

# Geophysikalische Hohlräumerkundung 2D-Geoelektrik, Georadar, Mikrogravimetrie

Bensberg, Industrieweg

**Auftraggeber:** Rheinisch-Bergischer Kreis  
Der Landrat  
Abteilung Wasser- und Abfallwirtschaft,  
Umweltvorsorge  
Am Rübezahlwald 7  
51469 Bergisch-Gladbach

**Ansprechpartner:** Herr T. Krämer  
Tel.: 02202 - 132720  
Email: Thomas.Kraemer@rbk-online.de

**Auftragnehmer:** **geoFact GmbH**  
Reichsstraße 19 b  
53125 Bonn  
Tel.: ++49 (0) 228 - 25 71 02  
oder 0700 - geofacts  
Fax.: ++49 (0) 228 - 925 83 16  
geofact@t-online.de  
www.geofact.de

**Ansprechpartner:**  
Dr. Heinrich Krummel, Dr. Markus Janik

**Feldarbeiten:** Dr. Heinrich Krummel, Dipl.-Geophys. Sascha Frömmel, Dipl.-Geophys Heiko Wiebe

**Bericht:** Dr. M. Janik, Dipl.-Geophys. Sascha Frömmel

**Ort und Datum:** Bonn, 13.07.2009

**Seiten:** 19  
**Abbildungen:** 1  
**Tabellen:** 4  
**Anlagen:** 6

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Auftrag und Aufgabenstellung .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Methodenwahl / Ausrüstung .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Durchführung der Messungen .....</b>	<b>6</b>
3.1	Geoelektrikprofile .....	7
3.2	Georadarprofile.....	8
<b>4</b>	<b>Datenbearbeitung und Interpretation .....</b>	<b>9</b>
4.1	Datenbearbeitung und Auswertung 2D-Geoelektrik .....	9
4.2	Datenaufbereitung und Auswertung Georadar .....	10
4.3	Ergebnis von Geoelektrik und Gravimetrie im Messfeld 1.....	10
4.4	Ergebnis von Georadar und Gravimetrie im Messfeld 2 .....	13
4.5	Geoelektrik und Georadar HOPEG Rückseite .....	13
4.6	Geoelektrikprofile 8 und 9 .....	14
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>Anlagenverzeichnis.....</b>	<b>16</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>17</b>
A	Prinzip der 2D Geoelektrik.....	17
B	Prinzip des Georadar.....	19

# Geophysikalische Hohlräumerkundung

## 2D-Geoelektrik, Georadar, Mikrogravimetrie

Bensberg, Industriefweg

### 1 Auftrag und Aufgabenstellung

Die Firma geoFact GmbH, Bonn (Auftragnehmer, AN) wurde vom Rheinisch-Bergischen Kreis (Auftraggeber, AG) beauftragt, 2D-Geoelektrik, sowie zwei mikrogravimetrische Messungen auf mehreren Grundstücken im Bereich des Industriefweges in Bensberg durchzuführen. Der Auftrag erfolgte schriftlich am 25. Mai 2009 auf Basis des Angebots vom 20. März 2009. Die Mikrogravimetrie wurde von der Firma GGL GmbH durchgeführt. Der Bericht der Firma GGL ist als **Anlage 2** Bestandteil des vorliegenden Berichts.

Im Untersuchungsgebiet werden seit einiger Zeit zahlreiche kleine Erdfälle und dazu an vielen Stellen spontane Wasseraustritte beobachtet. Die beauftragten Untersuchungen sollen zum einen dazu beitragen, die Ursache dieser Ereignisse zu ergründen. Zum anderen soll geprüft werden, ob mit Hilfe der geophysikalischen Untersuchungen mögliche Gefahrenbereiche kartiert werden können, in denen mit Erdfällen zu rechnen ist. Somit ist das Ziel der Untersuchungen, potentielle Hohlräume bzw. Auflockerungen zu finden, die zu baulichen Gefährdungen führen können. Ferneres Ziel ist eine räumliche Eingrenzung des Wasserweges im Untergrund.

Die folgende **Abb. 1** zeigt Fotos vom Untersuchungsgebiet. Man erkennt Straßenschäden und Ausfällungen an den Stellen der spontanen Wasseraustritte.



Abb.1: Fotos aus dem Messgebiet; Erdfälle und Wasseraustritte

**Anlage 1** zeigt einen Lageplan des Untersuchungsgebietes, in dem die Messprofile und Messflächen markiert sind. Die unterschiedlichen geophysikalischen Methoden, die zum Einsatz kamen, sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet. Die Vorgabe des Auftrages wurde den örtlichen Begebenheiten angepasst und teilweise modifiziert, im Sinne eines besseren Resultates, wobei das geforderte Auftragsvolumen im Blick gehalten wurde. Insgesamt wurden neun Geoelektrikprofile (grün), zwei Messflächen der Gravimetrie mit insgesamt 336 Messpunkten (blau), sowie sieben Georadarprofile (braun) vermessen. Die Radarprofile wurden anstelle der Geoelektrik im Messfeld 2 gewählt, auf die Gründe wird noch gesondert eingegangen. Der Lageplan wurde auf Grundlage der Hydrologischen Karte von NRW erstellt. Zur besseren Orientierung wurde ein Luftbild von Google Earth hinterlegt, wobei leichte Abweichungen aufgrund perspektivischer Verzerrungen (Parallaxe) zu beachten sind.

Zur Bewertung der geophysikalischen Untersuchungen wurde vom AG ein hydrogeologisches Gutachten von Prof. Dr. H. Losen (November 2008) zur Verfügung gestellt.

## 2 Methodenwahl / Ausrüstung

Die Gravimetrie wurde auf der Brachfläche eines ehemaligen Firmengebäudes (Feld 1), sowie auf dem Parkplatz der Firma HOPEG (Feld 2) durchgeführt. Zur Durchführung der Messungen und zu den Ergebnissen wird auf den Bericht der Firma GGL im **Anlage 2** verwiesen. Die Vermessung zur Lage der Gravimetriemesspunkte erfolgte durch die Firma geoFact GmbH mit Hilfe elektro-optischer Tachymetrie. Da keine topografischen Festpunkte vorhanden waren, an denen ein Bezug zum staatlichen Koordinatennetz hergestellt werden konnte, wurde ein lokales Koordinatensystem in der Einheit Meter [m] errichtet, das zur Übersicht in **Anlage 1** festgehalten wurde.

Zur erweiterten Untersuchung des Baugebietes im und um das Messfeld 1 der Gravimetrie wurde die 2D-Geoelektrik eingesetzt. Des Weiteren untersuchen die Geoelektrikprofile 7, 8 und 9 Leitfähigkeitsverteilungen im Bereich des Industrieweges (siehe **Anlage 1**). Eine Beschreibung des Messverfahrens der Geoelektrik befindet sich im **Anhang A.1**.

Das Messfeld 2 der Gravimetrie wurde mit 5 Georadarprofilen sondiert, anstelle der ursprünglich geplanten Geoelektrik. Hierbei kam sowohl eine 400 MHz als auch eine 200 MHz Antenne zum Einsatz, da so unterschiedliche Tiefen aufgelöst werden können. Das Verfahren des Georadar wird in **Anhang A.2** beschrieben.

**Tab. 1** gibt eine Übersicht über eingesetztes Gerät und Personal.

**Tab. 1:** Messgeräte und PersonalVermessung:

Leica TC 307

2 Personen

Gravimetrie

Gravimeter CG-5, Autograv, Nr. 149 (Scintrex Ltd., Kanada)

Zweischleifenmessung

1 Person

Geoelektrik

Multielektroden-Apparatur L-GM 4point light 10W (Lippmann, Deutschland)

60 aktive Elektroden

2 Personen

Georadar

SIR 3000 (GSSI, USA), Antenne: 200 MHz und 400 MHz

2 Personen

### 3 Durchführung der Messungen

Die tachymetrische Vermessung (Lage und Höhe) der Felder 1 und 2 erfolgte am 09. Juni 2009. An diesem und dem darauf folgenden Tag schloss sich auch die gravimetrische Messung durch die Firma GGL an. Zur Bestimmung der genauen Lage der Messfelder wurden Referenzpunkte an Häuserecken und markanten Punkten gewählt, um später die Kartierung zu erleichtern. Um den Höhenunterschied zwischen den Messfeldern festzuhalten, wurden beide Messfelder über die Tachymetrie verknüpft. Am 10. Juni 2009 wurden außerdem die Profile 1 und 2 der Geoelektrik gemessen, wobei Profil 2 entlang des Nachbargrundstücks geführt wurde, um so die

maximale Auslage zu erreichen. Die maximale Auslage konnte auf der Brachfläche selbst – abgesehen von Profil 1 – aufgrund eines angrenzenden Zauns nicht erreicht werden. Die Witterungsbedingungen zur Durchführung der Messungen waren abgesehen von leichten Regenschauern gut.

Am 17. Juni 2009 folgten die Geoelektrikprofile 3,4,5,6 auf der Brachfläche, die zur leichteren Orientierung auf das vorhandene Messgitter ausgerichtet wurden. Außerdem wurde das Profil 7 gemessen, das auf der Grünfläche hinter der Firma HOPEG entlang geführt wurde und dessen Lage sich auf die umliegenden Häuser bezieht.

Die Georadarmessung wurde, nachdem erste Ergebnisse durch die Gravimetrie und Geoelektrik bekannt waren, gegenüber der Geoelektrik zur weiteren Hohlräumersuche auf dem Messfeld 2 (Parkplatz der Firma HOPEG) bevorzugt und am 26. Juni 2009 durchgeführt. Hierbei kamen bei den Georadarprofilen 1-5 sowohl eine 200 MHz als auch eine 400 MHz Antenne zum Einsatz. Um Auffälligkeiten des Geoelektrikprofils 7 weiter zu untersuchen, wurden hier das Georadarprofil 6 mit der 400 MHz Antenne gemessen. Die noch fehlenden Geoelektrikmessungen 8 und 9 wurden schließlich am 01. Juli 2009 durchgeführt. Zur Lagebestimmung dienten ebenfalls markante Umgebungspunkte. Die Wetterbedingungen waren gut.

### 3.1 Geoelektrikprofile

Es wurden insgesamt 9 Profile mit 2D-Geoelektrik vermessen, wobei die geplante Lage der Profile teilweise modifiziert werden musste. **Tab. 2** gibt einen Überblick über die einzelnen Profillängen und die jeweils erreichte Erkundungstiefe, die im direkten Zusammenhang mit der Auslagenlänge und der Leitfähigkeit im Untergrund steht. Die Profillage erschließt sich aus dem Lageplan in **Anlage 1**.

**Tab. 2:** Messparameter der 2D-Geoelektrik

Messapparatur	Lippmann 4point light 10W (L-GM)	
Anzahl der Messprofile	9	
	Länge	Max. Erkundungstiefe
Profil 1	88,5 m	15 m
Profil 2	70,5 m	11 m
Profil 3	63 m	11 m
Profil 4	63 m	9,5 m
Profil 5	54 m	9,5 m
Profil 6	57 m	9,5 m
Profil 7	88,5 m	15 m
Profil 8	52,5 m	8 m
Profil 9	45 m	8 m
Gesamtlänge aller Profile	582 m	
Elektrodenabstand	1,5 m	
Messgeometrie	Wenner	

### 3.2 Georadarprofile

Aufgrund der sehr kurzen Auslagen auf dem Messfeld 2 und der dadurch resultierenden geringen Erkundungstiefe wurde auf Geoelektrik verzichtet und stattdessen eine Georadaruntersuchung bevorzugt. Das Georadar bietet die Möglichkeit Hohlräume gut zu lokalisieren, wenn keine metallischen Störkörper zu erwarten sind. Die maximale Eindringtiefe richtet sich nach der Leitfähigkeit des Bodens und beträgt hier 3 m für die 400 MHz Antenne und 5 m für die 200 MHz Antenne. Die Lage orientiert sich am das Messfeld 2.

**Tab. 3:** Messparameter des Georadars

Messapparatur	SIR 3000 (GSSI)	
Anzahl der Messprofile	6	
Antenne	200 MHz	400 MHz
Profil 1	34 m	34 m
Profil 2	34 m	34 m
Profil 3	34 m	34 m
Profil 4	28 m	30 m
Profil 5	32 m	34 m
Profil 6	X	48 m
Gesamtlänge aller Profile	380 m	

## 4 Datenbearbeitung und Interpretation

### 4.1 Datenbearbeitung und Auswertung 2D-Geoelektrik

Die gemessenen scheinbaren Widerstände wurden mit der Software Res2dinv (Geotomo Software) bearbeitet.

Als Ergebnis der Messung erhält man zunächst einen vertikalen Profilschnitt der Widerstandsverteilung im Untergrund. Diese Sektion dient als Eingangsmodell für eine 2D-Inversion. Mit Hilfe der 2D-Inversion werden die gemessenen Widerstandswerte modifiziert und in die richtige Raumlage "geschoben". Dazu wird schrittweise die Differenz zwischen den für ein Modell berechneten und den im Feld gemessenen scheinbaren Widerstandswerten durch Änderung des Widerstandsmodells verkleinert. Startmodell der Modellrechnung ist die gemessene Pseudosektion. Nach der Inversion wird aus dem neu berechneten Modell der Widerstandsverteilung des Untergrundes mit Hilfe eines Finite-Differenzen-Algorithmus die dazugehörige Pseudosektion berechnet und mit der aus den Feldmessungen abgeleiteten Pseudosektion verglichen. Der Prozess Inversion - Vorwärtsmodellierung - Vergleich wird iterativ solange wiederholt, bis die Abweichung zwischen berechneter Pseudosektion und gemessener Pseudosektion unter einen vorher festgelegten Schwellenwert fällt.

Das Resultat der Dateninversion eines Messprofils ist ein Modell der elektrischen Widerstandsverteilung in Form eines Profilschnitts. Die Widerstandsmodelle der Geoelektrikmessprofile sind in den Anlagen abgebildet. Die Profilschnitte vom Messfeld 1 (Profile 1-6) finden sich in **Anlage 3a und 3b**, das Widerstandsmodell von der HOPEG-Rückseite (Profil 7) findet sich in **Anlage 5**, und die Profilschnitte von den Garagen am Neuenweg (Profil 8), sowie zwischen dem Neuenweg und der Firma HOPEG (Profil 9) sind in **Anlage 6** dargestellt. Die spezifischen elektrischen Widerstandswerte sind farblich kodiert dargestellt (Konturkarte). Bereiche mit hohen Widerständen (d. h. hochohmig, schlechte Leitfähigkeit) sind in rötlichen, Bereiche mit niedrigen Widerständen (d. h. niederohmig, gute Leitfähigkeit) sind in blauen Farbtönen dargestellt. Ein Maß für die Güte der Anpassung des Modells an die realen Messwerte ist der "Root-Mean-Square"-Fehler (in %). Bei guter Datenqualität sollte dieser möglichst klein sein (< 10%). Die Anpassungsfehler liegen zwischen 2,6% und 9,5% was zwischen sehr gut und mittelmäßig zu deuten ist. Im Einzelnen wird hierauf weiter unten bei der Besprechung der Geoelektrikergebnisse noch eingegangen.

## 4.2 Datenaufbereitung und Auswertung Georadar

Zur Aufbereitung der Daten wurde das Programm Reflex benutzt. Das Georadar liefert eine direkte Tiefeninformation. Aus dem Ergebnis der Messung lässt sich somit die Tiefenlage eines Objekts direkt abschätzen. Man erhält die Tiefeninformation aus den Radargrammen, wenn man die gemessenen Laufzeiten mit Hilfe der Ausbreitungsgeschwindigkeit umrechnet. Hier wurde eine konstante mittlere Geschwindigkeit von 0,1 m/ns gewählt. Die Radargramme zum Messfeld 2 (Profile 1-5) sind in den **Anlagen 4 a - c** dargestellt, das Radargramm zur HOPEG Rückseite in der **Anlage 5**.

Auf den Profilen 1 - 5 kamen sowohl eine 200 MHz als auch eine 400 MHz Antenne zum Einsatz. Grund hierfür ist, dass elektromagnetische Wellen im Bereich ihrer Wellenlänge unterschiedlich stark reflektiert, gebeugt oder gebrochen werden. So ist die Auflösung der 400 MHz-Antenne (Wellenlänge im Vakuum 75 cm) höher, ihre Eindringtiefe jedoch niedriger als die der 200 MHz Antenne (Wellenlänge im Vakuum 150 cm). Die Eindringtiefen der Radarwellen lagen bei etwa 3 m für 400 MHz und bei etwa 6 m für 200 MHz.

Materialwechsel, Felsbrocken, Mauerreste, Leitungen usw. reflektieren das in den Boden abgestrahlte elektromagnetische Signal. Die reflektierten Signale lassen sich bei der hier gewählten Farbskala durch dunkle, bzw. rote und blaue Farben erkennen.

Die Georadaruntersuchungen sollen dazu beitragen, eventuell vorhandene Hohlräume bzw. Materialauflockerungen zu finden. Zur Lage der Testflächen und Profile wird auf den Plan in **Anlage 1** verwiesen.

## 4.3 Ergebnis von Geoelektrik und Gravimetrie im Messfeld 1

Die invertierten Widerstandmodelle der Geoelektrikprofile auf der Brachfläche in und um das Messfeld 1 der Gravimetrie sind in **Anlage 3a** dargestellt. Der Anpassungsfehler RMS liegt hier, abgesehen von Profil 2, im Bereich kleiner gleich 5%, was als gut gewertet werden kann. Das Profil 2 hat einen Fehler von 9,5 %, was vermutlich an der hochohmigen Struktur (rot) und dem daraus resultierenden hohen Widerstandskontrast im hinteren Bereich des Profils liegt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden für alle

Konturkarten dieselbe Farbskala gewählt. Der Anfang (0 m) der Profile bezieht sich auf den ersten Punkt des Messfeldes 1 der Gravimetrie (Punkt 100) und nicht auf die Profillänge, damit die Profile im relativen Koordinatensystem positioniert werden können und so auch räumliche Längsschnitte gezeigt werden können.

Betrachtet man die Widerstandsverteilungen genauer, so stellt man fest, dass es wiederkehrende sehr gut leitende Strukturen im Widerstandsbereich bis 5-40  $\Omega\text{m}$  gibt. Die schlecht leitenden Strukturen teilen sich in oberflächennahe und lokale tiefer liegende, evtl. auch zusammenhängende Bereiche auf. Bei ersteren sollte man von Materialwechsel der Deckschicht ausgehen, der durch Aufschüttungen auf dem ehemaligen Firmengelände Kronenberg entstanden sein könnte. Es ist nicht möglich, allein anhand der el. Widerstände bzw. el. Leitfähigkeiten den Untergrund eindeutig zu klassifizieren, da die elektrischen Eigenschaften sowohl innerhalb eines Materials variieren können, als auch durchaus verschiedene Materialien ähnliche elektrische Eigenschaften aufweisen können. Hat man aber an einer Stelle eine definitive Aussage über die Petrophysik, so kann man in der Regel davon ausgehen, dass zusammenhängenden Bereiche in den Widerstandsmodellen keinen Materialwechsel erlauben. Mit Hilfe von Bohrungen lassen sich also die Ergebnisse der Geoelektrik kalibrieren.

Für die gut leitenden Schichten auf dem Messfeld 1 gibt es verschiedene geophysikalische Deutungen. In dem hydrogeologischen Bericht von Prof. Losen werden im Wesentlichen drei Gesteinsarten erwähnt. Zum einen handelt es sich um schluffig-tonige Erden, sowie sandige Lockersedimente in den Deckschichten, während darunter im Mitteldevon Mergel und Kalk überwiegt. Ton, insbesondere wenn er feucht ist, ist ein guter elektrischer Leiter, der durchaus die hier vorkommenden Widerstände kleiner 20  $\Omega\text{m}$  erreichen kann. Sand hingegen, ebenso wie Kalk und Mergel, leitet den Strom schlecht und könnte für die „rötlich-gelben“ Regionen verantwortlich sein. Typische Werte sind in **Tab. 4** aufgeführt.

**Tab. 4:** Typische Widerstände für die hier vorkommenden Gesteine (Quelle: K. Knödel, H. Krummel, G. Lange, „Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien, Band 3: Geophysik“, 2. Auflage, Springer, 2005)

Gesteinsart	El. Widerstand [ $\Omega\text{m}$ ]
Ton	3 - 30
Sand	50 - 10000
Kalk	100 - 100000
Schluff	20 - 50
Natürliche Wasser	10 - 300
Salzwasser	0,25
Salzlaugen	< 0,1

Die niedrigen Werte für Sand und Kalk ergeben sich nur für wassergesättigtes Material. Man sieht in der **Tab. 4** ebenfalls, dass der Widerstand von Wasser mit seiner Salinität sehr stark abnimmt. Da nach unseren Informationen auf dem Untersuchungsgelände Schwermetalle ausgeschwemmt wurden, kann man davon ausgehen, dass das austretende Wasser mit Ionen angereichert ist und daher sehr gut leitet. Die Bereiche niedrigen Widerstands können also hier auch mit wasserführenden Schichten erklärt werden. In Prof. Losens Bericht wurden auf dem Feld 1 bei RKS 4 eine Leitfähigkeit von 388  $\mu\text{S}/\text{cm}$  festgestellt, was 25,8  $\Omega\text{m}$  entspricht. Bei RKS 5 betrug die Leitfähigkeit 511  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , also 19,6  $\Omega\text{m}$ .

In **Anlage 3a** sind besonders interessante Regionen markiert. Die markierten hochohmigen Strukturen können hier entweder mit Sanden oder mit Hohlräumen gedeutet werden. Eine räumliche Übersicht liefert die **Anlage 3b**, die auch eine Übersicht über das Ergebnis der Gravimetrie vom Messfeld 1 bietet. Es fällt auf, dass das größte Minimum der Gravimetrie am Messpunkt 246 mit der schlecht leitenden Struktur im Profil 4 übereinstimmt, die allerdings im Profil 3 noch deutlicher ausgeprägt ist. Direkt daneben tritt der gut leitende Bereich (Ton und/oder salines Wasser?) fast an die Oberfläche. Diese beiden Stellen eignen sich für eine klärende Bohrung.

Im Profil 2 erkennt man ebenfalls eine deutlich ausgeprägte sehr schlecht leitende Struktur, die Widerstände bis 1000  $\Omega\text{m}$  aufweist. Dieser Bereich wird von der Gravimetrie fläche nicht überdeckt. Diese Struktur zeigt eine typische geophysikalische Ausprägung, wie sie für einen Hohlraum zu erwarten ist. Auch diese Stelle sollte mit einer Bohrung geprüft werden.

#### 4.4 Ergebnis von Georadar und Gravimetrie im Messfeld 2

Die Georadarprofile 1-5 finden sich in **Anlage 4a** für die 400 MHz Antenne und in **Anlage 4b** für die 200 MHz Antenne. Die Profile sind am Gitter des Messfeldes 2 der Gravimetrie ausgerichtet. **Anlage 4c** zeigt eine räumliche Übersicht.

Man erkennt in **Anlage 4a** (Georadar, 400 MHz) zwei blau gekennzeichnete reflektierende Hyperbeln. Metall gehört zu den besonders leitfähigen Materialien und die Tatsache, dass die Struktur entlang einer Linie in den Radargrammen wieder zu finden ist, lässt darauf schließen, dass es sich hierbei um Leitungen handelt. Leitung 1 befindet sich in einer Tiefe von ca. 60-80 cm und ist bei Profil 1 etwa 12 m, und bei Profil 5 ca. 13 m von der Grundlinie des Messfeldes 2 entfernt. Leitung 2 liegt nur etwa 20-30 cm tief und befindet sich bei Profilmeter 28-29 m.

Des Weiteren erkennt man in den Profilen mehrere inhomogene Bereiche. Im Vergleich mit den Radargrammen der 200 MHz Antenne und den gravimetrischen Anomalien zeichnen sich insbesondere die rot markierten Regionen in 1 m bis 2 m Tiefe bei Profilmeter 5 m und 14 m, als Auflockerungen bzw. weniger verdichtetes Material aus. In den Radargrammen der 200 MHz Antenne in **Anlage 4b** lässt sich eine klare Schichtgrenze in 3 m bis 4 m Tiefe manifestieren. Die Reflektivität, d.h. die Stärke der Reflexionsbänder entlang dieser Schichtgrenze variiert. Diese kann durch einen Materialwechsel oder auch bei sehr hohen Amplituden durch Auflockerungszonen bzw. Hohlräume entstehen. Während der Bereich um Profilmeter 14 m eher auf eine Muldenstruktur schließen lässt, zeigen die Regionen um Profilmeter 5 m eine typische Hohlraumstruktur. Dieser Bereich bei 6 m korreliert auch sehr gut mit einem Massendefizit in der Mikrogravimetrie (blaue Farben, vgl. **Anlage 4c**). Um diese Aussagen zu verifizieren bietet sich eine Bohrung bei 5 m auf Profil 1 und bei 14 m auf Profil 2 an.

#### 4.5 Geoelektrik und Georadar HOPEG Rückseite

Hinter der Firma HOPEG zum angrenzenden Nachbargrundstück befinden sich das Geoelektrikprofil 7, sowie das 400 MHz Georadarprofil 6 (**Anlage 5**). Das Geoelektrikprofil beginnt 6 m von der Straße entfernt beim ersten Rasenstück und 1 m vorher beginnt das Georadarprofil 6 bei der Hausecke. Betrachtet man das Widerstandmodell, fällt der hochohmige Bereich zwischen Profilmeter 18 m bis 32 m

auf. Die Widerstände erreichen hier bei bis zu 2500  $\Omega$ m im vorderen mittigen Bereich der Anomalie. Im Vergleich mit dem Georadar sieht man auch hier eine Struktur, die auf einen Hohlraum deutet. Diese Stelle sollte durch eine Bohrung überprüft werden. Die niederohmigen Regionen ähneln denen auf der Brachfläche der ehemaligen Firma Kronenberg und lassen Ton und/oder salines Wasser vermuten.

#### 4.6 Geoelektrikprofile 8 und 9

Die Ergebnisse der Geoelektrikprofile 8 und 9 sind in der **Anlage 6** dargestellt. Profil 8 befindet sich am Neuenweg und erstreckt sich entlang der Garagen. Die asphaltierte Zufahrt zu den Garagen erschwerte die Kopplung der Elektroden, weshalb die Daten im vorderen Bereich stark gestört erscheinen und nicht zuverlässig interpretiert werden können. Zur Klärung des Untergrundes in diesem Bereich wird eine Bohrung empfohlen. Im hinteren Bereich findet sich eine hochohmige Deckschicht, die vermutlich durch Aufschüttungen entstanden ist. Die blauen Bereiche ab 1 m zeigen wieder gut leitende Regionen.

Das Profil 9 reicht vom Neuenweg bis zur Rückseite der Firma HOPEG. Hier zeigt sich ebenso wie in den Profilen 2,3 und 4 ein nach unten gezogener hochohmiger Bereich neben gut leitenden Regionen. Dies lässt ebenfalls auf einen Hohlraum neben feuchten tonigen Schichten vermuten. Eine Bohrung bei Profilmeter 14,5 m wird empfohlen.

## 5 Zusammenfassung

Im Bereich eines Industriegeländes in Bensberg werden immer wieder kleine Setzungserscheinungen (Erdfälle) und spontane Wasseraustritte beobachtet. Zur Klärung der Ursache und zur Erkundung möglicher Gefahrenbereiche wurden geophysikalische Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden zunächst zwei Messfelder mittels Mikrogravimetrie untersucht. Das Messfeld 1 wurde zusätzlich mit 4 Geoelektrikprofilen auf und 2 neben dem Feld untersucht. Das Messfeld 2 wurde ergänzend mit 200 MHz und 400 MHz Georadar sondiert. Drei weitere Geoelektrikprofile und ein weiteres Georadarprofil um die Firma HOPEG und am Neuenweg wurden gemessen. Insgesamt zeigt die Geoelektrik sehr gut leitende Schichten unterbrochen von hochohmigen Bereichen. Die niederohmigen Bereiche können wasserführende Schichten und/oder Tone sein. Die hochohmigen Bereiche sind vermutlich Aufschüttungen in der Deckschicht, bzw. Kalk, Mergel, Sand oder Hohlräume darunter.

Zur Prüfung und Kalibrierung der geophysikalischen Messungen werden einige Erkundungsbohrungen empfohlen. Insbesondere beim gravimetrischen Minimum an Punkt 246 im Profil 4 empfiehlt sich eine Bohrung **B1** (Profilmeter 45 m von der Grundlinie des Messfeldes) zur Klärung, ob es sich um einen Hohlraum oder Sand/Mergel/Kalk handelt. Auf Profil 3 bei 52 m (Bereich sehr niedriger el. Widerstände) zwischen den Messpunkten 205/206 sollte eine Bohrung **B2** überprüfen, ob der Bereich besonders salines Wasser enthält und/oder große Tonbeimengungen hat. Beim Profil 2 entlang des anliegenden Hauses gibt es einen hochohmigen Bereich, der typische geoelektrische Eigenschaften für einen Hohlraum aufweist, auch hier sollte bei 52 m eine Bohrung **B3** Aufschluss geben. Die Georadarprofile im Messfeld 2 enthalten Hinweise auf Leitungen. Des Weiteren zeigen sich in mehreren Bereichen mögliche Auflockerungen in 1 m bis 2 m Tiefe, die durch die Aufrisse verursacht sein können, oder durch Hohlräume, die sich darunter befinden. Die Schichtgrenze, die sich in 3 m – 4 m Tiefe abzeichnet, weist eine Muldenstruktur auf und lässt an einer Stelle einen Hohlraum vermuten. Dieser Bereich zeigt auch in der Gravimetrie ein Minimum. Zur Klärung wird eine Bohrung **B4** zwischen Messpunkt 641-642 beim Radarmeter 5 m auf Profil 1 empfohlen. Auf Profil 2 sollte eine Bohrung **B5** bei Punkt 615, Radarmeter

14,5 m die Muldenstruktur untersuchen, die auch mit Materialrutschungen oder einem Hohlraum in Zusammenhang stehen kann.

Die Rückseite der Firma HOPEG weist sowohl im Georadarprofil als auch in der Widerstandssektion 8 Besonderheiten auf. Die Bohrung **B6** bei Geoelektrikmeter 21 m, also 27 m von der Straßenkante Industriegeweg entfernt, könnte Aufschlüsse geben. Auf dem Garagenplatz bei Profil 8 waren die Messdaten der Geoelektrik gestört, so dass hier eine zuverlässige Interpretation der Messung nicht möglich ist. Um Aufschluss über den Untergrund zu erhalten, wird hier eine Bohrung **B7** empfohlen. Das Profil 9 vom Neuenweg zur Firma HOPEG hat hingegen eine gute Datenqualität. Bei Profilmeter 14,5 m wird eine Bohrung **B8** empfohlen, da hier ein Hohlraum vermutet wird.

Die acht empfohlenen Bohrpunkte sind im Lageplan (**Anlage 1**) markiert. Es empfiehlt sich, mögliche Bohrpunkte gemeinsam zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer abzustimmen und im Gelände festzulegen. Auf Basis der Bohrergebnisse können weitere Schlussfolgerungen aus den geophysikalischen Untersuchungen gezogen werden.

## 6 Anlagenverzeichnis

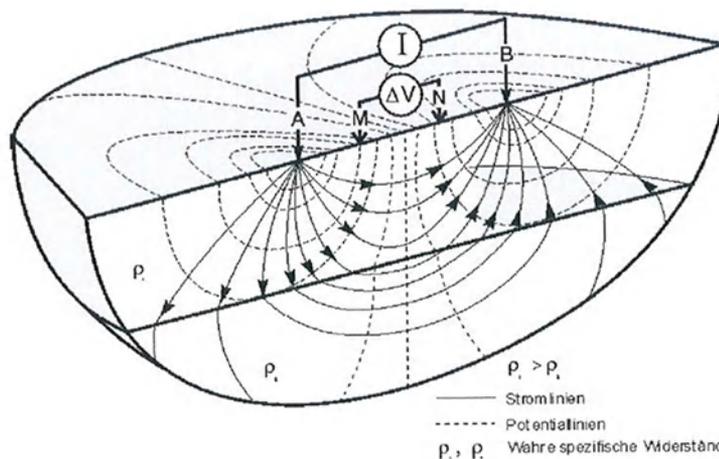
<b>Anlage 1</b>	Lageplan der geophysikalischen Untersuchungen, Maßstab 1:1000
<b>Anlage 2</b>	Bericht zur mikrogravimetrischen Untersuchung der Firma GGL GmbH
<b>Anlage 3a</b>	Geoelektrische Profilschnitte bei Messfeld 1, Maßstab 1:500
<b>Anlage 3b</b>	3D-Visualisierung der geoelektrischen Widerstandsmodelle und Vergleich mit der Mikrogravimetrie auf Messfeld 1, Maßstab ca. 1:500
<b>Anlage 4a</b>	Radargramme 400 MHz auf Messfeld 2, Maßstab 1:250
<b>Anlage 4b</b>	Radargramme 200 MHz auf Messfeld 2, Maßstab 1:250
<b>Anlage 4c</b>	3D-Visualisierung der Radarmessungen und Vergleich mit der Mikrogravimetrie auf Messfeld 2, Maßstab ca. 1:250
<b>Anlage 5</b>	Ergebnis des Georadarprofils 6 und des Geoelektrikprofils 7 auf der HOPEG-Rückseite, Maßstab 1:500
<b>Anlage 6</b>	Ergebnis der Geoelektrikprofile 8 und 9 zwischen den Gebäuden, Maßstab 1:250

## Anhang

### A Prinzip der 2D Geoelektrik

**Funktionsprinzip.** Die Widerstandsgeoelektrik gehört zur Gruppe der mit künstlichen Feldern arbeitenden aktiven geophysikalischen Verfahren. Bei der Messung wird die Eigenschaft der Gesteine genutzt, in Abhängigkeit von Lithologie und Elektrolytgehalt des Porenwassers, den elektrischen Strom zu leiten.

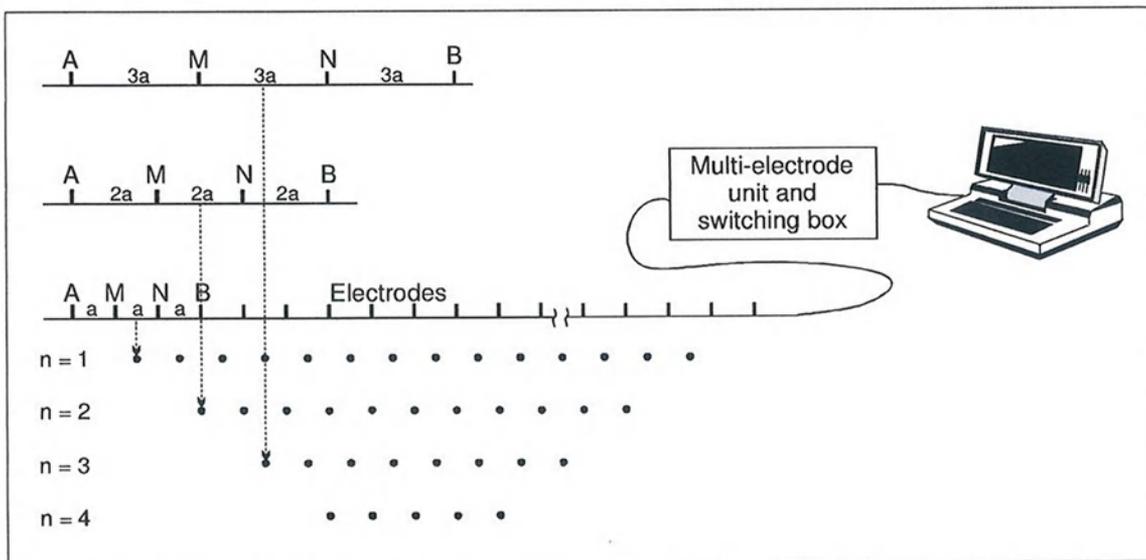
Das Messprinzip beruht darauf, dass über zwei geerdete Stromelektroden A und B ein Gleichstrom in den Untergrund eingespeist wird. Im Untergrund baut sich ein räumliches Potentialfeld mit senkrecht zu den Stromlinien verlaufenden Äquipotentiallinien auf. An den Schichtgrenzen und an Einlagerungen mit Leitfähigkeitskontrasten tritt analog zu den aus der Strahlenoptik bekannten Erscheinungen eine Brechung der Stromlinien auf. Aus der Vermessung des Potentialverlaufs an der Erdoberfläche lassen sich Angaben zur Widerstandsverteilung im Untergrund ableiten. Es ist jedoch nicht möglich, den Widerstand durch die Messung von Strom  $I$  und Spannung  $V$  mit einer Zweipunktanordnung zu ermitteln. Wegen der hohen Stromdichte in der unmittelbaren Umgebung der Stromelektroden würden im Wesentlichen nur die Erdungswiderstände gemessen. Die zur Berechnung des Gesteinswiderstands nach dem Ohmschen Gesetz erforderliche Spannung  $V$  wird daher als Potentialdifferenz zwischen zwei zusätzlichen Sonden M und N gemessen. Über die Variation des Abstandes der beiden Stromelektroden lässt sich für unterschiedliche Tiefenbereiche im Untergrund der elektrische Widerstand messen.



(aus KNÖDEL, KRUMMEL, LANGE (1997): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3: Geophysik\*, BGR, Springer-Verlag Berlin)

Dabei gibt es unterschiedliche Möglichkeiten die Elektroden AB und die Sonden MN anzu-

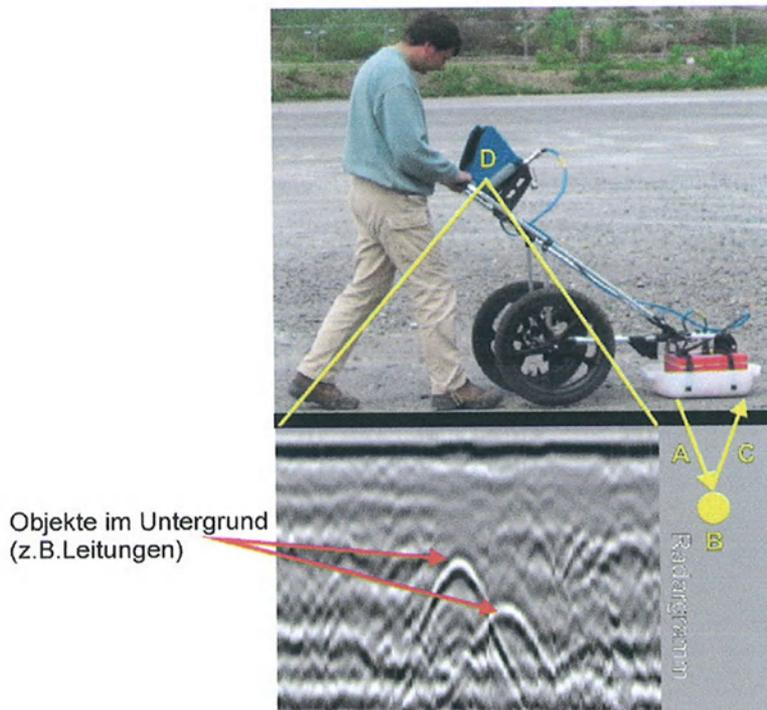
ordnen (Messgeometrie, Konfiguration). Man unterscheidet unter anderem Schlumberger-, Wenner-, und Dipol-Dipol-Konfiguration. Jede dieser Messanordnungen besitzt Vorzüge und Nachteile hinsichtlich Erkundungstiefe, Auflösungsvermögen, Anfälligkeit gegenüber technischen Störungen und lateralen Inhomogenitäten sowie Durchführbarkeit im Gelände.

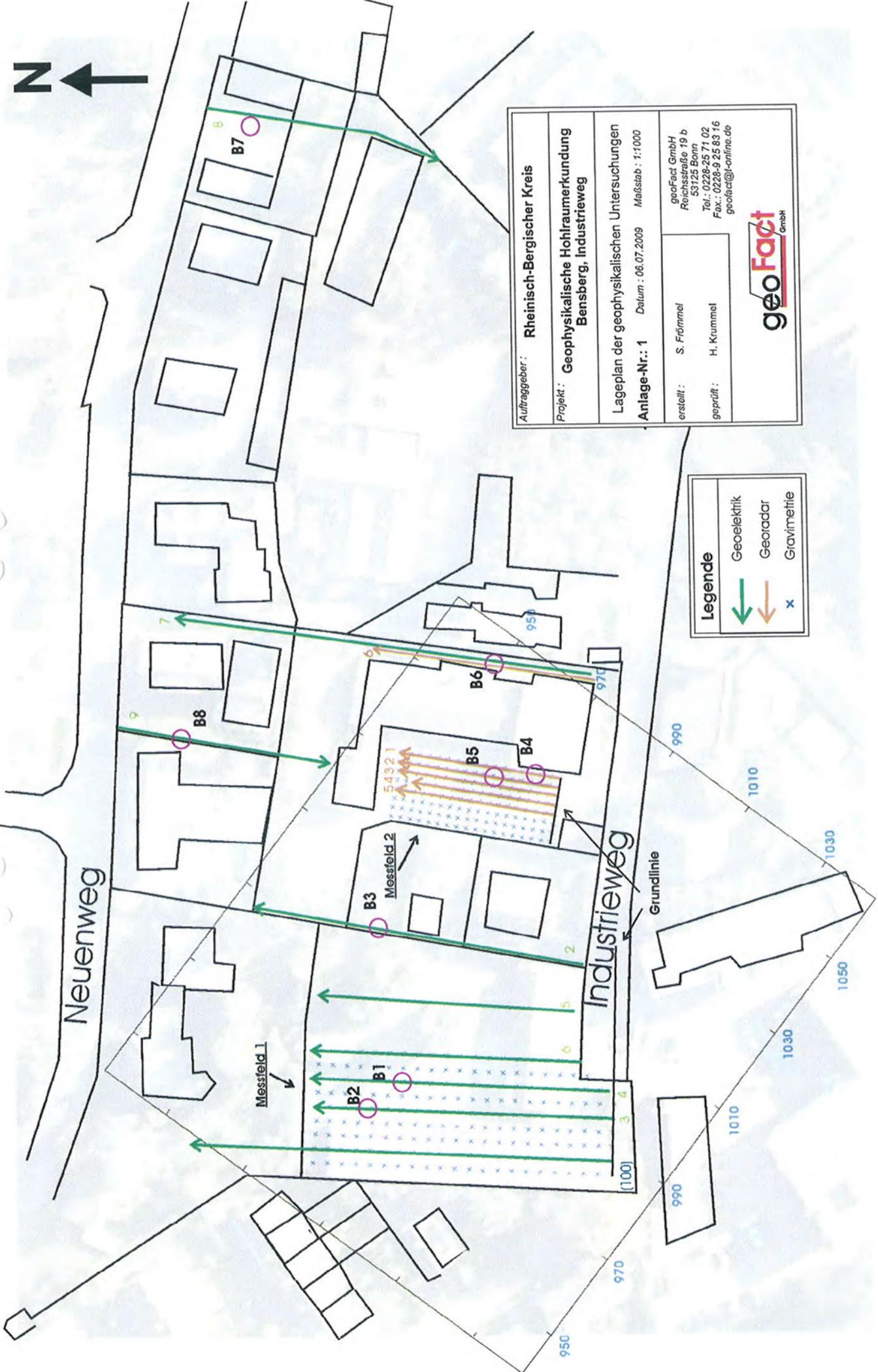


**Multielektroden-Geoelektrik.** Die Multielektroden-Geoelektrik ist eine Messtechnik, die zur Untersuchung komplexer geologischer Situationen entwickelt wurde, bei denen die Anwendung eindimensionaler Sondierungsverfahren ungeeignet ist, da die Abweichung von planparalleler Schichtung zu groß ist. Dabei werden die Widerstandsmessungen auf Profilen mit 28, 56 oder mehr Elektroden, die in einem konstanten Abstand  $a$  voneinander angeordnet sind, durchgeführt. Der Abstand nimmt mit jeder Messreihe über den Faktor  $n$  zu, so dass Kartierung und Sondierung kombiniert werden (siehe auch die Prinzipskizze). Mit zunehmendem Abstand erhält man Informationen aus größeren Tiefen. Die gemessene Verteilung des scheinbaren Widerstands kann als Pseudotiefensektion dargestellt werden. Das ist eine konturierte Sektion, die qualitativ die räumliche Verteilung des elektrischen Widerstands unter dem Messprofil zeigt. Mit einer zweidimensionalen Inversion erhält man aus den Pseudosektionen ein Blockmodell der wahren Widerstandsverteilung. Die Länge des Profils, die gewünschte Erkundungstiefe und die gewünschte Auflösung bestimmen die Zahl der Elektroden und den Elektrodenabstand.

## B Prinzip des Georadar

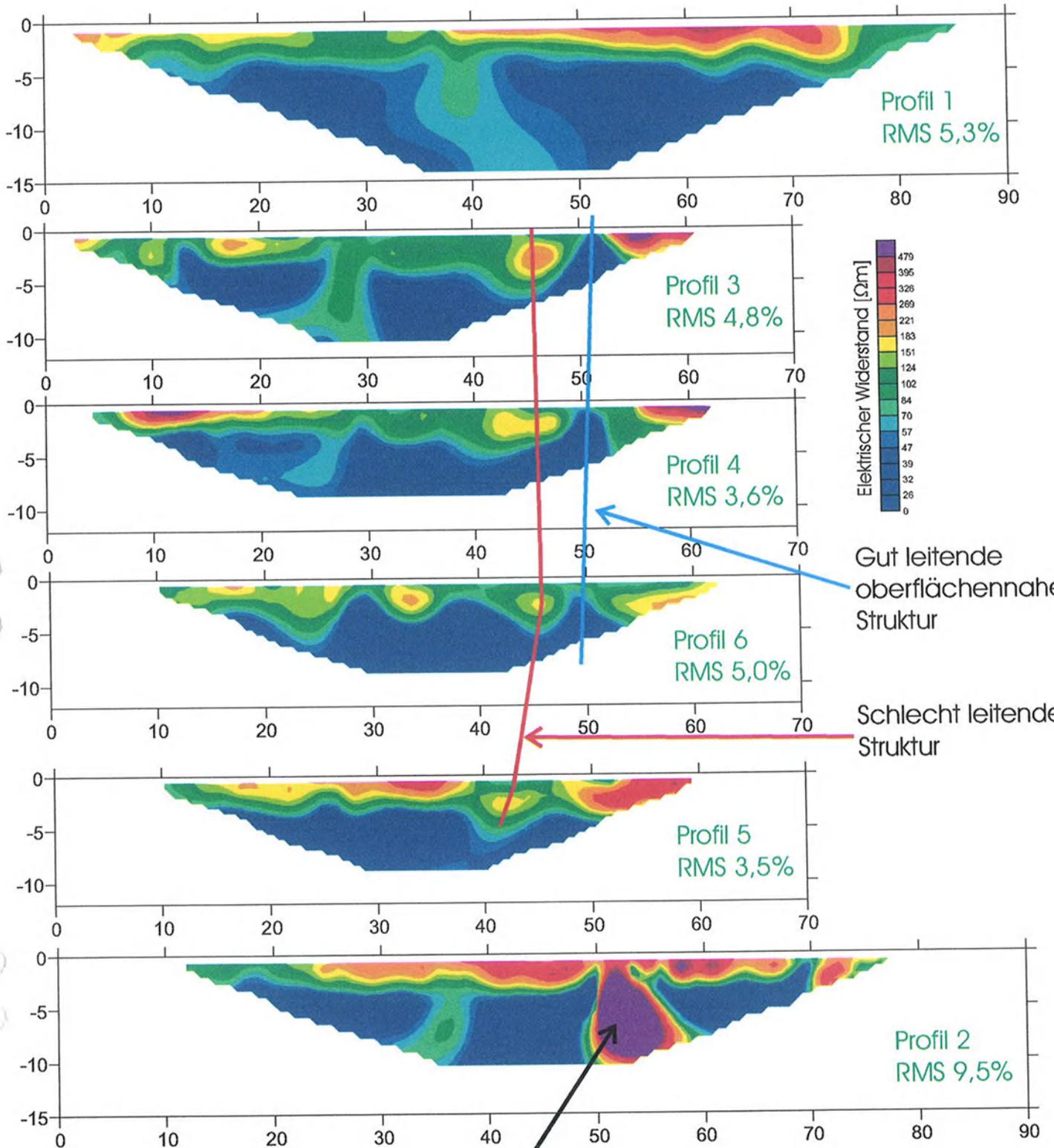
Die Funktion eines Georadars ist in der Abbildung skizziert: **A.** Elektromagnetische Radarwellen werden in den Boden abgestrahlt. **B.** Diese Wellen werden von Objekten, z. B. metallische Störkörper, Rohrleitungen, Bauschutt oder auch an Schichtgrenzen wie z.B. dem Übergang von Mauerwerk zum dahinter/darunter liegenden Boden reflektiert und gestreut. **C.** Die reflektierten und gestreuten Wellen werden von dem Radar empfangen. Bei guten Bedingungen (schlecht leitende trockene Materialien) können mit den eingesetzten Antennen (200 MHz und 400 MHz) Eindringtiefen bis zu 5 m bei hoher lateraler und vertikaler Auflösung erreicht werden. Bei feuchten bzw. tonigen Böden mit hoher el. Leitfähigkeit ist die Eindringtiefe der Radarwellen sehr gering (nur einige dm), in trockenen, sandigen oder felsigen Böden ist sie hoch. **D.** Das Radargramm kann bei der SIR 3000 in Echtzeit auf dem Bildschirm des am Gerät angebrachten Minicomputers betrachtet werden.



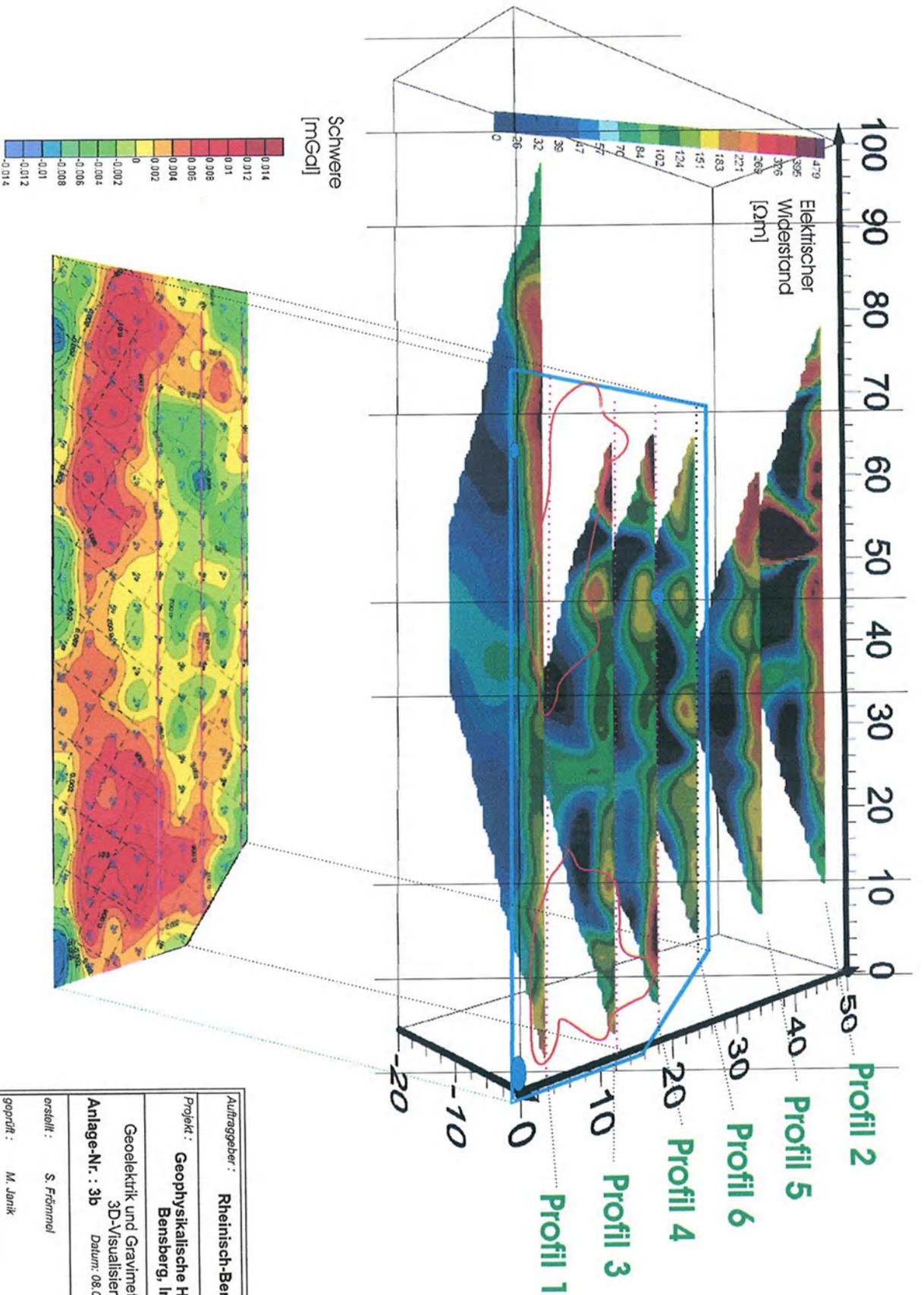


<b>Auftraggeber:</b> Rheinisch-Bergischer Kreis
<b>Projekt:</b> Geophysikalische Hohlräumerkundung Bensberg, Industrieweg
<b>Lageplan der geophysikalischen Untersuchungen</b>
<b>Anlage-Nr.:</b> 1 <b>Datum:</b> 06.07.2009 <b>Maßstab:</b> 1:1000
<b>erstellt:</b> S. Frömmel
<b>geprüft:</b> H. Krummel
<b>geoFact GmbH</b> Reichsstraße 19 b 53125 Bonn Tel.: 0228-925 71 02 Fax.: 0228-925 83 16 geofact@j-online.de

<b>Legende</b>
Geoelektrik
Georadar
Gravimetrie

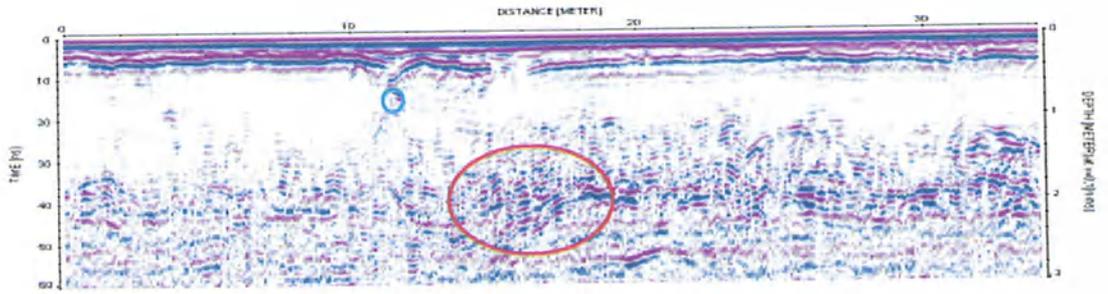


Auftraggeber : <b>Rheinisch-Bergischer Kreis</b>	
Projekt : <b>Geophysikalische Hohlräumerkundung Bensberg, Industrieweg</b>	
Geoelektrische Profilschnitte beim Messfeld 1	
Anlage-Nr. : <b>3a</b>	Datum: 08.07.2009    Maßstab: 1:500
erstellt : S. Frömmel	geofact GmbH Reichsstraße 19 b 53125 Bonn
geprüft : M. Janik	Tel.: 0228-25 71 02 Fax.: 0228-9 25 83 16 geofact@t-online.de
<b>geoFact</b> GmbH	

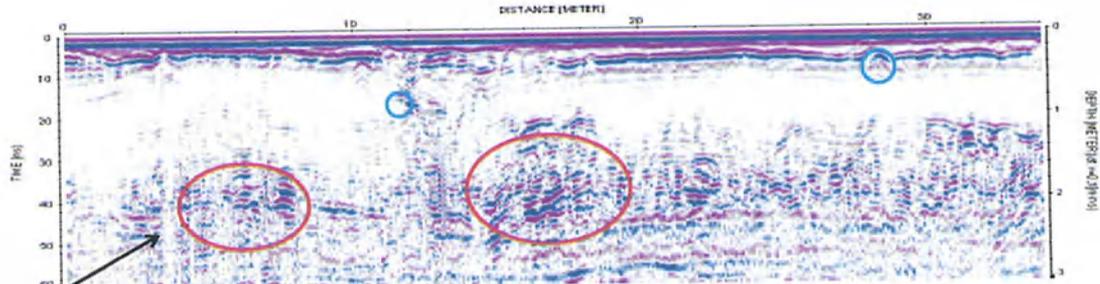


<b>Auftraggeber :</b> Rheinisch-Bergischer Kreis	
<b>Projekt :</b> Geophysikalische Hohtraumerkundung Bensberg, Industrieweg	
<b>Geoelektrik und Gravimetrie, Messfeld 1</b>	
<b>Anlage-Nr. :</b> 3b	<b>Datum:</b> 08.07.2009 <b>Maßstab:</b> 1:500
<b>erstellt :</b> S. Frömmel	<b>geoFact GmbH</b> Reichsstr. 19 b 53125 Bonn
<b>geoprüft :</b> M. Janik	<b>Tel.:</b> 0228-25 71 02 <b>Fax.:</b> 0228-9 25 83 16 <b>geofact@online.de</b>
<b>geoFact</b> GmbH	

Profil 1

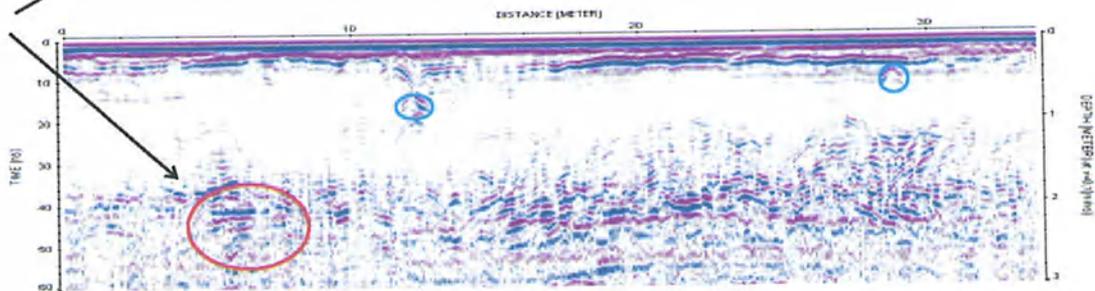


Profil 2

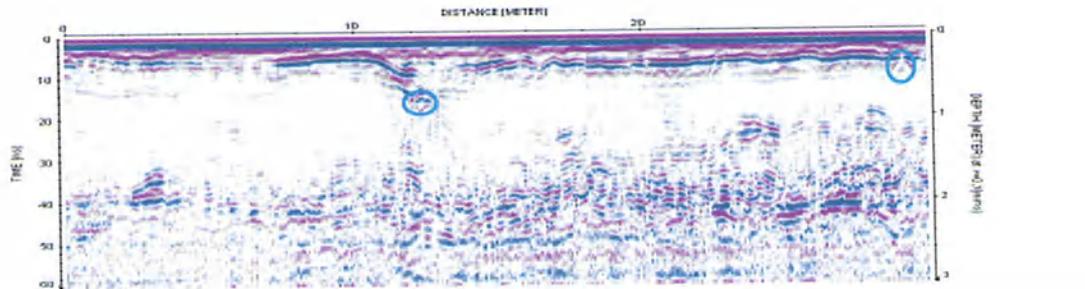


Auflockerung?

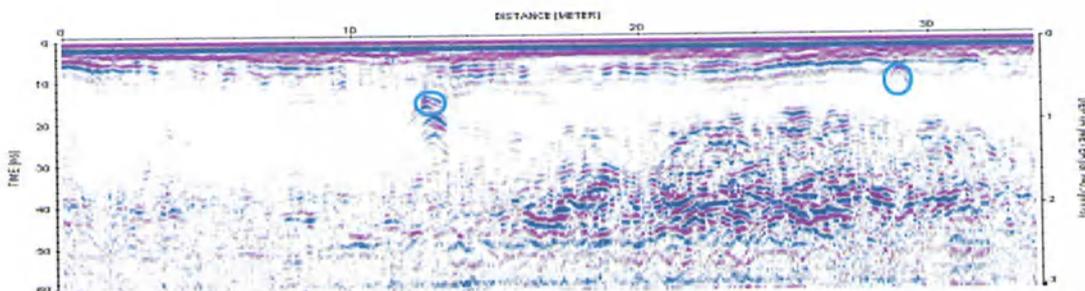
Profil 3



Profil 4



Profil 5



Tiefe 3-fach überhöht dargestellt

○ Leitungen

Auftraggeber: <b>Rheinisch-Bergischer Kreis</b>	
Projekt: <b>Geophysikalische Hohlräumerkundung Bensberg, Industrieweg</b>	
Georadar 400 MHz auf Messfeld 2	
Anlage-Nr.: 4a Datum: 08.07.2009 Maßstab: 1:250	
erstellt: S. Frömmel	geofact GmbH Reichsstraße 19 b 53125 Bonn
geprüft: M. Janik	Tel.: 0228-25 71 02 Fax.: 0228-9 25 83 16 geofact@t-online.de