

Erste Erfahrungen mit der NanoTEM - Apparatur

A. Gaidetzka¹, M. Goldman², S. L. Helwig¹ und B. Tezkan¹

Zusammenfassung

Transientelektromagnetische (TEM) Messungen mit kurzen Abschaltzeiten des Sendestromes ermöglichen die Erkundung oberflächennaher Untergrundstrukturen. Die NanoTEM - Apparatur³ ist theoretisch in der Lage bei Spulengrößen von $5m \times 5m$ bis $100m \times 100m$ ab ca. $1\mu s$ - $6\mu s$ nach dem Abschalten des Sendestromes zu messen. Nach anfänglichen Schwierigkeiten bei Messungen mit der NanoTEM - Apparatur wurden die Eigenschaften der Apparatur systematisch untersucht. Wir präsentieren hier die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchung und zeigen eine erste Anwendung der NanoTEM - Apparatur bei der Untersuchung einer Altlast. Dabei zeigte sich ein ungewöhnliches Abklingverhalten der Transienten, daß eventuell auf einen superparamagnetischen Effekt schließen läßt.

1. Einleitung

Die von der Firma Zonge produzierte TEM - Apparatur besteht aus dem Multifunktionsempfänger GDP-32 II und dem Sender NT-20. Der NT-20 Sender speist bis zu 4A Sendestrom in eine z.B. quadratische Senderspulenlänge von $5m$ - $100m$ Kantenlänge ein. Der Empfänger tastet im NanoTEM - Modus das analoge Signal zunächst zeitlich äquidistant mit $1,2\mu s$ oder $1,6\mu s$ ab. Aus diesen Werten werden im Anschluß intern 31 fest vorgegebene zeitlich logarithmisch verteilte Meßwerte gebildet. Insgesamt wird ein Zeitbereich von $\sim 1\mu s$ bis $\sim 1ms$ abgedeckt. Der Empfänger ist mit dem Sender über ein Synchronisationskabel verbunden und steuert den gesamten Meßvorgang.

2. Eigenschaften des NanoTEM

2.1 Dynamik

Das Auflösungsvermögen der NanoTEM - Karte ist eine wichtige Größe bei der Erkundung des Untergrundes. Für eine Sondierung muß der Dynamikbereich groß genug sein, um das schnell kleiner werdende TEM - Signal über etwa drei Dekaden in der Zeit registrieren zu können. Die NanoTEM - Karte basiert auf einem 14bit - Analog - Digital - Wandler (ADC) mit einer maximalen Eingangsspannung von $5V$. Dies bedeutet, daß bei der fest vorgegebenen zehnfachen Eingangsverstärkung das maximale Signal einen Wert von $0,5V$ nicht überschreiten darf. Die Tabelle 1 zeigt die die minimalen und maximalen Werte, die die NanoTEM - Karte auflösen kann. Sie ergeben sich aus der Auflösung 14bit und der maximalen detektierbaren Spannung des ADC sowie der Vorverstärkung A_v des Empfangssignales. Der ADC löst sowohl positive und negative Werte auf, woraus sich eine effektive Bitzahl von 13 ergibt. Daraus läßt sich das minimale detektierbare Signal U_{min} berechnen zu:

¹Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, Deutschland

²The Geophysical Institute of Israel, Lod, Israel

³Zonge Engineering and Research Organisation Inc.

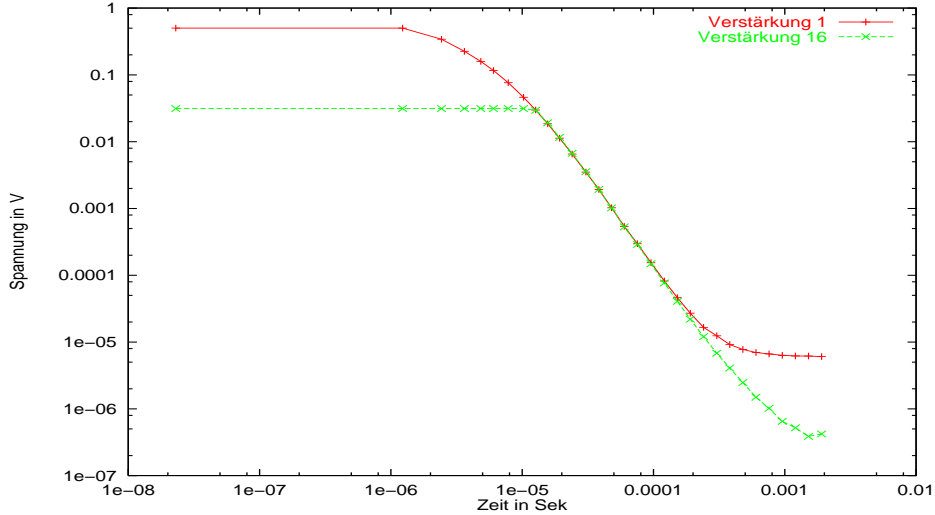


Abbildung 1: Mit dem NanoTEM gemessene Spannungskurven bei verschiedenen Verstärkungen. Die Kurve mit max. Verstärkung (16) ist im Bereich $<10\mu s$ deutlich übersteuert. Die Kurve ohne Verstärkung zeigt zu Zeiten $>100\mu s$ die Grenze des Auflösungsvermögens.

$$U_{min} = \frac{5V}{2^{13} * 10 * A_v}$$

Die Abbildung 1 zeigt zwei Spannungskurven die mit identischer Konfiguration und unterschiedlichen Verstärkungsfaktoren am gleichen Ort aufgezeichnet wurden. Die Unterschiede zwischen beiden Kurven sind deutlich erkennbar. Die mit 16facher Verstärkung aufgezeichnete Kurve übersteigt bis $10\mu s$ den Eingangsspannungsbereich des ADC und zeigt daher zu Beginn einen horizontalen Verlauf. Dieses Verhalten wird als Übersteuerung bezeichnet. Auch die ersten beiden Punkte der ohne zusätzliche Verstärkung aufgezeichnete Kurve sind übersteuert. Diese Aufzeichnung ist ab $2\mu s$ nutzbar, zeigt aber zu Zeiten $>100\mu s$ ein Einschwenken der Spannungswerte auf einen horizontalen Verlauf, der durch die begrenzte Dynamik der Apparatur verursacht wird. Auch die stärker verstärkte Kurve zeigt zu späten Zeiten ansatzweise dieses Verhalten. Im Mittelbereich zwischen $1 \times 10^{-5} s$ bis $6 \times 10^{-5} s$ stimmen beide Kurven überein. Um eine erfolgreiche Untersuchung des Untergrundes über den gesamten Zeitbereich zu realisieren, wird ein gemeinsamer Transient aus beiden Kurven gebildet. Dabei werden die gestörten Bereiche nicht berücksichtigt. Man erhält so einen Transienten über den gesamten verfügbaren Zeitbereich der NanoTEM - Karte. Die Abbildung 1 zeigt auch, daß die minimalen aufgezeichneten Spannungswerte kleiner als die angegebenen Werte in Tabelle 1 sind. Der Grund hierfür ist die Mittelung der abgetasteten (positiven und negativen) Spannungswerte über die Zeitfensterbreite.

	minimale Verstärkung		maximale Verstärkung	
Auflösung	Minimal in V	Maximal in V	Minimal in V	Maximal in V
14bit	$6,1 \times 10^{-5}$	0,5	$3,8 \times 10^{-6}$	0,031

Tabelle 1: Auflösungsvermögen der NanoTEM - Karte bei unterschiedlichen Verstärkungen des Empfangssignales.

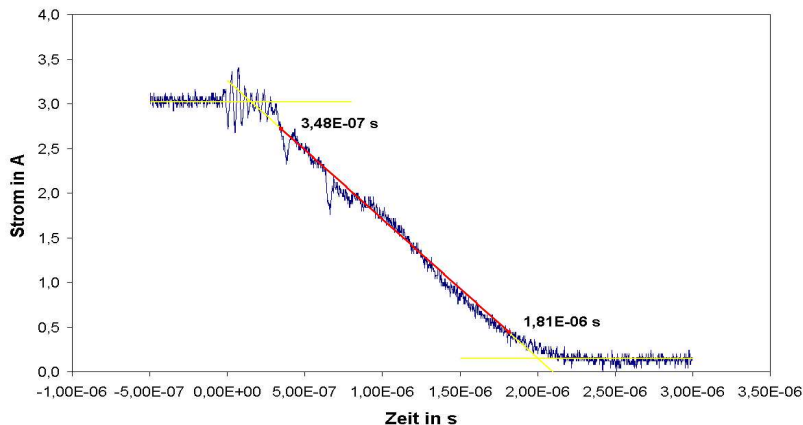


Abbildung 3: Abklingverhalten des Sendestroms in einer $20m \times 20m$ Sendespule. Rampenzeit= $1,46\mu s$.

2.2 Die Rampe

Die TEM - Methode benutzt als Antenne für die Senderankopplung eine Leiterschleife mit einer von Null verschiedenen Induktivität. Dies hat zur Folge, daß der Sender eine gewisse Zeit benötigt bis der Strom nach dem Abschalten auf Null abgeklungen ist. Dadurch entspricht die Abschaltfunktion nicht mehr einer idealen Stufenfunktion (Abbildung 2a). Die Apparatur von Zonge wurde für den NanoTEM - Modus so konstruiert, daß die Abschaltfunktion einer linearen Rampe entspricht. Die Zeit (t_0), für die die Änderung des Senderstromes auf $\frac{dI}{dt} = 0$ abgeklungen ist, nennt man Rampenzeit oder auch TxDelay. Bei dem NanoTEM liegt der Zeitnullpunkt der Messung am Ende dieser Rampe (Abbildung 2b). Die Länge der Rampe ist abhängig von der Größe der Sendespule und dem Sendestrom. Meßtechnisch ist die Rampenzeit die Zeit, in der der Strom von 90 % auf 10% seines Maximalwertes fällt. In Abbildung 3 ist die gemessene Rampenfunktion von einer Sendespule mit $20m$ Kantenlänge dargestellt. Aufgetragen ist der Strom, gegen die Zeit. Die gelben Linien sind Hilfslinien und zeigen die Mittelwerte der Funktion vor und nach dem Abschalten sowie die Verbindung zwischen den Mittelwerten. Die rote Linie zeigt die meßtechnisch bestimmte Rampe. Der bestimmte Wert von $1,46\mu s$ paßt gut zu den Herstellerangaben, die für eine $20m \times 20m$ Spule bei $1,5\mu s$ liegen. Je nach Spulengröße und Untergrund kann es vorkommen, daß die Regelung des NanoTEM Senders nicht ausreicht und der Sendestrom nicht linear heruntergefahren wird. Auch Schwingungen im Sendestrom wurden schon beobachtet (Steuer [2002]).

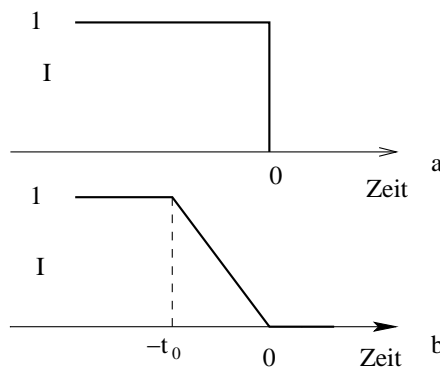


Abbildung 2: Normierte Sender Signalform: a. ideale Stufenfunktion; b. lineare Rampe

3 Auflösungsbereich von NanoTEM Messungen

Die minimale Eindringtiefe d berechnet sich nach Spies [1989] aus der frühesten meßbaren Zeit t_{min} , der magnetischen Feldkonstante μ_0 und dem spezifischen Widerstand ρ der Deckschicht.

$$d = \sqrt{\frac{2t_{min}\rho}{\mu_0}} \quad (1)$$

Gute Meßergebnisse sind nur mit Sendespulen von $20m \times 20m$ und größer zu erreichen. Die mi-

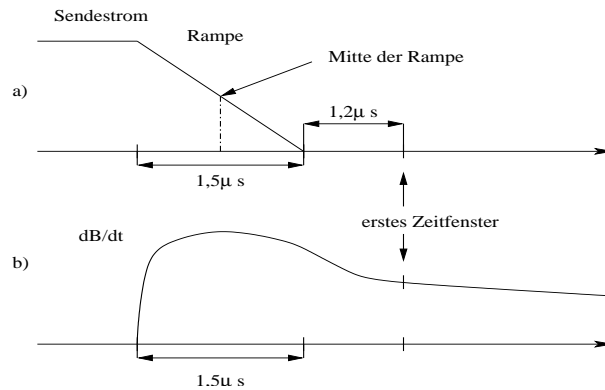


Abbildung 4: a) Das erste Zeitfenster ist beim NanoTEM maximal ein Sampleschritt ($1,2 \mu s$) vom Ende der Rampe entfernt. b) $\frac{dB}{dt}$ über einem leitfähigen Halbraum. Die maximale Anregung befindet sich in der Mitte der Rampe.

nimale Zeit t_{min} ergibt sich ungefähr aus der Zeit zwischen dem Maximum der Sendeanregung (Abbildung 4b) und dem ersten Messpunkt. Sie entspricht dem Abstand des ersten Zeitfensters ($1,2 \mu s$, Abbildung 4a) zum Ende der Rampe zuzüglich der halben Rampenzeit. Die Zeit beträgt hier ca. $2 \mu s$. Die dazugehörigen Eindringtiefen für unterschiedliche Halbraumwiderstände sind in Tabelle 2 angegeben. Die Auflösung von Untergrundstrukturen in größeren Tiefen ist bestimmt durch den Übergang des Empfangssignals zum Rauschniveau. Die Erfahrung zeigt, daß die vertrauenswürdige Daten bis zu einer maximalen Zeit von $1 ms$ aufgezeichnet werden. Die nach Gleichung 1 berechneten Eindringtiefen für verschiedene Halbräume bei einer Zeit von $1 ms$ sind in Tabelle 2 angegeben. Gemäß der Skintiefe steigen die minimale und maximale Eindringtiefe mit zunehmendem Widerstand an.

Zeit	Widerstand des Halbraumes				
	$1 \Omega m$	$5 \Omega m$	$10 \Omega m$	$50 \Omega m$	$100 \Omega m$
$2 \mu s$	$1,3 m$	$2,8 m$	$4,0 m$	$8,9 m$	$12,5 m$
$1 ms$	$28,0 m$	$62,6 m$	$88,5 m$	$198,0 m$	$280,0 m$

Tabelle 2: Die Eindringtiefen der NanoTEM Apparatur zu verschiedenen Zeiten für verschiedene Halbraumwiderstände.

4. Eine erste Anwendung

Die Messung über einer Altlast

Die im Norden von Köln befindliche Altlast ist eine alte Kiesgrube die in den 60er Jahren ausgekieset und mit Haus-, Sperrmüll, Bauschutt und Straßenaushub etc. verfüllt wurde. Diese Deponie ist nicht nach unten abgedichtet, so daß sich die ausgewaschenen Deponieinhaltsstoffe mit dem Grundwasser vermischen konnten. Diese Altlast wurde von *Recher* [2002] mit der Radiomagnetotellurik (RMT) und von *Hönig* [2002] mit der induzierten Polarisierung (IP) und Schlumberger - Geoelektrik untersucht. Entlang des dort gesteckten Rasters (Abbildung 5) wurde das Profil $y=0m$ von Profilmeter $x=10m$ bis $x=250m$ mit einem Meßpunktabstand von $20m$ untersucht. Daraus ergaben sich 13 NanoTEM Sondierungen. Für die Messung wurde eine Central - Loop - Meßanordnung mit einer $20m \times 20m$ Sendespule und $5m \times 5m$ Empfängerspule verwendet. Auf dem Profil befindet sich bei $x=60m$ (TEM Punkt 4) eine Bohrung, von der Daten bis in $15m$ Tiefe vorhanden sind. Eine Fragestellung war, ob mit NanoTEM Messung die Unterkante der Deponie aufzulösen ist. Nach Archivakten befindet sich diese in einer Tiefe von ca. $12m - 13m$.

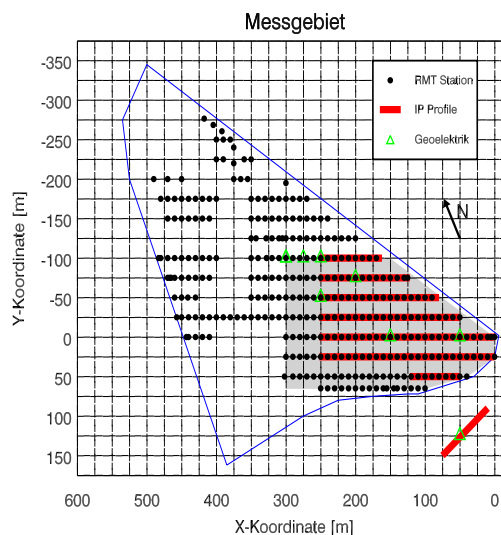


Abbildung 5: Profilstaster auf der Deponie. TEM - Messungen wurden auf dem Profil $y=0m$ von $x=10m$ bis $x=250m$ durchgeführt. Quelle: *Recher* [2002].

4.1 Rohdaten

In Abbildung 6 ist beispielhaft der Transient (grün) von Meßpunkt 4 als normierte Spannung

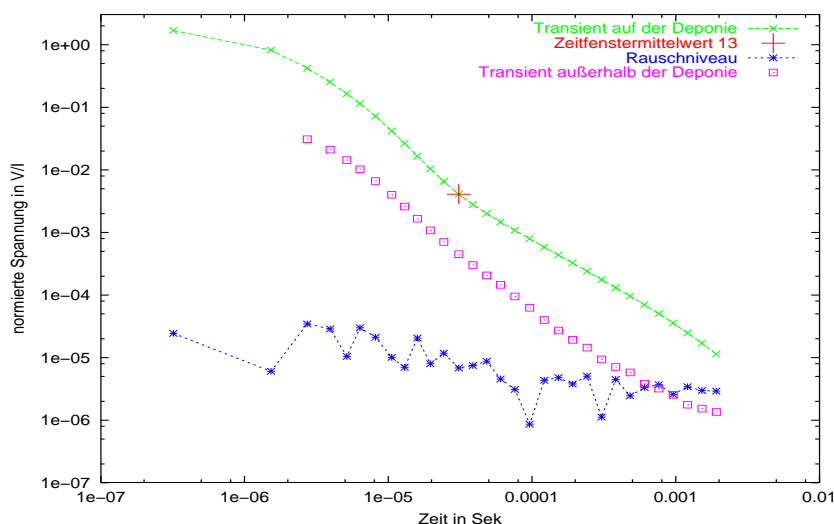


Abbildung 6: Der Transient (grün) von Meßpunkt 4 im Profil $y=0m$. Das örtliche Rauschniveau ist deutlich geringer als die minimale Amplitude des Transienten vom Meßpunkt 4. Der Transient (pink) außerhalb der Deponie zeigt ein normales Abklingverhalten.

$(\frac{V}{A})$ gegen die Zeit aufgetragen. Im Spätzeitbereich ist eine deutlich Änderung der Steigung ab dem Zeitfenster 13 (rote Markierung) zu sehen. Die Steigung von $U \sim t^{-1.2}$ ist untypisch für das elektromagnetische Abklingverhalten von Transienten. Eine Aufzeichnung des Rauschens (Abbildung 6 blaue Kurve) zeigt, daß die gemessene Spannungen auch zu späten Zeiten deutlich über dem Rauschniveau liegen. Um einen gerätespezifischen Effekt auszuschließen, wurden zusätzliche Messungen mit der russischen Cycle 5 TEM Apparatur durchgeführt, die das gleiche Verhalten zeigen. Dieses Phänomen wird in Kapitel 4.4 genauer betrachtet.

4.2 1D - Inversion der Daten

Die Interpretation der Daten erfolgte mit einem an der Universität zu Köln entwickelten 1D - Inversionsprogramm von *Eckard* [1993]. Dabei wurde für die Inversionen jeweils das erste Zeitfenster nicht berücksichtigt, da dessen Spannungswerte übersteuert oder nahe an der Übersteuerungsgrenze waren. Als geeignetes Startmodell für die 1D - Inversion hat sich aus den RMT - Ergebnissen [*Recher*, 2002] und der geologischen Karte [*Geologisches Landesamt NRW*, 1986] ein Vier - Schichtfall herausgestellt. Der flache Abfall ($t^{-1.2}$) der Transienten fordert bei der Inversion sehr gut leitende Schichten mit zunehmender Tiefe. Aus den Inversionsergebnissen aller

Schicht	Mächtigkeit in m	Widerstand in Ωm
1.	5	200
2.	8	10
3.	5	2
4.		1

Tabelle 3: Startmodell für die 1D - Inversion der TEM - Daten für sämtlich TEM - Stationen entlang Profil $y=0m$.

Stationen wurde eine Widerstandsverteilung über das gesamte Meßprofil bis in eine Tiefe von $30m$ in Abbildung 8 dargestellt. Hiernach wird die Deponie ($10\Omega m - 12\Omega m$) von einer Deckschicht ($3m - 5m$ mächtig) nach oben und durch zwei sehr gute Leiter nach unten begrenzt. Die Schicht mit einem Widerstand von $2,5\Omega m - 3\Omega m$ könnte den Grundwasserleiter repräsentieren, der durch ausgewaschene Deponieinhaltsstoffe sehr gut leitend ist. Die nachfolgende Schicht mit Widerstandswerten von $<0,5\Omega m$ kann nicht real sein.

Der Fehler der Anpassung aus der Inversion [*Eckard*, 1993] variiert zwischen 2% - 5%. TEM - Meßpunkt 1 ($x=10m$) zeigt für die Schichtdicke der erste Schicht ein deutlich größeren Wert als die anderen Meßpunkte. Dies ist damit zu begründen, daß sich dieser Meßpunkt am Rand der Deponie befindet und die aufgezeichneten Meßdaten durch die laterale Widerstandsänderung beeinflusst werden. Die Tiefenabgrenzung zwischen erster und zweiter Schicht ist in diesem Fall mit einer 1D - Inversion nicht genau zu bestimmen [*Rabinovich*, 1995]. An den anderen TEM - Meßpunkten ist eine gute Bestimmung der Schichtgrenzen aus der Inversion möglich. Der Widerstand der ersten Schicht wird in der 1D - Inversion nicht aufgelöst *Eckard* [1993] und kann jeden Wert über $150 \Omega m$ annehmen.

Die Bohrlochdaten bei TEM - Meßpunkt 4 zeigen die Untergrenze der Deponie in einer Tiefe von ca. $13m$. Für die RMT Ergebnisse ist diese Grenze vom Startmodell der RMT - Inversion abhängig und kann zwischen $12m - 15m$ variieren [*Recher*, 2002]. Eine genaue Auflösung der Deponiegrenze und der angrenzenden Schichten unter der Deponie ist durch die RMT - Methode auf Grund der mangelnden Verfügbarkeit von Frequenzen unterhalb des VLF - Bereiches zur Zeit nicht erreichbar [*Recher*, 2002].

4.3 Vergleichsmessung außerhalb der Deponie

Ein Profil südwestlich, außerhalb der Deponie (Abbildung 5), wurde für Vergleichszwecke gemessen. Die Auslage und die Meßeinstellungen wurden wie auf der Deponie beibehalten. Die Profillänge beträgt $100m$ und der Meßpunktabstand ist $20m$. In ca. $50m$ Entfernung befindet sich parallel zum Profil eine Eisenbahnstrecke. Das Ergebnis der 1D - Inversion bis zu einer Tiefe von $30m$ ist in Abbildung 9 zu sehen. Die Schichtgrenze von quartären zu tertiären Sedimenten ist deutlich in etwa $16m$ Tiefe zu erkennen. Im Bereich der Deponie wurde maximal bis zu dieser Tiefe ausgekiest. Unter dieser Schicht befindet sich die Schicht aus Ton mit Einlagerungen von Sand und Braunkohlenflözen [Geologisches Landesamt NRW, 1986], die mehrere zehner meter mächtig sind. Diese Schichten fallen nach Südwesten hin ein. In Wechsellagerung befindet sich eine überwiegend feinsandige Schicht mit geringmächtigen kohligen oder schluffigen bis tonigen Einlagerungen.

Die außerhalb der Deponie mit dem NanoTEM erzielten Ergebnisse stimmen sowohl im Widerstand als auch in der Tiefe gut mit den RMT Ergebnissen überein. Hier ist das Abklingverhalten der Transienten (Abbildung 6 pinke Kurve) normal und es werden keine extrem guten Leitfähigkeiten zur Anpassung benötigt.

4.4 Mögliche Ursache der Meßkurven

Eine mögliche Erklärung für die ungewöhnliche Steigung der Transienten wären magnetische Einflüsse, speziell ein superparamagnetischer Effekt, der durch eine frequenzabhängige Permeabilität beschrieben werden kann [Barsukov und Fainberg, 2001]. Der superparamagnetische Effekt bei TEM - Messungen wurde schon in den frühen 80er Jahren diskutiert (Lee [1981], Buselli [1982]). In den meisten Fällen wird dieser Effekt bei Coincident Loop - Messungen und Messungen, bei denen Sendespule und Empfangsspule eng beieinander liegen, beobachtet (ca. $3m$ Reynolds [1997]). Geologisch tritt er bei weit ausgedehnten Gebieten mit oberflächennahen Ton-schichten, die vulkanische Sedimente beinhalten, aber auch bei Gletschern und Dauerfrostgebieten auf. Der Effekt überlagert teilweise bzw. den ganzen aufgezeichneten Transienten. Er wird durch eine Änderung der Orientierung des magnetischen Momentes in kleinen ferromagnetischen Teilchen (Durchmesser von wenigen Ångstroms), hervorgerufen durch die rasche Änderung des Erregermagnetfeldes, verursacht. Ein typisches Merkmal in Meßdaten ist die Proportionalität der Spannung zur Zeit: $U(t) \sim t^{-1}$ [Neel, 1950]. Barsukov und Fainberg [2001] zeigen, daß eine Proportionalität bis zu $t^{-1.2}$ möglich ist. Dies ist ein sehr wichtiges Indiz, da normalerweise das Abklingverhalten von $U(t)$ eine Proportionalität zu $t^{-\frac{5}{2}}$ aufweist. Ein weiteres Merkmal für das Auftreten eines superparamagnetischen Effektes ist die Tatsache, daß der Spätzeitbereich des scheinbaren Widerstandes für verschiedene Senderspulenlängen bei einer doppellogarithmischen Darstellung parallel verläuft. Entsprechende Experimente wurden auf der Deponie Longerich durchgeführt und sind in Abbildung 7 dargestellt. Sowohl die parallel verlaufenden scheinbaren Widerstände zu späten Zeiten als auch die sehr kleinen Widerstandswerte bei der Inversion passen zu der Annahme eines superparamagnetischen Effektes. Zur Vermeidung der Einflüsse dieses Effektes können TEM - Messungen in Separate Loop - Konfiguration durchgeführt werden [Barsukov und Fainberg, 2001]. Wegen des hohen Rauschniveaus im Meßgebiet waren entsprechend von uns durchgeführte Separate Loop - Messungen leider nicht aussagekräftig.

4.5 Diskussion

Die Messung auf der Deponie zeigt die vertikale Abgrenzung der Deponie zur normalen Geo-

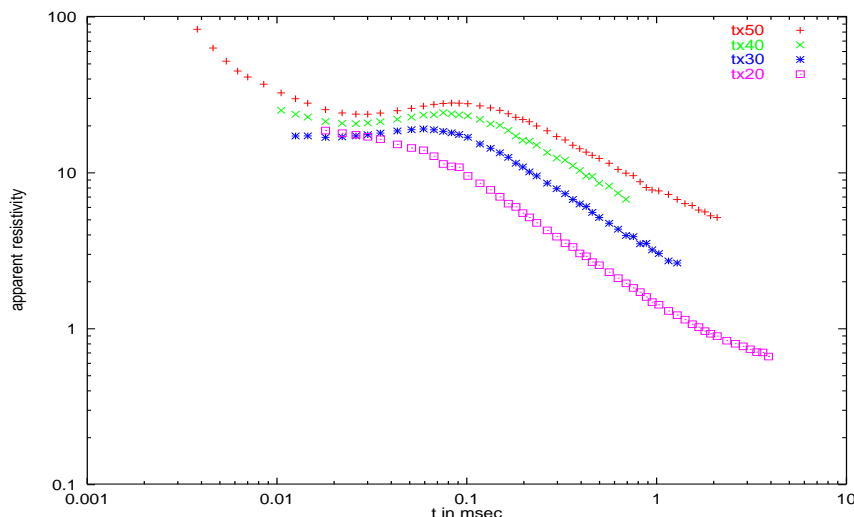


Abbildung 7: Scheinbare Widerstand für verschiedene Senderspulen Größen. Im Spätzeitbereich verlaufen die Kurven der Größe nach parallel.

logie in einer Tiefe von ungefähr $13m - 15m$. Dieses Ergebnis korreliert zwar einigermaßen mit den Daten aus der Bohrung, den RMT Ergebnissen und der Grenze zwischen Quartär und Tertiär, sollte aber dennoch zurückhaltend interpretiert werden. Die von uns durchgeführten Untersuchungen legen nahe, daß die sehr flach verlaufenden Meßkurven durch einen superparamagnetischen Effekt verursacht werden. Sollte ein solcher tatsächlich vorliegen, so wäre die Modellannahme, die in die 1D - Inversion eingeht, verletzt und die invertierten Schichttiefen und Widerstände wären ohne Bedeutung. Um die Daten weiter untersuchen zu können, muß eine frequenzabhängige Permeabilität in die TEM Vorwärtsrechnung eingebaut werden. Damit ließe sich klären, ob die Daten auch quantitativ durch einen superparamagnetischen Effekt erklärbar sind. Die physikalischen Ursachen eines solchen Effektes auf einer Deponie sind allerdings noch völlig unklar.

5. Danksagung

Ich danke S. Recher, Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, für die Bereitstellung der RMT - Ergebnisse und Bohrlochdaten.

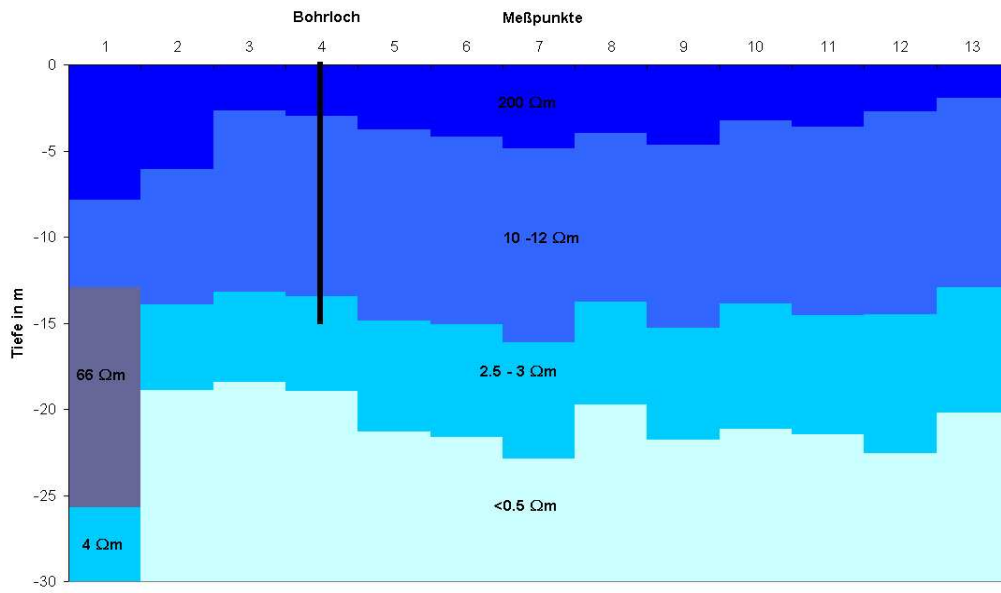


Abbildung 8: Ergebnis der 1D - Inversion von NanoTEM Daten auf der Deponie ($y=0\text{m}$)

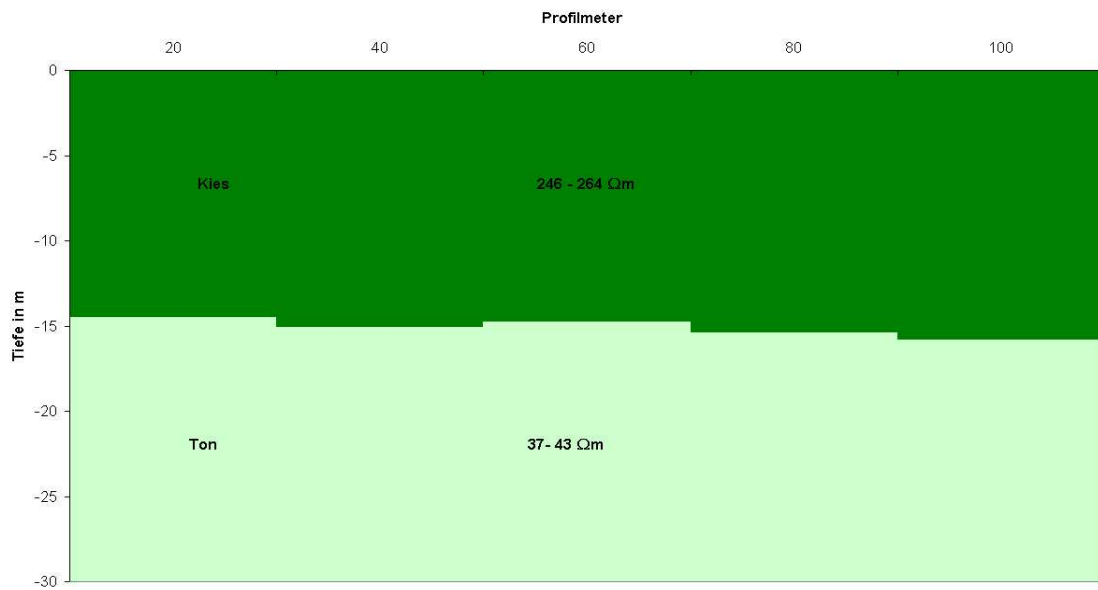


Abbildung 9: Ergebnis der 1D - Inversion in einem zur Deponie benachbarten Waldstück mit ungestörter Geologie

Literatur

- Barsukov, P. O. und E. B. Fainberg**, Superparamagnetic effect over gold and nickel deposits, *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 6, 61–72, 2001.
- Buselli, G.**, The effect of near-surface superparamagnetic material on electromagnetic measurements, *Geophysics*, 47, (9), 1315–1324, 1982.
- Eckard, M.**, Joint Inversion von Gleichstromgeoelektrik und Transientenelektromagnetik, Diplomarbeit, Institut für Geophysik und Meteorologie an der Universität zu Köln, April 1993.
- Geologisches Landesamt NRW**, Ingenieurgeologische Karte 1:25.000, Erläuterungen zu Blatt 5007 Köln, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld, 1986.
- Hönig, M.**, *Entwicklung und Anwendung von Auswertalgorithmen für die Induzierte Polarisation im Zeitbereich in bis zu drei Dimensionen*, Dissertation, Univ. zu Köln, Inst. für Geophys. und Meteo., 2002.
- Lee, T.**, Transient electromagnetic response of a polarizable ground, *Geophysics*, 46, (7), 1037–1041, 1981.
- Neel, L.**, Theorie du trainage magnetique des substances massives dans le domaine, *Le Rayleigh. J. Phys. et Radium*, 1950.
- Rabinovich, M.**, Errors of 1-D interpretation of 3-D TDEM data in the application of mapping saltwater/freshwater contact, *J. Appl. Geophys.*, 34, (34), 23–34, 1995.
- Recher, S.**, *Dreidimensionale Erkundung von Altlasten mit Radiomagnetotellurik - Vergleiche mit geophysikalischen, geochemischen und geologischen Analysen an Bodenproben aus Rammkernsondierungen*, Dissertation, Univ. zu Köln, Inst. für Geophys. und Meteo., 2002.
- Reynolds, J.**, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley & Sons Ltd., Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD, England, 1997.
- Spies, B. R.**, Depth of investigation in electromagnetic sounding methods, *Geophysics*, 54, 872–888, 1989.
- Steuer, A.**, Kombinierte Auswertung von Messungen mit Transientelektromagnetik und Radiomagnetotellurik zur Grundwassererkundung im Becken von Ouarzazate (Marokko), Diplomarbeit, Univ. zu Köln, Inst. für Geophys. und Meteo., 2002.