

LOTEM im Odenwald – Auch hier ein Krustenleiter ?

HOLGER F. THERN, TILMAN HANSTEIN, ANDREAS HÖRDT

Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln

1 Einleitung

In den letzten Jahren wurde weltweit eine große Zahl von leitfähigen Strukturen in der mittleren und oberen Erdkruste nachgewiesen und untersucht (Hjelt und Korja, 1993; Haak, 1994). Es seien hier als Beispiel geophysikalische Großprojekte wie die 'european geotraverse' EGT (ERCEUGT-Group, 1992) und die 'Kontinentale Tiefbohrung' KTB (Behr, 1987) genannt.

Speziell die Leitfähigkeitsstrukturen in Subduktionszonen eröffneten ein interessantes Forschungsfeld für die Elektromagnetik (EM). Basiert das Verständnis vom Aufbau und der Dynamik in Subduktionszonen bisher hauptsächlich auf Beiträgen der Geologie (Frisch und Loeschke, 1993) und der Seismik (Behr und Heinrichs, 1987), so bietet die EM eine weitere Möglichkeit, mehr von den Vorgängen zu verstehen, die das Erscheinungsbild der Erde prägen.

Im Sommer und Herbst 1995 wurde im Rahmen eines DFG-Projektes im Odenwald eine LOTEM-Meßkampagne, gefolgt von einer MT-Messung (Michel, 1996; in diesem Band), durchgeführt. Ziel des Projektes sind Nachweis und Auflösung eines Krustenleiters, der in 8 – 10 Kilometer Tiefe vermutet wird (Hofer, 1990). Dieser Krustenleiter soll die Grenzfläche zwischen Rhenoherynikum und Saxothuringikum kennzeichnen und während der Subduktion der rhenoherynischen unter die saxothuringische Platte entstanden sein.

LOTEM (long-offset transient electromagnetics) ist eine aktive elektromagnetische Meßmethode im Zeitbereich (Strack, 1992). Als Sender benutzt man einen geerdeten Dipol, der 1 – 1.5 Kilometer lang ist. Ein Strom von bis zu 40 A wird in Rechteckform eingespeist. Die Signale werden mit der TEAMEX-Multikanalapparatur der Firma DMT registriert. An acht Stationen, die auf einer Länge von ca. einem Kilometer einen Empfängerspread bilden, werden jeweils eine der Horizontalkomponenten des elektrischen Feldes und die Ableitung der vertikalen magnetischen Feldkomponente aufgezeichnet. Aus dem zeitlichen Verlauf der Felder lassen sich Modelle für die Widerstandsverteilung des Untergrundes erstellen und zusammen mit geologischen Vorinformationen interpretieren.

2 Das Meßgebiet

Das Gebiet Mitteleuropas läßt sich in mehrere übergreifende geologische Formationen einteilen (Abb. 1). Sie liegen annähernd in O-W Richtung und bezeichnen tektonische Einheiten, die Teil der Varisziden sind. Diese Einheiten entstanden während des Variszikums durch die Kollision mehrerer kontinentaler Platten (Blundell, 1992).

Im Bereich des Meßgebietes befand sich vor 400 Mio. Jahren ein Ozean, der auf der Südseite vom heutigen Saxothuringikum (ST), auf der Nordseite vom Rhenoherynikum (RH) begrenzt war. Dieser Ozean begann sich zu schließen, wobei das RH unter das ST subduziert wurde. Durch noch nicht hinreichend geklärte Mechanismen sollen sich an solch einer Überschiebung Graphite und/oder Fluide bilden und eine gut leitfähige Struktur erzeugen (ERCEUGT-Group, 1992).

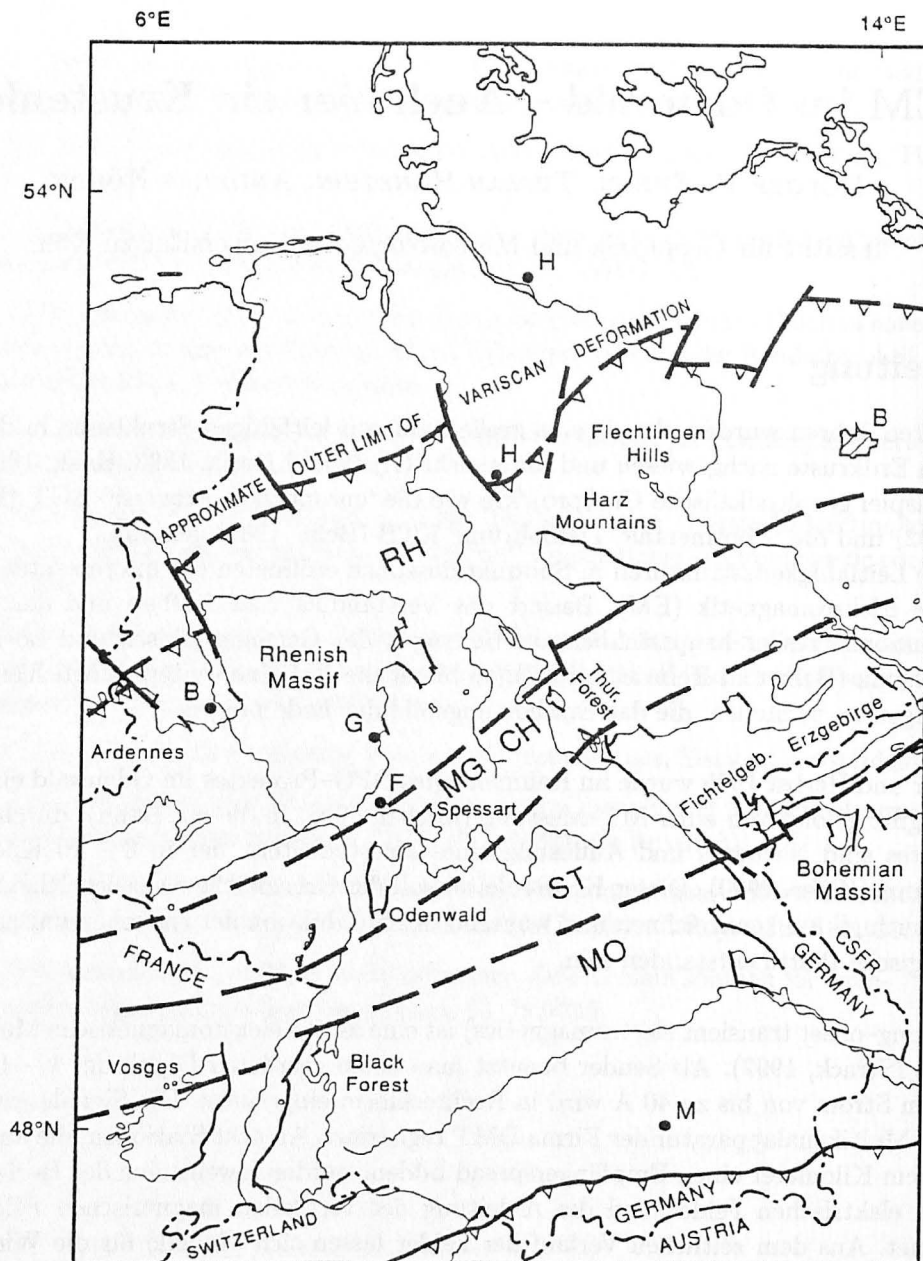


Abbildung 1: Geologische Übersicht des Variszikums. RH:Rhenoherynikum, MGCH:Mitteldeutsche Kristallinschwelle, ST:Saxothuringikum, MO:Moldanubikum, F:Frankfurt. (Blundell, 1992)

Die Überschiebungsfläche (Suturzone) taucht vom Südrand des Rheinischen Massivs (Taunus) unter den Bereich der ST Platte ab, der als Mitteldeutsche Kristallinschwelle (MDKS) bezeichnet wird. Das Kristallin dieser Einheit ist aber bis auf wenige Ausnahmen von mehreren Kilometern mächtigen Sedimenten überdeckt. Eine der wenigen Ausnahmen ist der Odenwald, der als Bruchstück der MDKS vor 3–4 Mio. Jahren wieder an die Oberfläche gehoben wurde und heute als Kristallinkörper ansteht. Im Norden schließt sich der Sprendlinger Horst an, ein Ausläufer des Odenwaldkristallins, der nur geringmächtig mit Sedimenten bedeckt ist (Marell, 1989). Erst mit dieser geologischen Einheit, die sich durch einen hohen spezifischen Widerstand auszeichnet, öffnet sich auf der MDKS ein "Fenster" (Abb. 2), durch das die Transiente Elektromagnetik bis in die erforderliche Tiefe blicken kann.

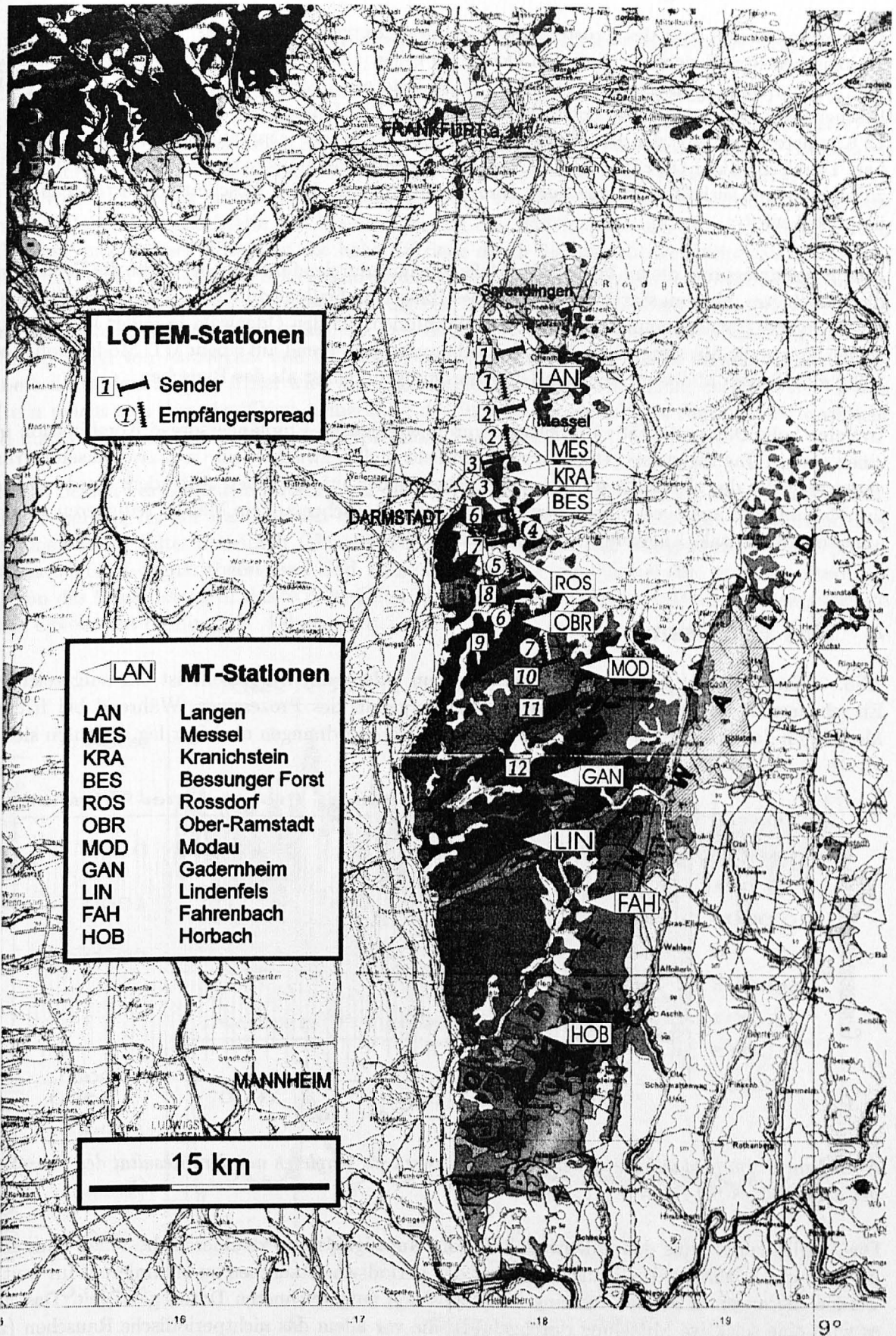


Abbildung 2: Geologische Karte der Odenwaldregion mit den LOTEM- und MT-Stationen, Odenwaldkristallin mit Sprendlinger Horst (dunkle Gebiete in der Mitte) und Tainussüdrand (dunkles Gebiet im NW).

3 Die Messung

Um der ungenauen Lage des Krustenleiters Rechnung zu tragen, wurde das Meßprofil senkrecht zur geologischen Streichrichtung über den Odenwald gelegt (Abb. 2). Dieses Profil ist aus 12 Sendern und 9 Empfängerspreads aufgebaut, wobei ein Spread aus jeweils 8 Magnetfeldspulen und 8 elektrischen Dipolen besteht. Der optimale Abstand von Empfänger (R_x) zu Sender (T_x) beträgt 8 – 12 Kilometer. Im Laufe der drei Meßwochen wurden 272 Sender–Empfänger Kombinationen betrieben. Durch das für LOTEM neue Konzept, jeweils einen Empfängerspread mit mehreren Sendern zu kombinieren, erhält man eine hohe Datenredundanz, da jeder Abschnitt des Profils mehrfach überdeckt wird.

Eine Rauschmessung, die im Vorfeld der Meßkampagne durchgeführt wurde, zeigte die Problematik dieses Gebietes. Extrem starkes anthropogenes Rauschen, bedingt durch die Nähe Darmstadts und durch diverse Hochspannungsleitungen und Bahnlinien, die den Odenwald in hoher Dichte durchziehen, störte die Messung. Die mit Modellrechnungen (basierend auf einem MT-Modell von Hofer, 1990) simulierten Meßwerte sind um Größenordnungen kleiner als das Rauschen.

Um eine hohe Datenqualität zu erreichen, wurde jede Sender–Empfängerspread Kombination über einen ganzen Tag registriert. Dabei wurden im Feld täglich zwischen ein- und zweitausend Transienten für jedes der elektrischen und magnetischen Felder aufgezeichnet. Außerdem wurde während der Messung mit analogen Filtern gearbeitet, um das Rauschen auf ein Maß zu reduzieren, das eine annehmbare digitale Auflösung des Signals gewährleistet.

4 Das Prozessing

Abb. 3 illustriert die besonderen Verhältnisse im Odenwald. Dargestellt ist ein aufgezeichneter Einzeltransient und dazu im Vergleich das Endergebnis des Prozessings. Während bei früheren Messungen das Rausch-zu-Signal Verhältnis um Größenordnungen niedriger lag, belaufen sich die Werte im Odenwald von 10:1 auf bis zu 300:1!

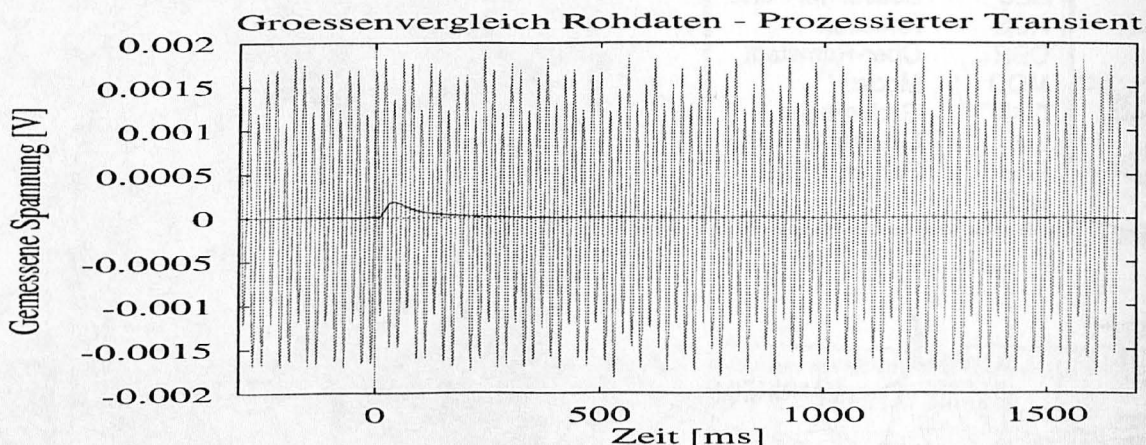


Abbildung 3: Im Feld aufgezeichneter Einzeltransient im Vergleich mit dem Resultat des Prozessings des Datensatzes für $R_x = 01$, $T_x = 06$

Die Möglichkeiten, aus den Odenwalddaten die Nutzsignale zu extrahieren, bestehen zum ersten im geschickten Filtern des Transienten, um das periodische Rauschen zu eliminieren. Im weiteren werden die an einer Station für eine Senderposition aufgezeichneten Daten gestapelt. Das heißt, es wird eine selektive Mittelung durchgeführt, die vor allem das nichtperiodische Rauschen (z. B. Spikes) stark reduziert. Zuletzt wird die Kurve geglättet und das linear äquidistante Signal in ein logarithmisch äquidistantes Signal umgewandelt. Dieses kann jetzt für weitere Interpretationen

1-D Inversion) genutzt werden.

Zum Filtern des periodischen Rauschens werden zwei grundsätzlich verschiedene Arten von Filtern verwendet (Hanstein, 1986):

– Das LOCKIN-Filter paßt eine Sinuswelle vorgegebener Frequenz in Amplitude und Phase an den signalfreien Abschnitt des Transienten an, der sich vor dem Zeitnullpunkt befindet. Unter der Voraussetzung zeitlich konstanten Rauschens wird diese Schwingung auf den gesamten Transienten extrapoliert. Durch Subtraktion wird dieser Rauschenteil aus dem Transienten entfernt.

– Das NOTCH-Filter ist ein rekursiv formuliertes Filter mit einer wählbaren, endlichen Breite. Anschaulich beschreibt die Breite den Bereich, der um eine Störfrequenz herum mitgefiltert werden soll. Der Vorteil dieses Filters ist die hohe Effizienz durch die einstellbare Breite. So werden bei geeigneter Wahl automatisch Schwankungen oder kleine Verschiebungen der Störfrequenz mitgefiltert. Die Benutzung wird aber dadurch eingeschränkt, daß bei breiterem Filter das Nutzsignal einer zunehmenden Verzerrung unterliegt. Der Grund dafür liegt in der Überschneidung der Frequenzspektren von Nutzsignal und Rauschen, besonders im Bereich großer Signaldynamik. Beim Arbeiten mit dem NOTCH-Filter wird hier auch immer ein Anteil des Signals entfernt. Bei breiten Filtern macht sich dies signifikant bemerkbar; der Informationsgehalt des Signals wird verfälscht und macht eine exakte quantitative Interpretation unmöglich.

Mit den beiden beschriebenen Filtern kann die für die Interpretation benötigte Datenqualität nicht erreicht werden, da der Rauschenteil trotz mehrmaligen Filterns zu hoch liegt. Es wurden neue Versionen dieser Filter entwickelt (Hanstein, 1996), die sich dadurch auszeichnen, daß sie speziell auf das LOTEM-Signal abgestimmt sind. Diese Optimalfilter ermöglichen eine weitaus bessere Reduktion des Rauschens. Für das NOTCH-Filter, das sich für die Odenwald-Daten als das geeignete Filter erweist, ist dies in Abb. 4 dargestellt.

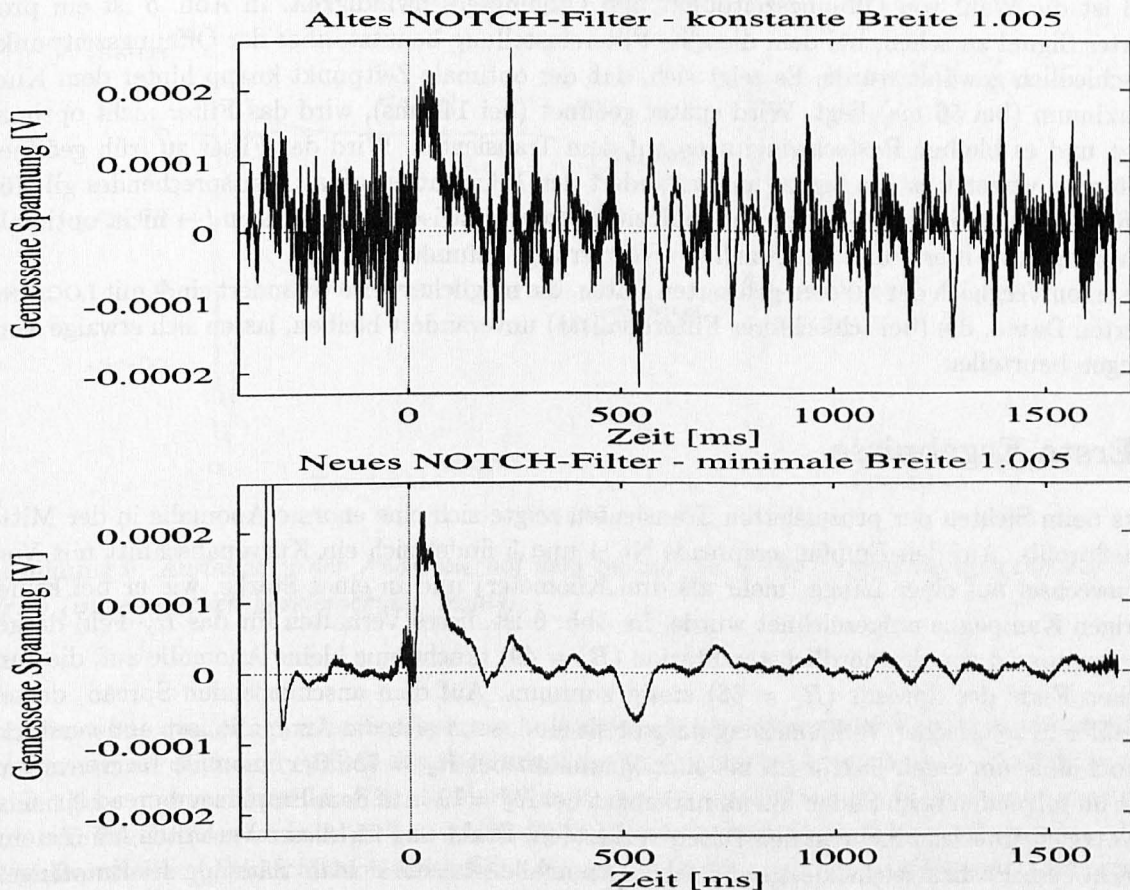


Abbildung 4: Vergleich des alten mit dem neuen NOTCH-Filter

Das wichtigste Charakteristikum des neuen NOTCH-Filters ist seine zeitlich variable Breite. Während direkt nach dem Schalten des Senders beim Zeitnullpunkt mit einer minimalen Breite gefiltert wird, um Verzerrungen zu vermeiden, wird ab einem bestimmten Zeitpunkt das Filter geöffnet und bis zur kritischen Dämpfung verbreitert. Dies geschieht auf dem abklingenden Teil des Transienten, der aufgrund seines Frequenzgehaltes weniger anfällig gegenüber Verzerrungen ist. Eine detaillierte und illustrierte Beschreibung dieses Filters ist in diesem Kolloquiumsband zu finden (Hanstein, 1996).

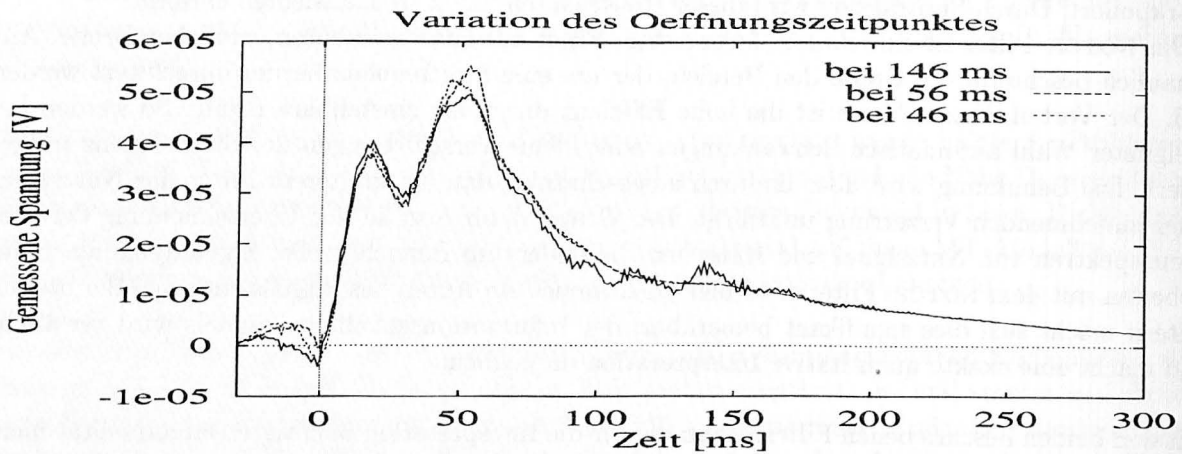


Abbildung 5: *Einfluß des Öffnungszeitpunktes auf das Ergebnis des Prozessings des Datensatzes für $R_x = 83$, $T_x = 03$*

Um das Filter mit maximaler Effizienz und minimaler Verzerrung nutzen zu können, müssen verschiedene Parameter in Abhängigkeit des jeweiligen Signals geeignet gewählt werden. Besonders diffizil ist die Wahl von Öffnungszeitpunkt und Öffnungsgeschwindigkeit. In Abb. 5 ist ein prozessiertes Signal zu sehen, bei dem dieselbe Filtereinstellung benutzt, aber der Öffnungszeitpunkt unterschiedlich gewählt wurde. Es zeigt sich, daß der optimale Zeitpunkt knapp hinter dem Kurvenmaximum (bei 56 ms) liegt. Wird später geöffnet (bei 146 ms), wird das Filter nicht optimal genutzt und es bleiben Restschwingungen auf dem Transienten. Wird das Filter zu früh geöffnet (bei 46 ms), verzerrt es das Signal und verändert den Informationsgehalt. Entsprechendes gilt für die Öffnungsgeschwindigkeit. Auch hier muß ein Mittelweg zwischen zu langsam (\rightarrow nicht optimale Ausnutzung des Filters) und zu schnell (\rightarrow Verzerrung) gefunden werden.

Durch einen Vergleich der NOTCH-gefilterten Daten, die möglicherweise verändert sind, mit LOCKIN-gefilterten Daten, die (bei schlechterer Filterqualität) unverändert bleiben, lassen sich etwaige Verzerrungen beurteilen.

5 Erste Ergebnisse

Bereits beim Sichten der prozessierten Transienten zeigte sich eine enorme Anomalie in der Mitte des Meßprofils. Auf den Empfängerspreads Nr. 4 und 5 findet sich ein Kurvenabschnitt mit Vorzeichenwechsel auf einer Länge (mehr als drei Kilometer) und in einer Stärke, wie er bei keiner bisherigen Kampagne aufgezeichnet wurde. In Abb. 6 ist dieses Verhalten für das H_z -Feld dargestellt. Beginnend von der nördlichsten Station ($R_x = 49$) taucht eine kleine Anomalie auf, die zum südlichen Ende des Spreads ($R_x = 63$) stetig zunimmt. Auf dem anschließenden Spread, dessen Werte hier in zehnfacher Verkleinerung dargestellt sind, setzt sich die Anomalie fort und verstärkt sich nochmals um einen Faktor 25 bis zum Maximum bei $R_x = 75$. Der anomale Kurvenverlauf nimmt im folgenden nach Süden hin ab und endet bei $R_x = 79$. Auf dem Empfängerspread Nr. 6 ist kein Vorzeichenwechsel mehr in den Daten vorhanden. Erklärung für dieses Verhalten könnte eine senkrecht zum Profil streichende, gut leitfähige Anomalie sein, die sich am Süden des Empfängerspreads Nr. 5 erstreckt. Diese würde ein Verhalten wie in Abb. 6 erklären (Hördt, 1992), wurde aber in diesen Größenordnungen bisher weder angetroffen noch simuliert.

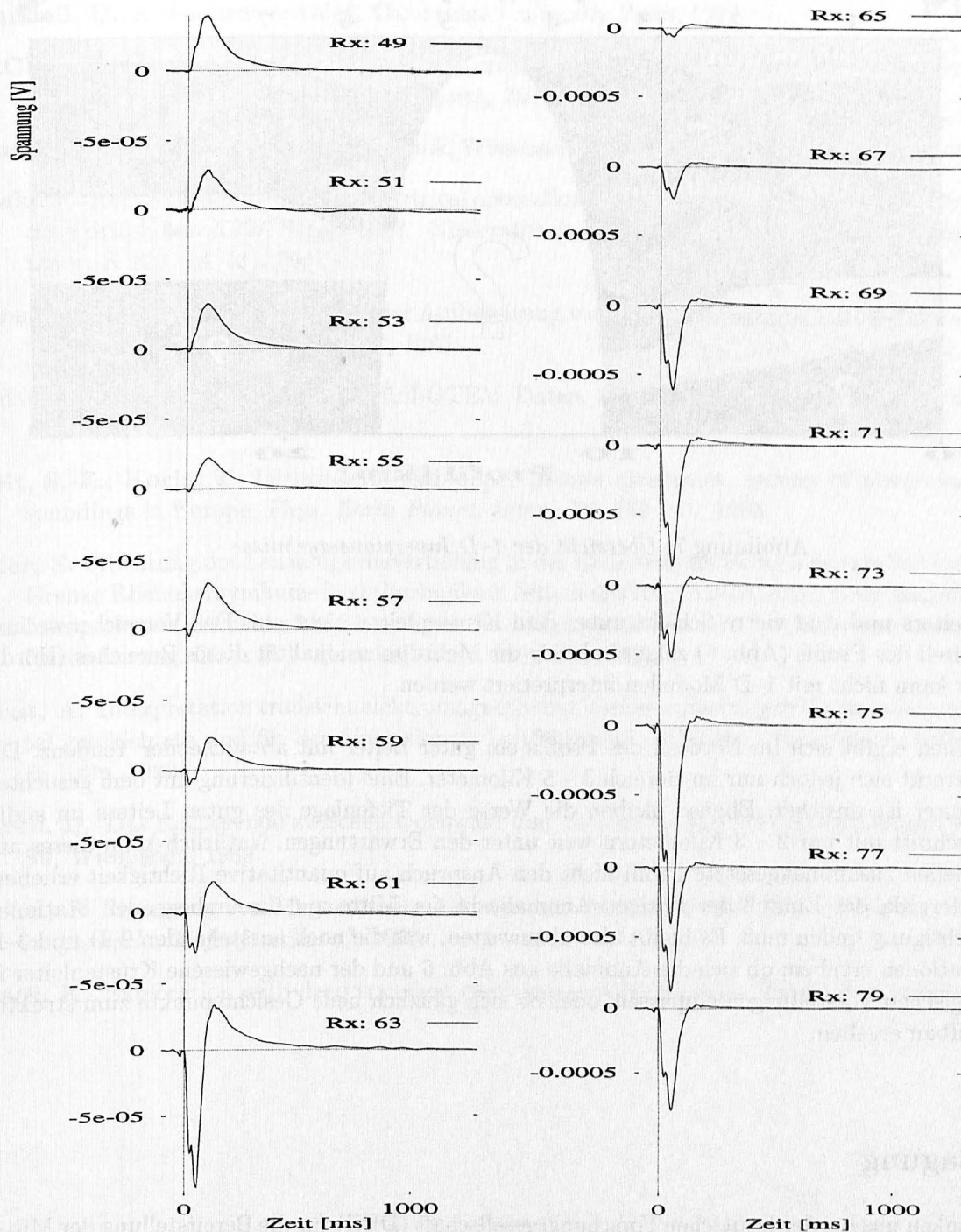


Abbildung 6: Auftauchen der Anomalie auf dem Spread Nr. 4 (links) und Fortsetzung auf Spread Nr. 5 (in zehnfacher Verkleinerung, rechts)

Für eine erste quantitative Interpretation wurde eine 1-D Inversion sämtlicher Daten durchgeführt. Im Bereich nördlich und südlich der oben angeführten Anomalie können für eine Vielzahl von Stationen gute und vor allem konsistente Modellanpassungen erreicht werden. Eine Zusammenstellung von 1-D Ergebnissen ist in Abb. 7 zu sehen. Es können 3-Schicht Modelle angepaßt werden, die der Modellvorstellung Deckschicht - Kristallin - Krustenleiter entsprechen. 2-Schicht Modelle ergeben zumeist nicht zufriedenstellende oder der Geologie widersprechende Ergebnisse. Die Ergebnisse von 4-Schicht Modellen bestätigen die angeführten Modellvorstellungen, lösen aber die Mächtigkeit des

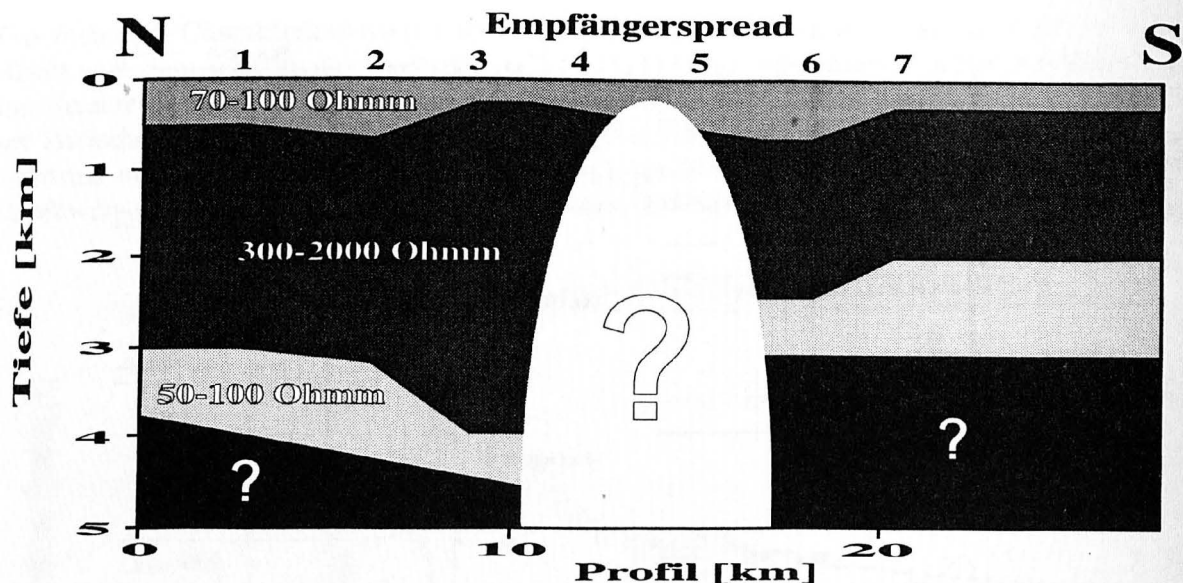


Abbildung 7: Übersicht der 1-D Inversionsergebnisse

Krustenleiters und eine vierte Schicht unter dem Krustenleiter nicht auf. Der Vorzeichenwechsel im Mittelteil des Profils (Abb. 6) zeigt eindeutig die Mehrdimensionalität dieses Bereiches (Hördt, 1992). Er kann nicht mit 1-D Modellen interpretiert werden.

Im einzelnen ergibt sich im Nordteil des Profils ein guter Leiter mit abtauchender Tendenz. Die Tiefe erstreckt sich jedoch nur im Bereich 3 – 5 Kilometer. Eine Identifizierung mit dem gesuchten Krustenleiter ist unsicher. Ebenso bleiben die Werte der Tiefenlage des guten Leiters im südlichen Abschnitt mit nur 2 – 3 Kilometern weit unter den Erwartungen. Natürlich kann dieses aus 1-D Modellen zusammengesetzte Profil nicht den Anspruch auf quantitative Richtigkeit erheben, insbesondere da der Einfluß der riesigen Anomalie in der Mitte auf die umliegenden Stationen Berücksichtigung finden muß. Es bleibt also abzuwarten, was die noch ausstehenden 2-D und 3-D Interpretationen ergeben; ob sich die Anomalie aus Abb. 6 und der nachgewiesene Krustenleiter in die geologischen Vorstellungen einpassen, oder ob sich gänzlich neue Gesichtspunkte zum strukturellen Aufbau ergeben.

Danksagung

Wir bedanken uns bei der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) für die Bereitstellung der Mittel für die Meßkampagne unter der Förderungsnummer Ne 220/14-1.

Literaturverzeichnis

- Behr, H.-J. KTB und kontinentale Krustenforschung – warum ein wissenschaftliches Tiefbohrprogramm? *KTB-Report 87-1*, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover, 1–33, 1987.
- Behr, H.-J.; Heinrichs, T. Geological interpretation of DEKORP 2-S: A deep seismic reflection profile across the Saxothuringian and possible implications for the Late Variscian structural evolution of Central Europe. *Tectonophysics*, **142**, 173–202, 1987.

- Blundell, D.** A continent revealed. Cambridge University Press, 1992.
- ERCEUGT-Group** An electrical resistivity crustal section from the Alps to the Baltic Sea (central segment of the EGT). *Tectonophysics*, **207**, 123–139, 1992.
- Frisch, W.; Loeschke, J.** Plattentektonik. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1993.
- Haak, V.** Relations between crustal electrical anomalies and tectonic/geochemical processes through deep drill holes. *KTB-Report 94-2*, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover, A 129 – A 134, 1994.
- Hanstein, T. et al.** Einige Aspekte der Aufbereitung von LOTEM-Daten. *11. Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung"*, 1986.
- Hanstein, T.** Digitale Optimalfilter für LOTEM-Daten. *16. Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung"*, 1996.
- Hjelt, S.-E.; Korja, T.** Lithospheric and upper-mantle structures, results of electromagnetic soundings in Europe. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **79**, 137–177, 1993.
- Hofer, S.** Ableitung der Leitfähigkeitsverteilung in der Erdkruste im Bereich der großtektonischen Grenze Rhenoharzynikum–Saxothuringikum östlich des Rheingrabens aus einer gemeinsamen Interpretation flächenhafter Messungen der Magnetotellurik und der Erdmagnetischen Tiefensondierung. Diss., Fak. Geowiss., Univ. München, 1990.
- Hördt, A.** Interpretation transient elektromagnetischer Tiefensondierungen für anisotrop horizontal geschichtete und für dreidimensionale Leitfähigkeitsstrukturen. Dissertation, Universität zu Köln, 1992.
- Marell, D.** Das Rotliegende zwischen Odenwald und Taunus. *Geologische Abhandlungen Hessen*, **89**, Wiesbaden, 1989.
- Michel, J.** Prozessing von Magnetotellurik-Daten aus dem Odenwald. *16. Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung"*, 1996.
- Strack, K.** Exploration with deep transient electromagnetics. Elsevier, Amsterdam, 1992.