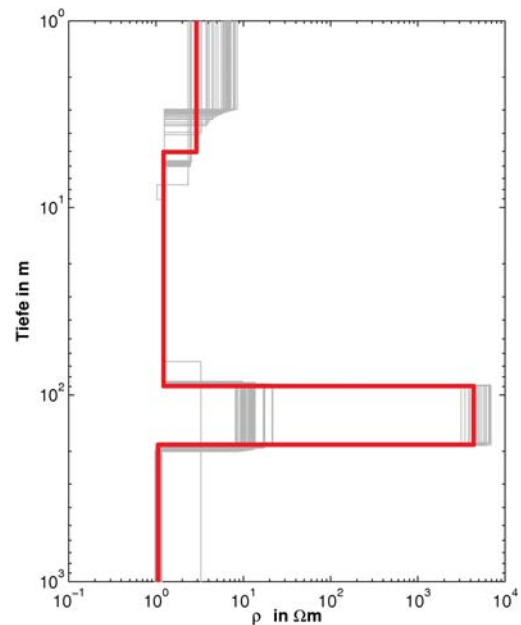


Figure 9: *1D-Inversionsergebnis mit Äquivalenzmodellen.*

Das Ergebnis ist gut mit den SHOTEM-Ergebnissen (Fig. 3) vergleichbar. Der gesuchte Aquifer ist deutlich in einer Tiefe ab ca. 90m zu erkennen. Sowohl die Schichtdicke mit ca. 100m als auch viele Äquivalenzmodelle mit einem Widerstand von  $\sim 10 \Omega m$  sind vergleichbar und glaubwürdig.

Die anderen beiden Messkonfigurationen

können nicht als eindimensionales Problem angesehen und somit auch nicht 1D ausgewertet werden. Die gemessenen Transienten wurden mit synthetischen Daten verglichen. Das 2D Leitfähigkeitsmodell ist in Fig. 11 dargestellt. Mit diesem synthetischen Modell war eine qualitative Anpassung möglich. Exemplarisch ist in Fig.10 die Datenanpassung für die Ex-Komponente gezeigt.

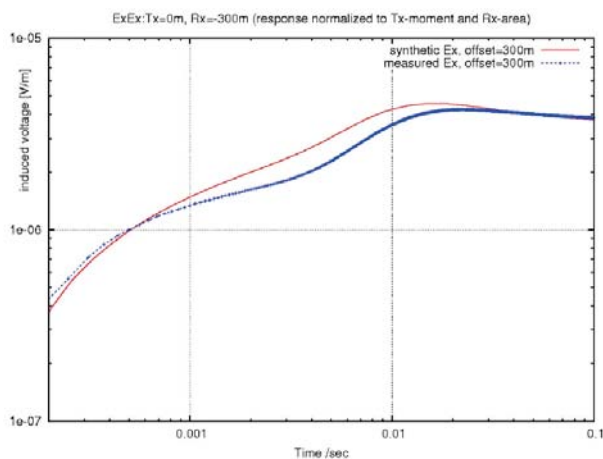


Figure 10: *Setup Tx2 - Rx3 (vgl.Fig.7): Anpassung der Messdaten der Ex-Komponente mit modellierten Daten.*

### Vorab-Modellierungen

Für die Messung im November 2009 sind die Empfängerlokationen von Bedeutung. Eine Frage hierbei ist u.a. ob das Target auch mit einem Sender auf dem Meer und Empfängern auf dem Land auflösbar ist. Diese Konfiguration ist logistisch relativ einfach durchführbar. Es wurde also ein 2D-Küstenmodell erstellt, mit welchem synthetische Daten mittels SLDMEM3T [Druskin, Knizhnermann, 1988] erzeugt wurde. Als Datenbeispiel sind in Fig.12

die Ex-Komponenten dargestellt. Hierfür werden im Modell (Fig.11) Daten mit Targetlayer und einmal ohne Targetlayer unter dem Meeresboden verglichen. “Ohne Targetlayer” bedeutet in diesem Fall, daß der Targetlayer 300m im Landesinneren endet (nicht dargestellt). Die darüberliegende Schicht ( $1.2 \Omega m$ , gelb) wurde nach unten erweitert.

Modelliert wurden verschiedene Senderpositionen in unterschiedlichen Entfernungen zur Küstenlinie. Im Beispiel beträgt die Entfernung 1500m. Betrachtet werden nun 2 Empfängerpositionen: einmal 275m von der Küstenlinie entfernt auf dem Meeresboden und einmal 95m im Landesinneren. Modelliert wurde die BroadSide Konfiguration (Senderrichtung und Profilrichtung senkrecht zueinander) und die InLine Konfiguration (Senderrichtung und Profilrichtung auf einer Linie). Die System-Antwort wurde für diese Modellierungen nicht berücksichtigt.

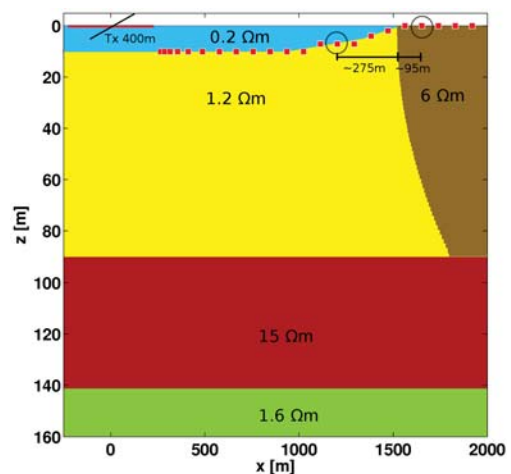


Figure 11: *Verwendetes Küstenmodell. Das gesuchte Target ist die  $15 \Omega m$ -Schicht (rot). Blau = Wasser.*

Sowohl bei der InLine als auch bei der Broad-Side Konfiguration ist in dieser Komponente der Targetlayer klar auflösbar: die Transienten unterscheiden sich deutlich in den Amplituden von den Transienten ohne Targetlayer. Bei der BroadSide Konfiguration verschiebt sich der auftretende Vorzeichenwechsel durch das Target zu späten Zeiten. Ein Vorzeichenwechsel ist bei der Auswertung immer schwer interpretierbar.

Aufgrund der Unterscheidbarkeit der Transienten sind Empfänger auf dem Land für diese Fragestellung sinnvoll.

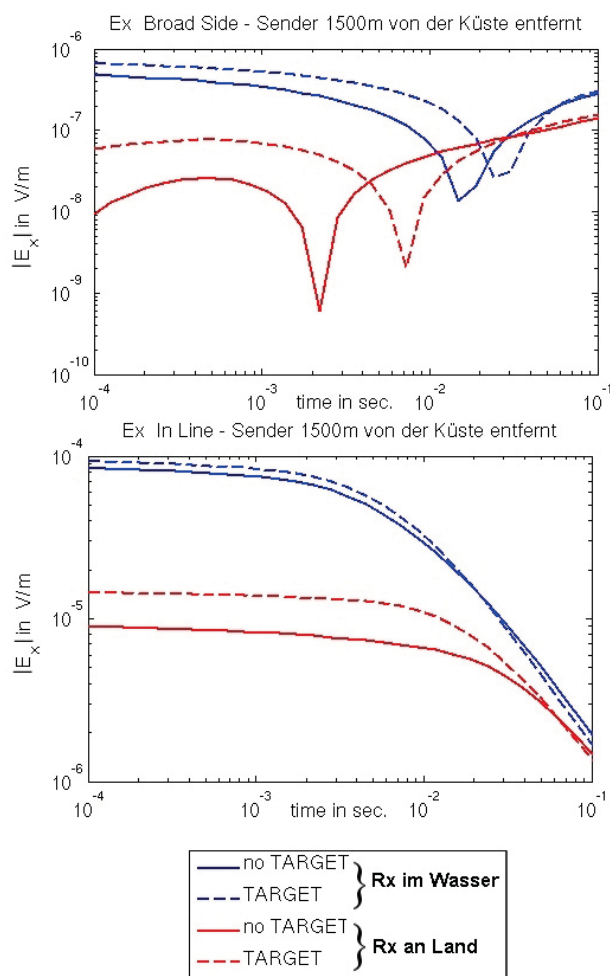


Figure 12: *Modellierte Transienten der Ex-Komponente an den Positionen, die in Fig.11 als Kreise markiert sind.*

## Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund der Ergebnisse und der Erfahrungen der ersten Messung (2008) und der Modellierungen sind die Setups für die erste Hauptmessung im November 2009 festgelegt worden. Die Messung ist inzwischen durchgeführt worden. Es wurden die Konfigurationen InLine und Broad-Side gemessen. Der Sender befand sich dabei immer auf dem Meer in verschiedenen Abständen zur Küste. Pro Senderposition gab es mehrere Empfängerpositionen, sowohl auf dem Wasser als auch auf Land.

## Literatur

- Arad, A.:** " *A summary of artesian coastal basin of Guyana.*", J.Hydrol. 63:299-313, 1983.
- Druskin, V.L., Knizhnermann, L.A.:** " *A spektral semi-discrete method for the numerical solution of 3d nonstationary problems in electrical prospecting.*", Phys. Solid Earth, 24:641-648, 1988.
- Groen J., Groen M., Post V., Kooi H., Mendizabal I. and Groot S.M.:** " *Seaward continuation of groundwater flow systems along the coast of the Netherlands.*", GSA Salt Lake Ann.Meet. Abstract Paper No.211-9., 2005.
- Kafri U. and Goldman M.:** " *Are the lower subaquifers of the Mediterranean coastal aquifer blocked to seawater intrusion? Results of a TDEM (time domain electromagnetic) study.*", Isr.J.Earth Sci., 2006.
- Yechieli et. al:** " *The inter-relationship between coastal sub-aquifers and the Mediterranean Sea, deduced from radioactive isotopes analysis.*" Hydrogeology Journal Vol 17 Num 2 / 2009.