

Grundwasserkontamination bei Roorkee/Indien: 2D Joint Inversion von Radiomagnetotellurik und Gleichstromgeo- elektrik Daten

P. Yogeshwar¹, B. Tezkan¹, M. Israil²

1: Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität zu Köln, Email: yogeshwar@geo.uni-koeln.de

2: Earth Science Departement, Indian Institute of Technology, Roorkee

In der landwirtschaftlich geprägten Region um Roorkee in Nordindien ist der Einsatz von Düngemittel sowie die Bewässerung der Felder mit Abwasser gängige Praxis, wobei das Abwasser durch offene, teilweise unbefestigte Kanäle transportiert wird. Die umliegende Landbevölkerung bezieht ihr Frischwasser oftmals aus Brunnen, die aus einem oberflächennahen Aquifer gespeist werden. Eine Gefährdung dieser oberflächennahen Aquifersysteme durch den praktizierten Umgang mit Abwasser und Düngemittel ist nicht auszuschließen.

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wurden ein landwirtschaftlich genutztes und stark mit Abwasser bewässertes Gebiet nahe einer Mülldeponie und ein als kontaminationsfrei angenommenes Referenzprofil mit den Methoden der Gleichstromgeoelektrik (DC) und der Radiomagnetotellurik (RMT) vermessen.

Die einzelnen Profile wurden neben Benutzung von gängiger 1D und 2D Auswertesoftware mittels eines neu entwickelten 2D Joint Inversionsprogrammes invertiert und interpretiert.

Verglichen mit den Ergebnissen des Referenzprofils zeigen die Ergebnisse auf dem kontaminierten Gebiet nahe der Deponie deutlich erhöhte Leitfähigkeitswerte bis zu einer Tiefe von ca. 15 m. Der Tiefenbereich von 5 m bis ungefähr 15 m konnte mit dem oberflächennahen Aquifer identifiziert werden. Darüber hinaus ergibt sich eine Abnahme der Leitfähigkeitswerte mit dem Abstand von der Mülldeponie und den Abwasserauslässen.

Durch die Anwendung einer 2D Joint Inversion konnten die Datensätze beider Methoden durch einheitliche Untergrundmodelle angepasst werden.

Einleitung

Roorkee befindet sich in den Vorläufern des Himalaja am rechten Ufer des Solani Flusses im Distrikt Haridwar des nordindischen Staates Uttharakand (Geographische Breite: 29°50' bis 29°56' N, Geographische Länge: 77°48' bis 77°56' E). Der Solani ist ein Nebenfluss des Ganges. Der Ganges ist in dem Gebiet kanalisiert und teilt Roorkee in „Old“- und „New“-Roorkee. Die Stadt hat ca. 100000 Einwohner, mit einer jedoch wachsenden Bevölkerung. Die Region ist stark landwirtschaftlich geprägt, wobei sich dort vermehrt Industrie entwickelt.

Die Untersuchungen fanden in Zusammenarbeit mit dem Indian Institute of Technology in Roorkee/Nordindien (IIT-Roorkee) im Rahmen eines deutsch-indischen Partnerprojektes statt. Das Hauptanliegen dieses Projektes besteht in der Anwendung geophysikalischer Methoden zur Abschätzung der Gefährdung der Aquifersysteme der Region um Roorkee.

In der landwirtschaftlich geprägten Region um Roorkee ist der Einsatz von Düngemittel sowie die Bewässerung der Felder mit Abwasser gängige Praxis, wobei das Abwasser durch offene, teilweise nicht befestigte, Kanäle transportiert wird. Gleichzeitig bezieht die umliegende Landbevölkerung ihr Frischwasser oftmals aus Brunnen, die aus oberflächennahen Aquiferen gespeist werden. Eine Gefährdung dieser oberflächennahen Aquifersysteme durch den praktizierten Umgang mit Abwasser und Düngemittel ist nicht auszuschließen.

Ein weiteres Risiko geht von Mülldeponien aus, die

zu Grundwasserkontamination in deren unmittelbaren Umgebung führen können und deren schädlicher Einfluss auf die Aquifersysteme der Region ebenfalls nicht auszuschließen ist. Die Grundwasserproblematik wird, durch den Frischwasserbedarf der zunehmenden Bevölkerung und der wachsenden Industrie, verschärft.

Geophysikalische Erkundungsmethoden haben sich in ihrer Anwendung auf hydrogeologische Fragestellungen, sowie zur Untersuchung von Altlasten mehrfach bewährt ([Tezkan, 1999], [Recher, 2002] und [Seher, 2005]). Insbesondere eignet sich die Kombination von DC und RMT, da sich beide Methoden in ihrem Erkundungstiefenbereich und ihrer Sensitivität gegenüber leitfähigen Strukturen ergänzen.

Im Rahmen des Projektes wurde das umliegende Gebiet einer Mülldeponie nahe dem Dorf Saliyar mit diesen Methoden profilweise vermessen. Seit 1975 wird dieses Gebiet zur landwirtschaftlichen Nutzung an Kleinbauern verpachtet und intensiv mit Abwasser bewässert, welches von Roorkee durch Rohrleitungen auf die Felder transportiert wird.

In Abbildung 1 ist eine Übersichtskarte der Region dargestellt. Das Messgebiet bei Saliyar befindet sich ca. 6 km nordwestlich von Roorkee auf der rechten Uferseite des Solani. Das ungeklärte Abwasser der Stadt wird von der Mahingram Pumpstation über eine Kanalleitung zur Mülldeponie geleitet. Das vermessene Referenzgebiet befindet sich auf der linken Uferseite des Solani und ist ca 10 km von Saliyar entfernt. Das ganze Gelände hat ein leichtes Gefälle in Richtung Südosten.

Der Einfluss von Abwassernutzung auf die Grund-

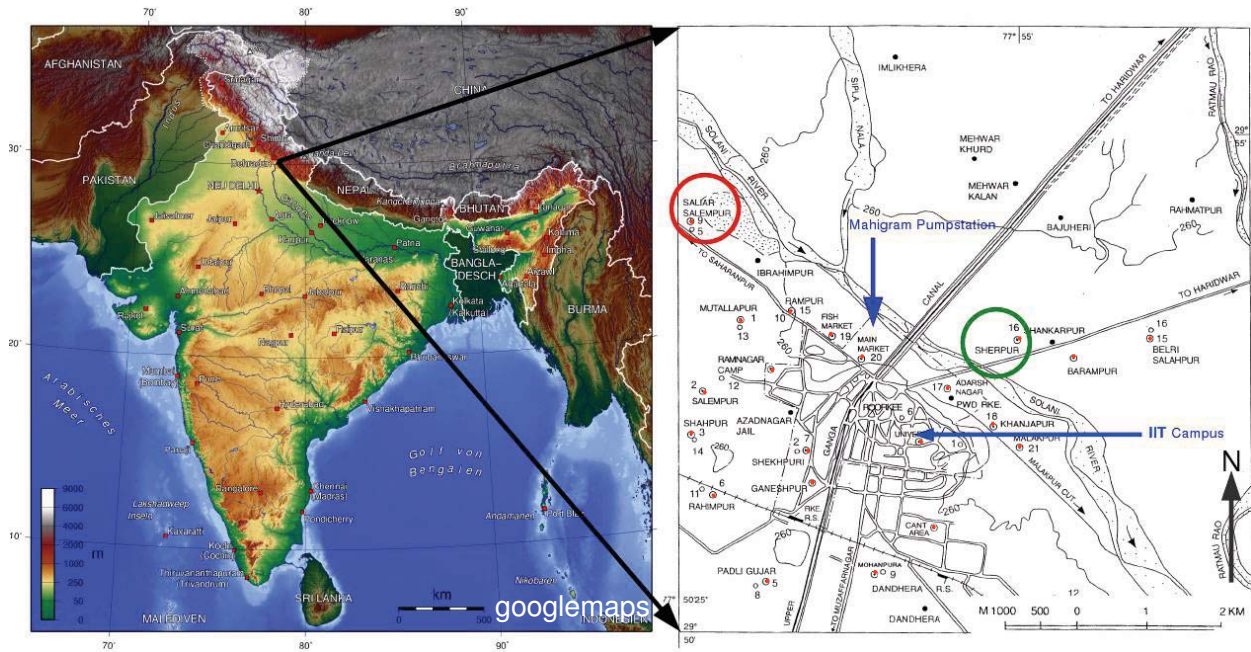


Abbildung 1: Übersicht der Region um Roorkee. Das Messgebiet Saliyar ist rot, das Referenzgebiet grün umrandet. Weitere wichtige Plätze sind farblich hervorgehoben und beschriftet. Brunnen, die überwacht und untersucht wurden sind als weiße Kringel mit roten Punkten dargestellt (Rechte Abbildung: [Singhal et al., 2003]).

wasserqualität wurde bisher überwiegend unter Berücksichtigung von hydrochemischen Daten untersucht. Die chemischen und bakteriellen Analysen des Grundwassers zeigen bisher nur erhöhte Werte für die Proben aus der unmittelbaren Umgebung von Saliyar, wo sich die Mülldeponie befindet. Singhal et al. [2003] schließen eine Gefährdung der Aquifersysteme weiter flussabwärts in Richtung Roorkee auf Grund der angenommenen Grundwasserfließrichtung. Sudha et al. [2010] haben bereits in den Gebieten nördlich von Roorkee, in Saliyar und in Khanjapur, eine Vielzahl von DC-Profilen und „Time Domain Electromagnetic“ (TEM) Stationen vermessen, um den Einfluss des Abwassers auf das oberflächennahe Aquifer zu detektieren und die Ausmaße des kontaminierten Bereichs zu bestimmen.

Ziel dieser Arbeit ist es ebenfalls, den Einfluss der Kontamination auf die Leitfähigkeitsverteilung der oberen 20 – 25 m zu bestimmen. Hierzu wurden die auf dem kontaminierten Gebiet vermessenen Profile mit dem Referenzprofil verglichen, auf dem keine Kontamination erwartet wird. Durch die Vielzahl der vermessenen Profile soll auch eine Aussage über die laterale Verbreitung des kontaminierten Bereichs, sowie die Ausbreitung von Kontaminationsfahnen getroffen werden.

Zusätzlich wurden die Datensätze beider Methoden mittels des 2D Joint Inversionsprogrammes RMTDC2D von Candansayar und Tezkan [2008] einzeln und gemeinsam invertiert. Es soll dabei untersucht werden, inwiefern die Anwendung der 2D Joint Inversion verlässlichere und einheitlichere Untergrundmodelle zu liefern vermag.

Geologie des Messgebiet

Der indische Subkontinent lässt sich geologisch in drei Bereiche unterteilen: den Himalaja im Norden, die Gangesebene und die indische Halbinsel im Süden. Die Gangesebene stellt dabei das Entwässerungsbecken der großen indischen Flüsse Ganges, Indus, Brahmaputra und Yamuna dar. Das Messgebiet befindet sich im nördlichen Teil der Gangesebene (Abbildung 1). Da es sich um Schwemmland des Ganges und des Solani handelt, weist der Boden überwiegend ungehärtete alluviale Sedimente jüngeren Alters mit einer einfachen eindimensionalen Schichtung auf. Diese Sedimente bestehen aus abwechselnden Schichten von Ton, Sand, Kunkur und in manchen Gebieten Kies, wobei Kunkur ein nodulares Kalziumkarbonat ist, welches sich häufig in Semi-ariden Regionen bildet. Lithologische Diagramme bei [Singhal et al.,

Bohrlochinformation	DC Ergebnisse	
	z (m)	ρ (Ω m) z (m)
Lithologie	z (m)	ρ (Ω m) z (m)
Sandiger Lehm	0-4	>100 0-7
Sand	4-32	40-100 7-38
Ton + Kies	32-45	30-50 38-45
Sand	45-105	— —

Tabelle 1: Bohrlochinformationen verglichen mit den DC Ergebnissen in Sherpur von Sudha et al. [2010].

2003] zeigen eine oberflächennahe Schicht aus sehr feinem bis sandigem Lehm von 3 – 6 m Mächtigkeit. Die darunterliegende Sandschicht in 3 – 27 m Tiefe bezeichnet den ersten unbegrenzten, oberflächennahen Aquifer. Darunter befindet sich eine nichtpermeable Ton-Kies-Schicht von ca. 13 m Mächtigkeit

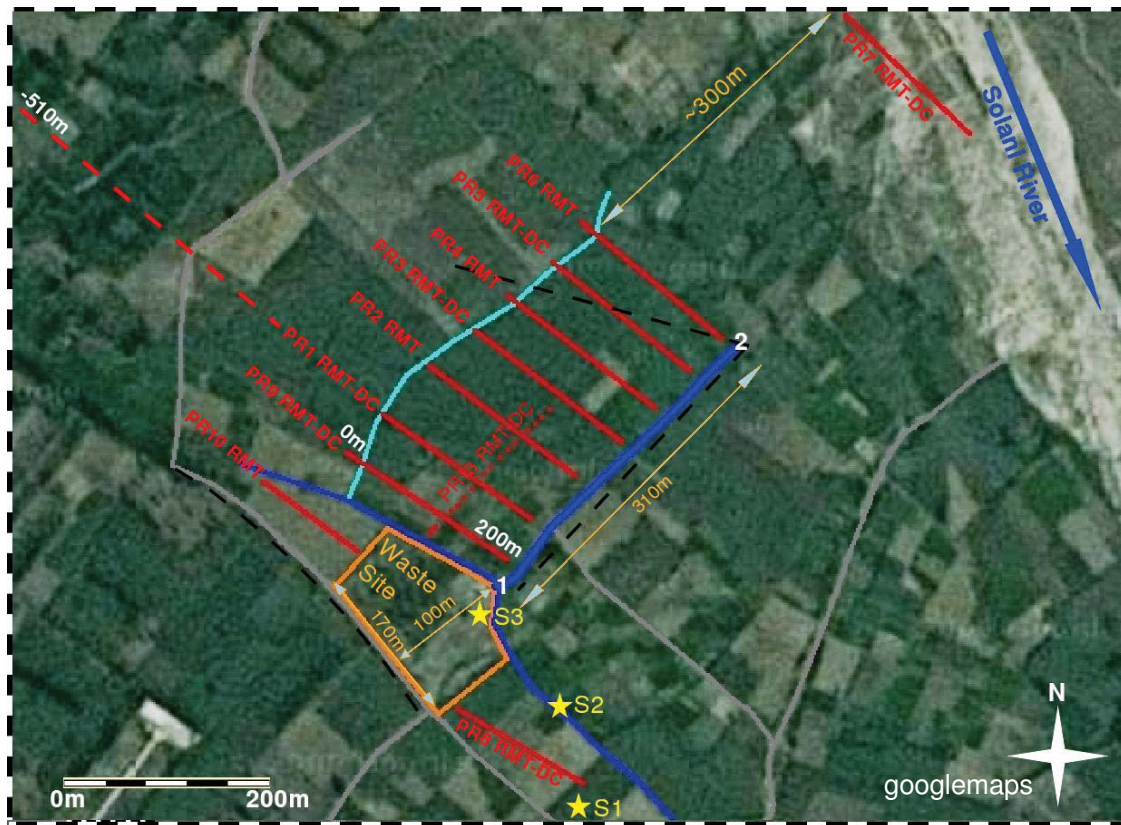


Abbildung 2: Die vermessenen Profile sind rot dargestellt und tragen die Bezeichnung der Profilvernummer (PR1 bis PR13) sowie den Zusatz RMT oder RMT-DC, je nachdem ob nur RMT oder zusätzlich DC gemessen wurde. (Ab-)Wasserkanäle sind blau und Hochspannungsleitungen schwarz gestrichelt dargestellt. Der Hauptabwasserkanal verläuft von 1 nach 2. Auslässe für das Abwasser befinden sich entlang des Hauptabwasserkanals ca. alle 50m. An den Orten S1, S2 und S3 wurden Wasserproben entnommen.

und trennt den oberen Grundwasserleiter von dem tieferen, der überwiegend aus Sand und Kies besteht. In der Tabelle 1 sind die DC-Inversionsergebnisse von *Sudha et al.* [2010] mit den Bohrlochdaten verglichen. Die Bohrlochdaten wurden von einem Litholog auf dem Referenzprofil bei Sherpur abgeleitet und zeigen gute Übereinstimmung mit den DC-Ergebnissen.

Messung bei Roorkee

Insgesamt wurden 13 RMT und 8 DC Profile bei einer zweiwöchigen Kampagne im Februar 2009 vermessen (Abbildung 2). Zu dieser Jahreszeit war das Messgebiet nur teilweise kultiviert und daher gut zugänglich. Die Profile sind, ausgehend von der Mülldeponie am südlichen Bildrand bis zum Flussbett des Solani, überwiegend parallel angeordnet. Der Abstand der Profile betrug ca. 50 m, je nach verfügbarem Platz. Damit wurde eine ca. $200 \times 600 \text{ m}^2$ große Fläche abgedeckt. Das ganze Gebiet nordwestlich vom Hauptabwasserkanal hat ein leichtes Gefälle in Richtung Nordosten zum Solani hin. Die Mülldeponie im unteren Bildteil umfasst eine Fläche von $170 \times 100 \text{ m}^2$. Eine Messung direkt auf der Mülldeponie war nicht möglich, deswegen wurden Profil 8 und Profil 10 seitlich positioniert um einen etwaigen Einfluss der Mülldeponie durch z.B. Sickerwasser zu ermitteln. Der Hauptabwasserkanal verläuft von der Mülldepo-

nie nordöstlich in Richtung des Solani. Ungefähr alle 50 m befinden sich Wasserauslässe, um die Felder zu fluten. Der kleinere offene Kanal (hellblau dargestellt) im linken Bildbereich verläuft parallel zum großen und wurde von den Profilen gekreuzt. Der Bereich oberhalb von Profil 6 war stark bewachsen und konnte nicht vermessen werden. Das oberste Profil (Profil 7) verläuft im trockenen Flussbett des Solani und ist ca. 600 m von der Kontaminationsquelle entfernt, weswegen hier eine Abnahme der Kontamination zu erwarten ist. Der Bereich zwischen Profil 3 und Profil 6 war stark bewässert, konnte aber dennoch vermessen werden. Profil 1, welches im Folgenden explizit vorgestellt wird, wurde am ersten Tag mit einer Länge von 710 m und einem Stationsabstand von 10 – 50 m vermessen, um den Einfluss der Kontamination mit der Entfernung von der Quelle abzuschätzen. Die RMT-Messung wurde mit dem RMT-F Gerät der Universität zu Köln durchgeführt. Es arbeitet im erweiterten Frequenzbereich von 10 kHz bis 1 MHz und ermöglicht dadurch ein verbessertes Auflösungsvermögen oberflächennaher Schichten [Wiebe, 2007]. Der Messpunktabstand für die RMT-Stationen betrug bei allen anderen Profilen 10 m und die Anzahl in der Regel 21 Stationen. Gemessen wurden beide horizontalen Komponenten des elektrischen und des magnetischen Feldes zur Bestimmung der spezifischen Widerstands- und Phasenwerte der TE- und

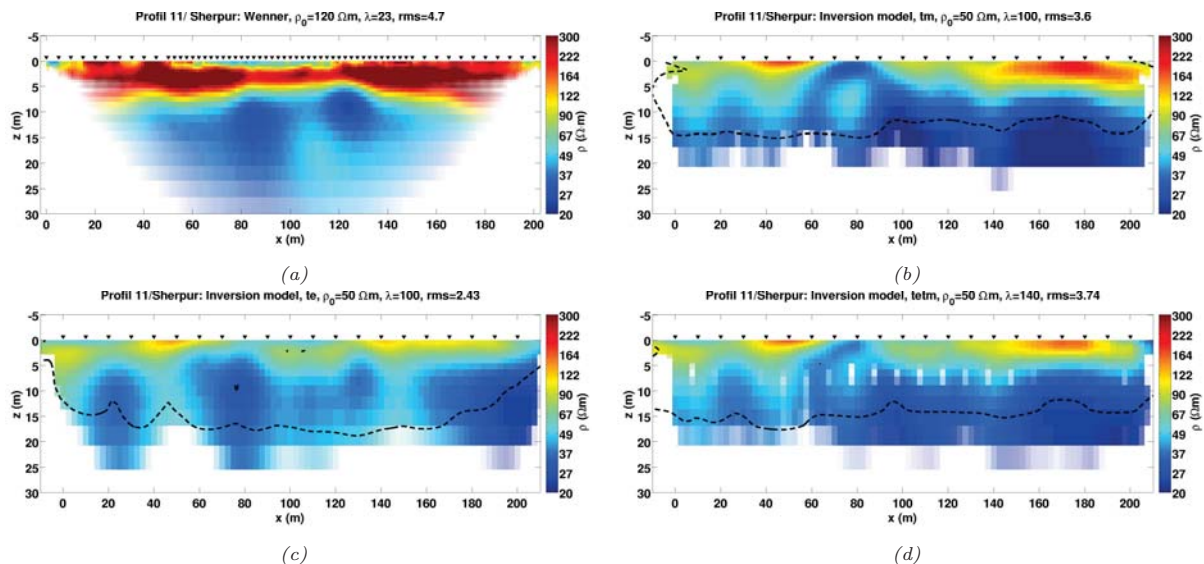


Abbildung 3: Inversionsmodelle des Referenzprofils 11 bei Sherpur der Daten der Wennerauslage (a), der Daten der TM-Mode (b), der der TE-Mode (c), sowie beider Datensätze (TE+TM) gemeinsam invertiert (d). Die RMT Stationen sind als schwarze Dreiecke dargestellt. Die 0.2 Isolinie des DOI ist als schwarz gestrichelte Linie geplottet und stellt die maximale Erkundungstiefe dar.

der TM-Mode. Für die DC wurde eine ABEM Terparameter SAS 1000 benutzt. Als Messauslage wurde eine Wenner und eine Schlumberger „Short-Long“-Auslage gewählt. Durch den geringeren Elektrodenabstand im mittleren Bereich der Auslage ist eine oberflächennah bessere Auflösung gewährleistet.

Eine geologische Streichrichtung zur Ausrichtung der Profile lässt sich anhand der Kontaminationsausbreitung nur ungenügend festlegen. Zu erwarten wäre eine Ausbreitung der Kontamination von den Abwasserauslässen Richtung Nordwesten oder auch eine Verbreitung der Kontamination von der Mülldeponie ausgehend.

Demzufolge und in Anbetracht der nahezu eindimensionalen Struktur des Untergrundes wurden die Profile anhand der verfügbaren Sender für die RMT und der Verfügbarkeit von Platz ausgerichtet.

Inversionsergebnisse Referenzprofils 11 bei Sherpur

In den Abbildungen 3 sind die Inversionsmodelle der einzelnen 2D Inversionen für die Wennerauslage und für die RMT Daten mit DC2DINVRES [Günther, 2004] bzw. RUND2_NLCG2_FAST (RUND2) [Rodi und Mackie, 2001] dargestellt. Die nicht-sensitiven Bereiche sind in den Inversionsergebnissen ausgeblendet und der „Depth Of Investigation“-Index (DOI) nach Oldenburg und Li [1998] ist zur Abschätzung der maximalen Erkundungstiefe in den RMT-Modellen dargestellt.

Das DC Inversionsergebnis zeigt wie erwartet eine hochohmige Deckschicht mit einem spezifischen Widerstand von $\rho > 200 \Omega\text{m}$ und einer Mächtigkeit von 5 – 7 m, welche als sandige Lehmschicht identifiziert werden kann. Im Bereich von 0 – 60 m war das Profil sehr trocken, da dieser Bereich nicht als landwirtschaftliche Nutzfläche diente. Der Bereich von 60-

120 m war kultiviert und wurde wahrscheinlich regelmäßig künstlich bewässert, wodurch sich der erniedrigte Widerstand der Deckschicht bis zu einer Tiefe von ungefähr 2 m erklären lässt. Der Bereich danach zeigt wieder eine durchgehende hochohmige Deckschicht, obwohl dieser ebenfalls kultiviert war.

Entsprechend den lithologischen Informationen aus Tabelle 1 und den DC Ergebnissen von Sudha et al. [2010] zeigt das Inversionsmodell unter der Deckschicht eine leitfähige Schicht mit einem spezifischen Widerstand von 30 – 50 Ωm , welches das oberflächennahe Aquifer, also eine wassergesättigte Sandschicht, darstellt und als die aufzulösende Zielstruktur aufgefasst wird.

Die Inversionsmodelle der Daten der TM-Mode, der TE- Mode und der Joint Inversion beider Datensätze zeigen qualitativ eine identische Leitfähigkeitsstruktur. Auch die Abnahme des Widerstands im mittleren Teil des Profils ist identisch zum DC Inversionsmodell.

Die hochohmige Deckschicht wird allerdings mit einem spezifischen Widerstand von 100 – 200 Ωm rekonstruiert, welcher verglichen mit dem DC-Ergebnis zu gering ist. Die darunterliegende Zielstruktur wird wiederum mit einem spezifischen Widerstand von 20 – 40 Ωm aufgelöst und ist vergleichbar mit dem DC-Ergebnis. Zusätzlich wurde ein zweites RMT Profil in ca. 200 m Entfernung von Profil 11 vermessen. Die geologische Struktur ist hier identisch und der spezifische Widerstand der Zielstruktur wird ebenfalls mit einem Wert von 20 – 40 Ωm gut aufgelöst Yogeshwar [2010].

Eine Erklärung für den verminderten Widerstand der Deckschicht ist die geringe Sensitivität der RMT für hochohmige Bereiche. Desweiteren könnte ein statischer Versatz der ρ_a -Daten den geringen Widerstand der Deckschicht erklären. Oberflächennahe Inhomogenitäten in der Nähe der Empfängerelektroden kön-

nen z.B. einen zusätzlichen Versatz auf die ρ_a -Daten bewirken.

Die Unterkante des Aquifers wird in den Inversionsmodellen nicht aufgelöst. Zum einen hängt das mit der maximalen Erkundungstiefe zusammen, zum anderen ergibt sich wahrscheinlich kein entscheidender Leitfähigkeitskontrast zwischen dem oberflächennahen Aquifer und der darunterliegenden nicht-permeablen Ton-Kies-Schicht, deren spezifischer Widerstand ebenfalls ungefähr 40 – 50 Ωm beträgt.

Um die maximale Erkundungstiefe abzuschätzen wurde der DOI nach *Oldenburg und Li* [1998] berechnet. Für die Wennerauslage ergibt sich bei [Yogeshwar, 2010] eine maximale Erkundungstiefe von 20 m bis 25 m für den mittleren Bereich des Profils.

Für die RMT-Modelle ist der DOI als schwarz gestrichelte Linie in den Modellen dargestellt. Für das Inversionsmodell der Daten der TM-Mode ist die Erkundungstiefe ungefähr 15 – 20 m, wobei im Bereich von $x = 100 - 200$ m der DOI, auf Grund der erhöhten Leitfähigkeit, etwas abnimmt. Für die beiden anderen RMT-Inversionsmodelle in Abbildung 3 ergibt sich eine ähnliche Erkundungstiefe von ca. 15 m.

Inversionsergebnisse des kontaminierten Profils 1 bei Saliyar

Das Profil 1 befindet sich in ca 100 m Entfernung zur Mülldeponie und wurde am ersten Messtag vermessen (Abbildung 2). Es war nicht bewässert und kaum kultiviert. Benutzt wurde eine Wenner Long-Auslage mit einer Länge von 120 m, im Gegensatz zu den anderen DC Profilen, die ausschließlich eine Profillänge von 200 m haben. Das RMT-Profil wurde bis zu einer Entfernung von 710 m vom Hauptabwasserkanal (Abbildung 2) fortgesetzt um den Einfluss der Kontamination mit dem Abstand zur Quelle zu bestimmen, wobei der Stationsabstand im Bereich von $x = 0 - 200$ m zehn Meter betrug und dann bis zu 50 m vergrößert wurde. Ausgewertet wurden nur die Daten der TE-Mode, da die der TM-Mode viele Senderlücken und teilweise negative Phasenwerte aufwiesen.

In den Abbildungen 4(a) und 4(b) sind die Inversionsmodelle der einzelnen 2D Inversionen für die Wennerauslage und für die Daten der TE- Mode dargestellt. Das DC-Modell zeigt eine einfache, eindimensionale geologische Schichtung, wobei die Deckschicht im Vergleich zum Referenzprofil in Abbildung 3 wesentlich weniger mächtig ist und einen geringeren Widerstand von ca. 30 Ωm aufweist. Eine mögliche Ursache für die insgesamt weniger hochohmige Deckschicht mit ca. 2-3 m Mächtigkeit ist wahrscheinlich die sonst häufige Bewässerung mit Abwasser. Im rechten Bereich nahe des Hauptabwasserkanals befindet sich ein hochohmiger Bereich der Deckschicht, welcher von einer Erdaufschüttung herrühren könnte, und der in dem RMT Inversionsmodell identisch rekonstruiert ist. Darunter folgt das kontaminierte Aquifer, bzw., verglichen mit dem Ergebnis für das Referenzprofil, ein Bereich stark erhöhter Leitfähigkeit bis zu einer Tiefe von ungefähr 12 m. Dies ist im RMT-

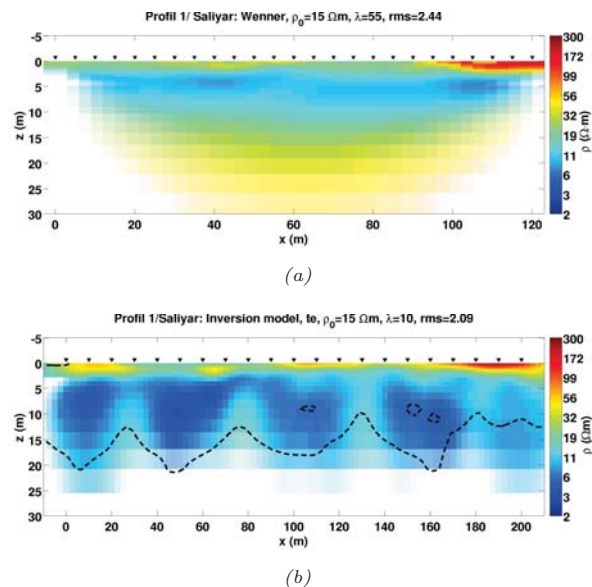


Abbildung 4: Inversionsergebnis des Profils 1 bei Saliyar der Daten der Wennerauslage (a) und der Daten der TE-Mode (b). Die RMT Stationen sind als schwarze Dreiecke dargestellt, der DOI als schwarz gestrichelte Linie.

Profil ebenfalls identisch wiedergegeben. Der spezifische Widerstand fällt im DC-Modell mit 6 – 15 Ωm etwas höher aus als der des RMT-Modells. Die Anpassung beider Datensätze ist mit einem $RMS < 2.5$ gut.

Die maximale Erkundungstiefe für das DC-Modell ergibt sich mit dem DOI-Index bei *Yogeshwar* [2010] zu 15 – 20 m im mittleren Bereich des Profils. Die schwarze Linie in Abbildung 4 stellt die maximale Erkundungstiefe von 10 – 15 m für das RMT-Modell dar. Mit dieser Erkundungstiefe für die RMT wird die Unterkante des kontaminierten Bereichs nur mit der DC aufgelöst.

Auf den vermessenen Profilen in Saliyar wurde mit dem Programm EMUPLUS [Wiebe, 2007] eine 1D RMT-DC und eine 1D RMT-DC Joint Inversion im jeweiligen Mittelpunkt des Profils durchgeführt um die Leitfähigkeit des kontaminierten Aquifers genauer zu bestimmen. Die 1D Marquardt Inversionen für Profil 1 (Abbildung 5) entsprechen sehr gut den 2D Ergebnissen im Mittelpunkt des Profils. Das Modell der Geoelektrik zeigt einen Dreischichtfall mit gut aufgelösten Schichtgrenzen und spezifischen Widerständen, außer für den der obersten Schicht. Die äquivalenten Modelle in Abbildung 5 unterscheiden sich also kaum. Ebenso zeigt das Ergebnis für die RMT-Daten nahezu identische äquivalente Modelle, was auf eine gute Auflösung beider Schichten schließen lässt. Beide Inversionsergebnisse stimmen gut überein, wobei die RMT die Unterkante des Aquifers nicht auflösen kann.

Das Modell der 1D Joint Inversion passt die Datensätze beider Methoden mit einem RMS von 1.65 gut an und löst die Unterkante der zweiten Schicht durch Hinzunahme der DC Daten auf. Der Widerstand des

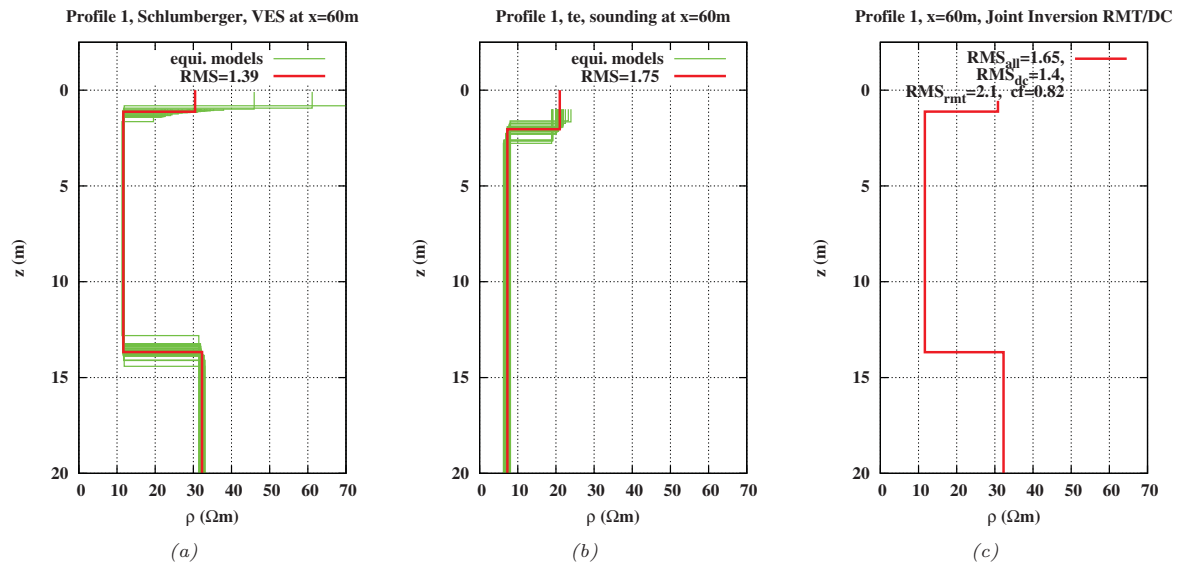


Abbildung 5: 1D Marquardt Inversionsmodelle für die Sondierungskurve der Schlumbergerauslage (a) und der Daten der TE-Mode (b), sowie der Joint Inversion beider Datensätze (c) bei $x = 60$ m in der Mitte des Profils 1 bei Saliyar. Aufgetragen ist der spezifische Widerstand gegen die Tiefe. Äquivalente Modelle sind grün und der Mittelwert der äquivalenten Modelle sind rot dargestellt.

kontaminierten Bereichs ist mit $\rho \approx 10 \Omega\text{m}$ ziemlich genau bestimmt. Da weitaus mehr DC-Daten vorhanden sind, stellt das Inversionsergebnis zwar einen Informationsgewinn für die RMT dar, entspricht aber ziemlich genau dem 1D Modell der DC Inversion. Nur oberflächennah liefern die hochfrequenten RMT-Daten Zusatzinformation zur Verbesserung der Auflösung der obersten Schicht.

2d Joint Inversion

In der Abbildung 6 sind die Inversionsmodelle der Wenner Long Auslage, der Daten der TE-Mode und das Ergebnis der 2D Joint Inversion beider Datensätze mit RMTDC2D dargestellt. Die Leitfähigkeitsstruktur der Endmodelle ist gut vergleichbar mit den Inversionsmodellen der einzelnen 2D Inversionen mit DC2DINVRES und RUND2.

Die Modelle der einzelnen Inversionen sind bis zu einer Tiefe von ungefähr 10 m gut vergleichbar, wobei die Anpassung der RMT-Daten mit einem RMS von 1.9 besser ist als die der DC-Daten. Der kontaminierte Bereich wird im RMT Inversionsmodell etwas leitfähiger rekonstruiert. Eine Aussage über die Unterkante des Aquifers lässt sich auf Grund der mangelnden Eindringtiefe der RMT nicht treffen, wohingegen die Unterkante im DC-Modell aufgelöst wird. Die 2D Joint Inversion in Abbildung 6 passt beide Datensätze mit einem RMS von 5.0 zufriedenstellend an. Die Unterkante und der Widerstand des Aquifers sind gut aufgelöst.

Die mit dem mittleren Tiefenbereich korrespondierenden DC-Daten in Abbildung 7(b) sind über die ganze Profillänge relativ gleichmäßig,

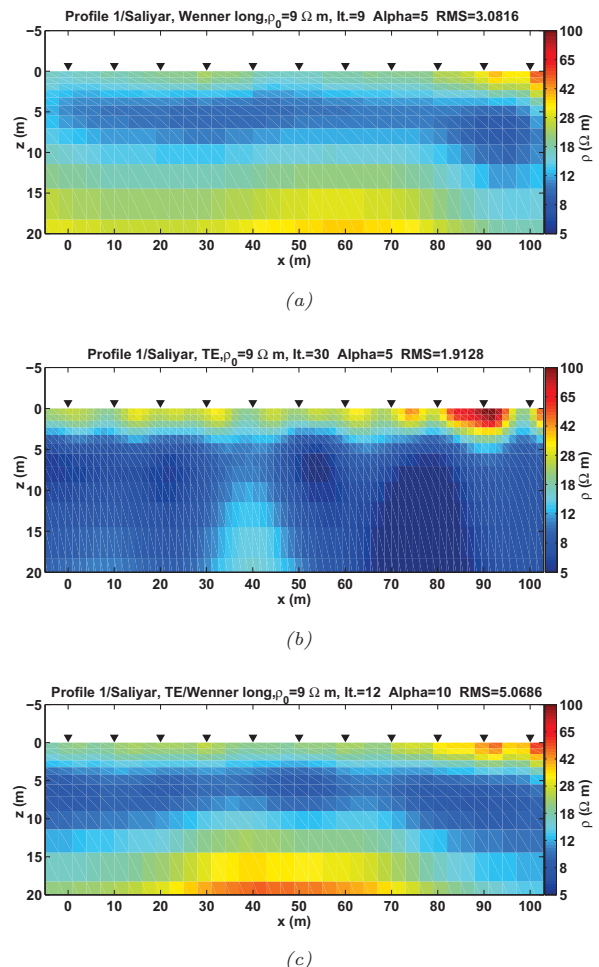


Abbildung 6: Inversionsergebnis der Wenner Long-Auslage (a), der TE-Mode (b) und der 2D Joint Inversion (c) des Profils 1. Die RMT-Stationen sind als schwarze Dreiecke dargestellt.

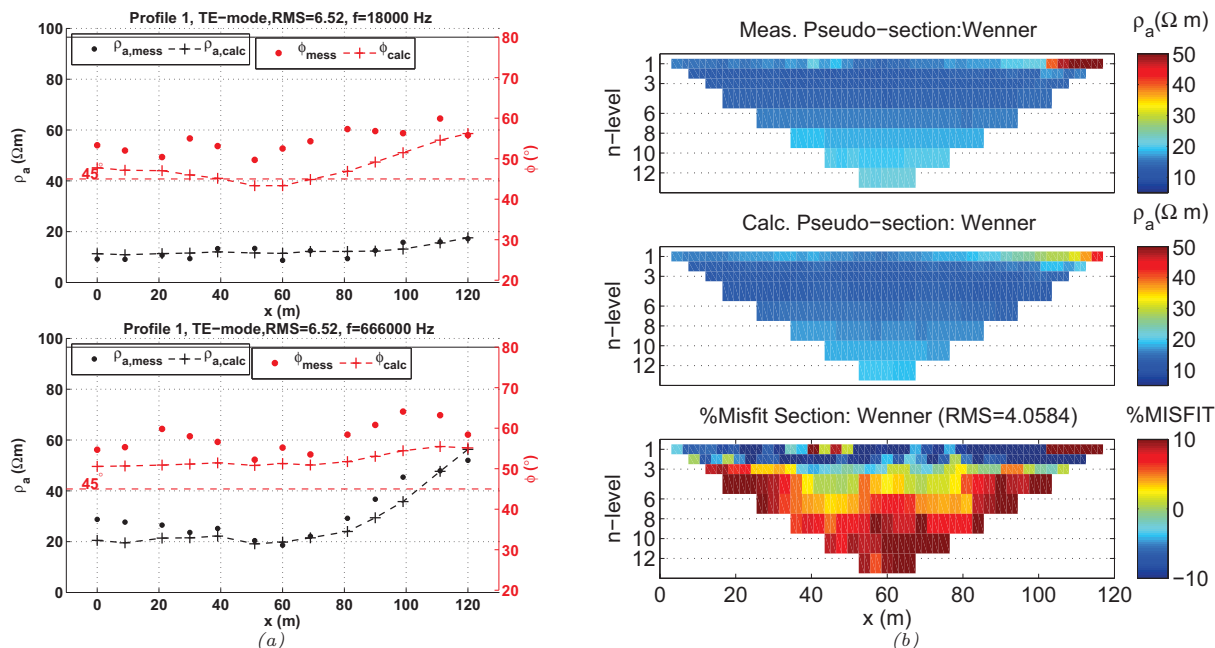


Abbildung 7: Daten und Datenanpassung der Daten der TE-Mode (a) und der Wenner Long Auslage (b) für das Ergebnis der 2D Joint Inversion mit RMTDC2D. Die gemessenen ρ_a und φ Werte sind als schwarze, bzw. rote Punkte und die Modellantwort als schwarze, bzw. rote Kreuze für $f = 18 \text{ kHz}$, 666 kHz gegen die Station aufgetragen. Die DC-Daten und die Modellantwort sind als Pseudosektionen dargestellt, wobei die untere Abbildung (b) die relative Differenz beider zeigt.

wohingegen die RMT Daten der 18 kHz Frequenz in Abbildung 7(a) und das Inversionsmodell der einzelnen 2D RMT Inversion in Abbildung 6(b) auch Bereiche erhöhter Leitfähigkeit zeigen. Bei der 2D Joint Inversion werden die RMT-Daten daher nicht so gut wie die DC-Daten angepasst. Die Modellantwort der RMT ist durch die Regularisierung und dem Einfluss der insgesamt gleichmäßigeren DC-Daten sehr glatt. Der RMS für die RMT-Daten ergibt sich zu 6.5 . Die Hinzunahme der RMT-Daten führt zu einer besseren Bestimmung der Deckschicht vor allem im etwas hochohmigeren Bereich von $x = 80 - 100 \text{ m}$. Die DC-Daten in diesem Bereich sind nicht so gut angepasst, wie in der Darstellung der relativen Differenz der Daten und der Modellantwort in Abbildung 7(b) erkennbar ist. Eine Verringerung des Glättungsparameters passt diese zwar besser an, führt allerdings zu Inversionsartefakten für die tieferen Bereiche.

Qualitativ zeigen die Auflösungsmatrizen der 2D Joint Inversion bei Yogeshwar [2010] eine verbesserte Auflösung im Vergleich zur RMT-Einzelinversion, wobei die Randbereiche im Vergleich zur DC-Einzelinversion besser aufgelöst sind, da die DC dort keine Tiefeninformation liefert. Die maximale Erkundungstiefe wird durch die DC-Daten bestimmt, weswegen keine erhöhte Sensitivität der tieferen Strukturen durch Hinzunahme der RMT-Daten erreicht wird.

Abschätzung der Kontaminationsverbreitung

Um die lateralen Ausmaße des kontaminierten Bereichs abzuschätzen, wurden insgesamt 9 parallele RMT und 5 parallele DC Profile auf einem ca $200 \times 600 \text{ m}^2$ großen Gebiet vermessen (Abbildung 2). Die

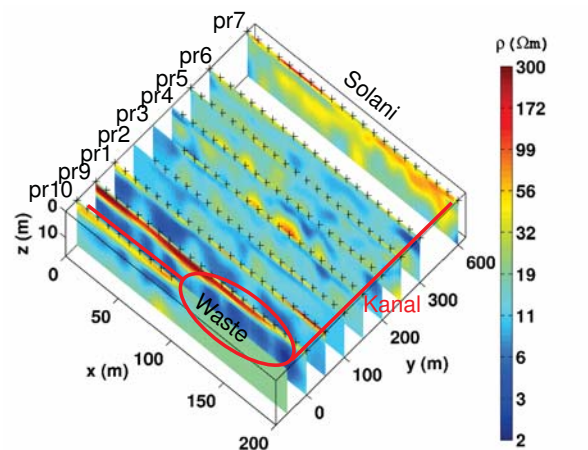


Abbildung 8: Ansicht aller RMT-Profile von der Mülldeponie bis zum Solani. Der Hauptabwasserkanal verläuft von der Mülldeponie in Richtung des Solani und ist rot dargestellt.

RMT-Profile sind in Abbildung 8 als Flächenschnitte der xz -Ebene dargestellt. Die Profile verlaufen parallel zwischen der Mülldeponie und dem Solani. Die RMT-Modelle liefern auf Grund der teilweise mäßigen Datenqualität nicht so glatte und gleichmäßige Modelle wie die DC-Modelle bei Yogeshwar [2010]. In der Darstellungen 8 ist eine leichte Abnahme der Leitfähigkeit zum Solani hin zu beobachten. Das Profil 7 am Solani in Abbildung 8 zeigt insgesamt hochohmigeren Bereiche im Inversionsmodell für die RMT. Die Inversionsergebnisse der DC-Daten sind bei Yo-

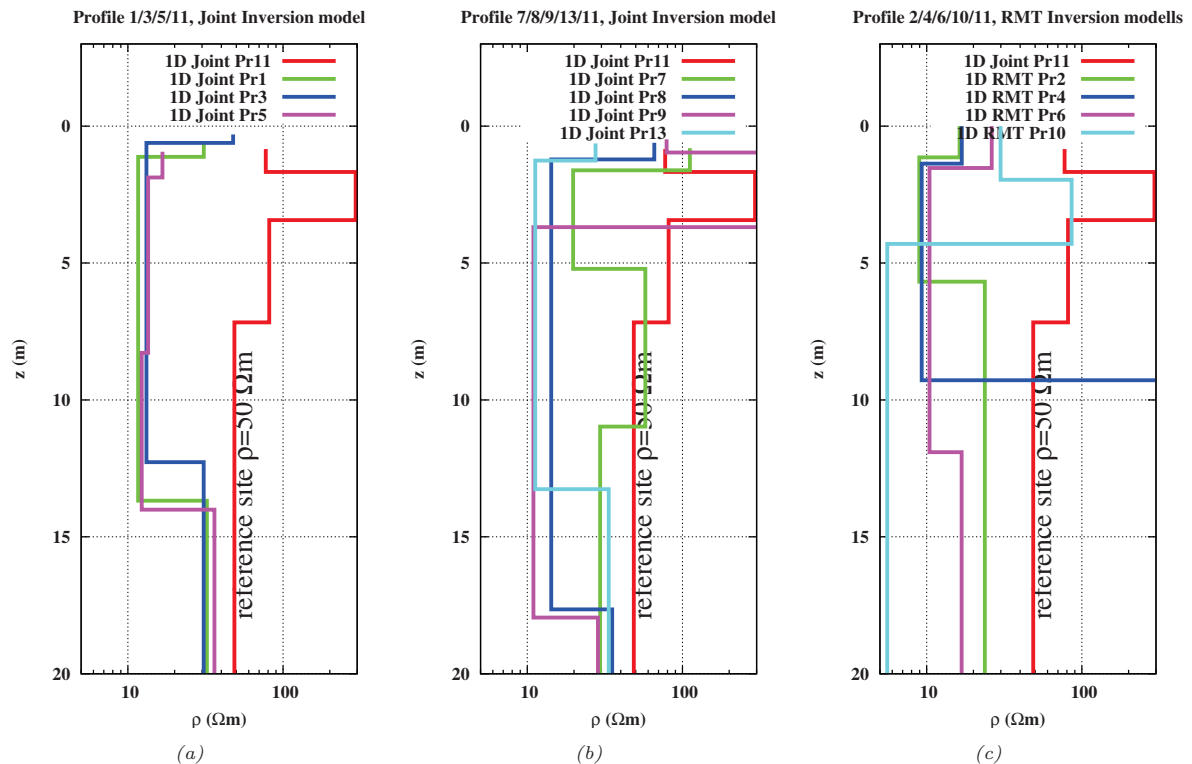


Abbildung 10: 1D Marquardt Joint Inversionsmodelle der DC- und RMT-Daten im jeweiligen Mittelpunkt der Auslage für Profil 1,3,5 (a) und Profil 7,8,9,13 (b), sowie einzelne RMT 1D Inversionsmodelle für Profil 2,4,6,10 (c). Das 1D Joint Inversionsmodell des Referenzprofils (Profil 11) ist rot dargestellt.

geshwar [2010] mit denen der RMT sehr gut vergleichbar, wobei die Unterkante des Aquifers jedoch mit der DC aufgelöst wird. Um eine genauere Vorstellung

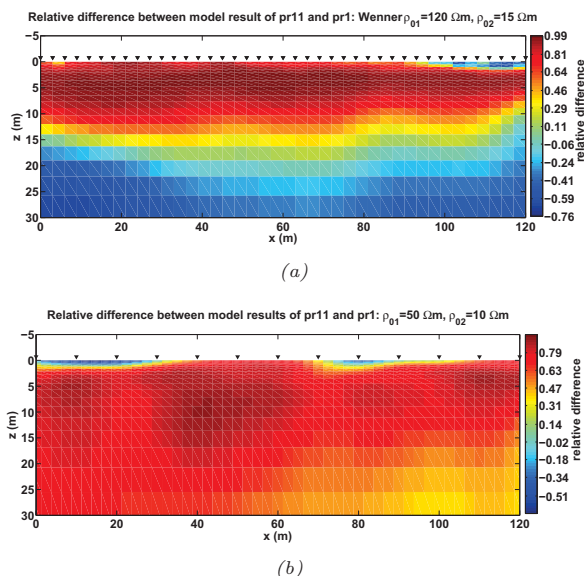


Abbildung 9: Dargestellt ist die relative Differenz der RMT- (a) und der DC-Inversionsmodelle (a) des Referenzprofils 11 und des kontaminierten Profils 1 (Relative Differenz $> 0 \Rightarrow \rho_{ref} > \rho_{pr1}$).

des Leitfähigkeitsunterschiedes zwischen dem Inversionsmodell des Referenzprofils und den Profilen auf dem kontaminierten Bereich zu erhalten, wurde für

jedes Profil die relative Differenz beider Modelle berechnet. Die relative Differenz des Profils 1 mit dem Referenzprofil 11 in Abbildung 9(a) zeigt für die Geoelektrik über die gesamte Auslagenlänge einen wesentlich geringeren spezifischen Widerstand. In einer Tiefe von ca. 15 m befindet sich die Unterkante des kontaminierten Aquifers und die Widerstände werden vergleichbar, bzw. der des Profils 1 wird größer. Für die RMT zeigt die Abbildung 9(b) ein identisches Ergebnis. Auch hier ist der spezifische Widerstand des Inversionsmodells für das Referenzprofil weitaus höher. Bei beiden Ergebnissen zeigen nur kleine oberflächennahe Bereiche der Deckschicht ein anderes Verhalten. In der Darstellung der relativen Differenz bei Yogeshwar [2010] zeigen die vermessenen Profile auf dem kontaminierten Gebiet in Saliyar im Vergleich mit dem Referenzprofil ausschließlich erhöhte Leitfähigkeitswerte bis zu einer Tiefe von ca. 15 – 20 m, bis auf das Profil 7, welches sich am Ufer des Solani befand und am weitesten von der Kontaminationsquelle entfernt war.

In Abbildung 10(a) und 10(b) sind die 1D Joint Inversionsmodelle der Daten aller Profilmittelpunkte in Saliyar mit dem des Referenzprofils verglichen. Insgesamt zeigen alle Profile unterhalb einer etwas hochohmigeren Deckschicht einen spezifischen Widerstand von $\rho \approx 10 \Omega m$ für das kontaminierte Aquifer, wiederum gefolgt von einer Schicht mit einem erhöhten spezifischen Widerstand. Das in grün geplottete Modell im rechten Teil der Abbildung 10 entstammt dem Pro-

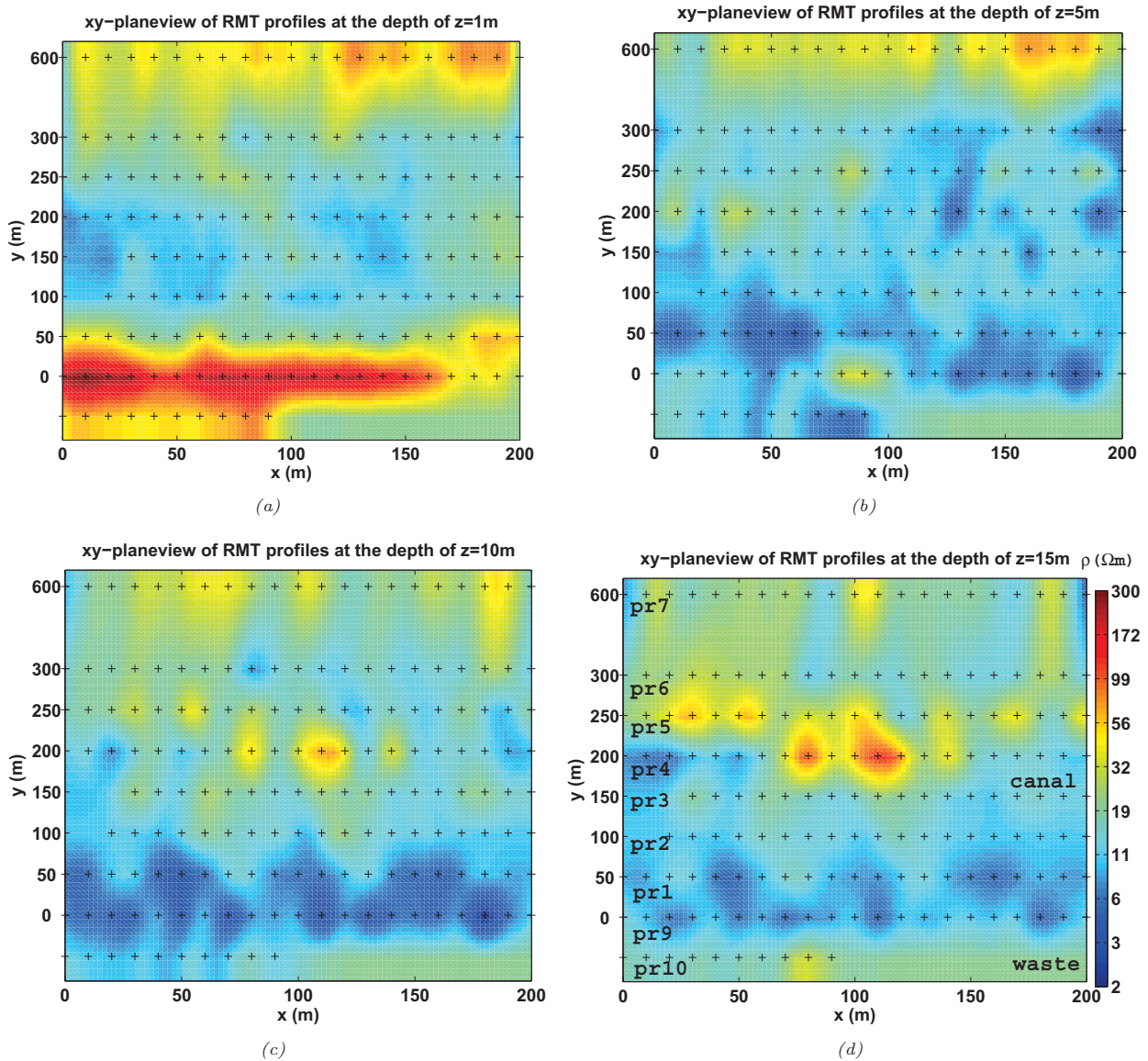


Abbildung 11: xy -Schnitte der RMT Inversionsmodelle von RUND2 für verschiedene Tiefen: 1 m (a), 5 m (b), 10 m (c) und 15 m (d). Die Kreuze bezeichnen die RMT-Stationen.

fil 7 am Solani und zeigt eine etwas andere Struktur mit höheren Widerständen, wie schon in Abbildung 8 ersichtlich war. Die Modelle der 1D RMT Inversionen in Abbildung 10(c) zeigen ebenfalls geringere spezifische Widerstände für das Aquifer. Das Ergebnis von Profil 4 in Abbildung 5(c) zeigt den Beginn einer hochohmigen Schicht in ca. 8 m Tiefe, die auch im 2D Modell der TM-Mode zu finden ist, aber nicht in dem der TE-Mode, und auf mangelnde Datenqualität oder die Streichrichtung zurückzuführen ist [Yogeswar, 2010]. Die Ergebnisse der einzelnen 2D Inversionsmodelle wurden für beide Methoden linear auf ein dreidimensionales Gitter interpoliert. Um eine Aussage über die laterale Verbreitung der Kontamination mit der Tiefe zu treffen, sind in Abbildung 11, am Beispiel der RMT, Flächenschnitte in der xy -Ebene für vier verschiedene Tiefen, $z=1\text{ m}$, 5 m , 10 m und 15 m , dargestellt.

In einer Tiefe von einem Meter erkennt einen sehr hochohmigen Bereich direkt in der Umgebung der

Mülldeponie. Das gesamte Profil 10, Profil 9 und die ersten 50 m direkt am Kanal von Profil 1 zeigen diese hochohmige Deckschicht. Dies könnte von einer Erdaufschüttung im Zusammenhang mit der Mülldeponie herrühren. Genauer ist jedoch nicht bekannt. Für $z = 5\text{ m}$ zeigt die Flächendarstellung spezifischen Widerstände um die $10\ \Omega\text{m}$ im Bereich von $y = 0\text{ m}$ bis 300 m . Die Leitfähigkeit ist in der Nähe der Mülldeponie erhöht und nimmt dann in Richtung des Solani etwas ab. Das Profil 7 am Solani ist wie bereits gesagt über den gesamten Tiefenbereich hochohmiger als die anderen Profile.

In einer Tiefe von 10 m und 15 m lässt die Kontamination etwas nach und es zeichnet sich die Unterkante des Aquifers ab, wobei der Bereich nahe der Mülldeponie im Vergleich zum Rest leitfähiger ist. Dies lässt wieder auf einen Einfluss der Mülldeponie schließen, vor allem da die Leitfähigkeit der Profile in der unmittelbaren Nähe der Deponie bis zu einer größeren Tiefe erhöht ist. So ist für Profil 9 in 15 m keine Un-

terkante des kontaminierten Aquifers erkennbar. Die DC-Ergebnisse bei *Yogeshwar* [2010] bestätigen die der RMT, wobei die Unterkante des kontaminierten Bereichs sich in 15 m wesentlich deutlicher bei den DC-Ergebnissen abzeichnet.

Eine solche flächenhafte Darstellung ist auf Grund der Interpolation zwischen den Profilen kritisch zu bewerten. Zwischen dem letzten Profil und dem Ufer des Solani lässt sich keine verlässliche Aussage treffen, da sich die Entfernung auf ca. 300 m beläuft. Problematisch sind auch Inversionsartefakte, die bei der Interpolation zwischen den Profilen überakzentuiert werden. Trotzdem eignet sich die Flächendarstellung zur Visualisierung der lateralen Leitfähigkeitsverteilung und insbesondere, um ein räumliches Bild des Untergrundes zu gewinnen.

Diskussion und Ausblick

Die Inversionsmodelle, die bei der Mülldeponie aufgenommenen Datensätze, haben in der Regel einander ähnliche Strukturen. Unterhalb einer etwas hochohmigeren Deckschicht zeigen diese, im Vergleich zu dem Inversionsmodell des Referenzprofils, Werte des spezifischen Widerstands kleiner als $10 \Omega\text{m}$ bis zu einer Tiefe von ungefähr 15 m. Dieser Bereich konnte mit dem oberflächennahen Grundwasserleiter identifiziert werden und der im Vergleich geringere Wert des spezifischen Widerstands kann auf den Einfluss des Abwassers zurückgeführt werden.

Aus der flächenhaften Darstellung der Inversionsmodelle konnte die laterale Verbreitung der Kontamination abgeleitet werden. Erkennbar ist eine Zunahme des spezifischen Widerstands mit der Entfernung von der Mülldeponie, so dass diese vermutlich auch als Kontaminationsquelle angenommen werden kann. Auch reichen die Werte verringerter spezifischer Widerstände nahe der Deponie vergleichsweise tief.

Darüber hinaus sind die spezifischen Widerstände der RMT-Inversionsmodelle in der Nähe des Hauptabwasserkanals, wo sich die Wasserauslässe befinden, ebenfalls verringert. In ungefähr 600 m Entfernung von der Mülldeponie im Flussbett des Solani sind die Werte des spezifischen Widerstands wiederum deutlich höher und vergleichbar mit denen des Referenzprofils.

Insgesamt lassen sich die Mülldeponie und das Abwasser als Kontaminationsquellen bestätigen und es kann eine Systematik der Kontaminationsverbreitung mit dem Abstand von den Quellen abgeleitet werden. Das Programm RMTDC2D [*Candansayar und Tezkan*, 2008] lieferte vergleichbare Inversionsmodelle wie die einzelnen Inversionen der Datensätze mit DC2DINVRES [*Günther*, 2004] und RUND2 [*Rodi und Mackie*, 2001]. Insbesondere die Inversionsmodelle der einzelnen Inversionen mit RMTDC2D waren den Inversionsmodellen der anderen Programmen sehr ähnlich.

Bei Inversionsmodellen, die in ihrer Struktur starke Unterschiede zeigten, war die Joint Inversion schwierig, da beide Datensätze nicht gleichzeitig anzupassen waren. Trotzdem konnte mit der Jointinversion

ein einheitliches Modell beider Datensätze gefunden werden, was eine nützliche Hilfe bei der Interpretation der Ergebnisse darstellt.

Vor allem konnte die Unterkante des kontaminierten Bereichs durch Hinzunahme der DC-Daten aufgelöst werden und gleichzeitig lieferten die RMT-Daten Zusatzinformation an den Rändern der Profile, wo mit der DC keine Tiefenaussage zu treffen möglich war. Die Joint Inversion führte unter diesem Gesichtspunkt zu verbesserten Endmodellen.

Problematisch gestaltete sich allerdings die Auswirkung des Regularisierungsparameters. Bei einem zu geringen Wert ergaben sich stark überstrukturierte Inversionsmodelle und Inversionsartefakte.

Schwierig war auch die Bewertung der Inversionsmodelle anhand der Auflösungsmatrizen. Die Auflösungsmatrizen der Joint Inversion waren mit denen der einzelnen Inversionen von RMTDC2D nicht vergleichbar und eine quantitative Aussage über das verbesserte Auflösungsvermögen der Joint Inversion konnte daher nicht getroffen werden.

Im Rahmen des DFG-DST Projektes, welches diese Arbeit ermöglicht hat, ist eine weitere Messung auf dem selben Gebiet vorgesehen. Hierbei soll die „Transient Electromagnetic“ Methode (TEM) zum Einsatz kommen. Mit dieser Methode besteht die Möglichkeit tiefer liegende Strukturen aufzulösen. Wünschenswert wäre mit dieser Methode den Einfluss der Kontamination auf den tiefer liegenden Grundwasserleiter zu untersuchen, da sich die hier vorliegende Arbeit auf die Erkundung des oberen Grundwasserleiter konzentriert hat.

Des Weiteren eignen sich die verwendeten Methoden gut für die Erkundung von kontaminierten Böden und könnten gerade in Indien vermehrt zum Einsatz kommen um damit zur Verbesserung der Grundwasserversorgung beizutragen.

Interessant wäre auch die Einbeziehung der geophysikalischen Ergebnisse in eine hydrogeologische Interpretation, um die Auswirkung der Kontamination auf größeren räumlichen und auch zeitlichen Skalen abzuschätzen.

Die 2D Joint Inversion stellt ein zusätzliches Hilfsmittel zur Interpretation von RMT- und DC-Inversionsmodellen dar. Die einzeln erhaltenen Inversionsmodelle lassen sich durch die Hinzunahme der Joint Inversionsmodelle leichter qualitativ und quantitativ bewerten. Eine weitere Anwendung dieses Programmes ist daher wünschenswert.

Literatur

Candansayar, M. und B. Tezkan, Two-dimensional joint inversion of radiomagnetotelluric and direct current resistivity data, *Geophysical Prospecting*, 56, 737–749, 2008.

Günther, T., *Inversion Methods and Resolution Analysis for the 2D/3D Reconstruction of Resistivity Structures from DC Measurements*, Dissertation, Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 2004.

- Oldenburg, D. W. und Y. Li**, Estimating the depth of investigation in DC resistivity and IP surveys, *Geophysics*, 64, 403–416, 1998.
- Recher, S.**, *Dreidimensionale Erkundung von Altlasten mit Radiomagnetotellurik - Vergleiche mit geophysikalischen, geochemischen und geologischen Analysen an Bodenproben aus Rammkernsondierungen*, Dissertation, Universität zu Köln, Institut für Geophysik und Meteorologie, 2002.
- Rodi, W. und R. L. Mackie**, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2D magnetotelluric inversion, *Geophysics*, 66, (1), 174–187, 2001.
- Seher, T.**, *Untersuchung von Feuchtböden in Ostfriesland: Gefährdungsabschätzung mit Multielektroden-Geoelektrik und Radiomagnetotellurik*, Diplomarbeit, Universität zu Köln, Institut für Geophysik und Meteorologie, 2005.
- Singhal, D., T. Roy, H. Joshi und A. Seth**, Evaluation of Groundwater Pollution in Roorkee Toen, Uttaranchal, *Journal Geological Society of India*, 62, 465–477, 2003.
- Sudha, B. Tezkan, M. Israil, D. Singhal und J. Rai**, Geoelectrical mapping of aquifer contamination: a case study from Roorkee, India, *Near Surface Geophysics*, 8, 33–42, 2010.
- Tezkan, B.**, A review of environmental applications of quasi-stationary electromagnetic techniques, *Surveys in Geophysics*, 20, 279–308, 1999.
- Wiebe, H.**, *1D-Joint-Inversion von Geoelektrik und Radiomagnetotellurik*, Diplomarbeit, Universität zu Köln, Institut für Geophysik und Meteorologie, 2007.
- Yogeshwar, P.**, *Grundwasserkontamination bei Roorkee/Indien: 2D Joint Inversion von Radiomagnetotellurik und Gleichstromgeoelektrik Daten*, Diplomarbeit, Universität zu Köln, Institut für Geophysik und Meteorologie, 2010.