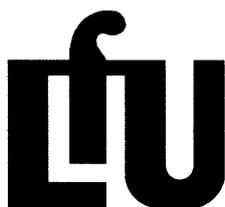
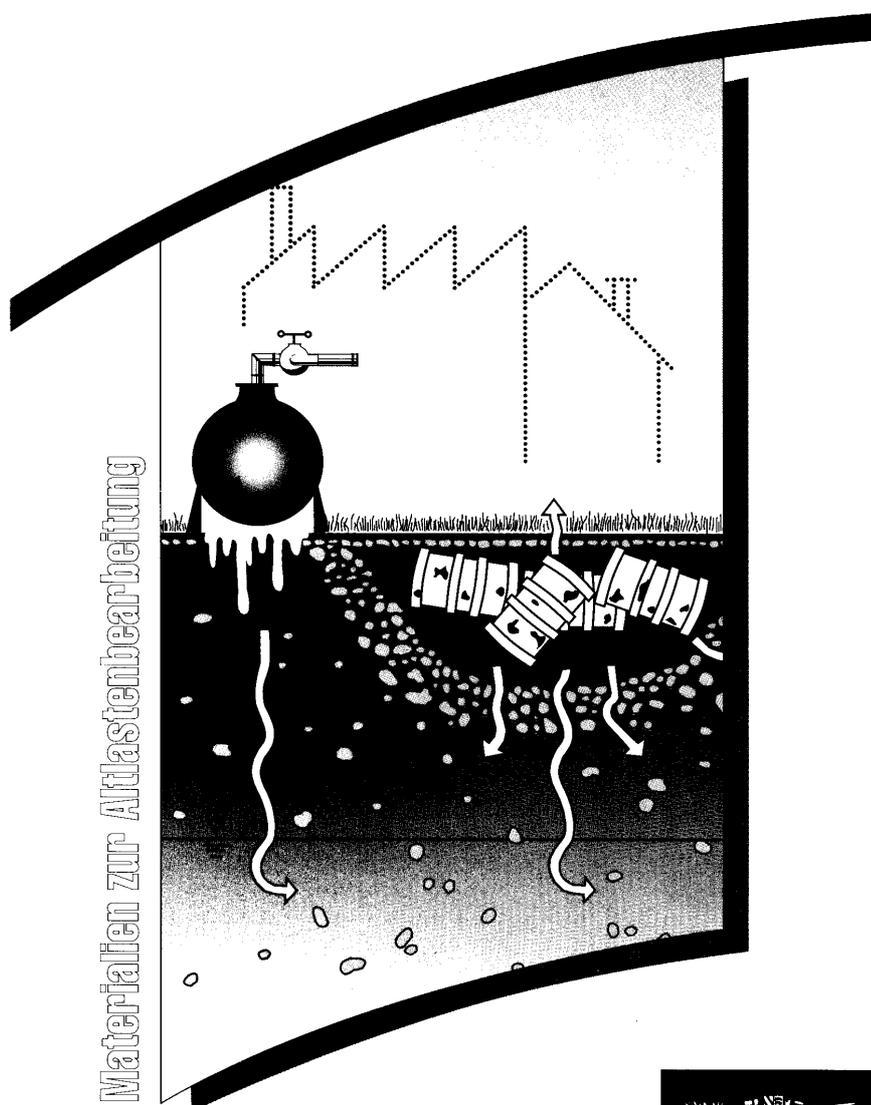


**Handbuch Altlasten
und Grundwasserschadensfälle**

Leitlinien zur Geophysik an Altlasten

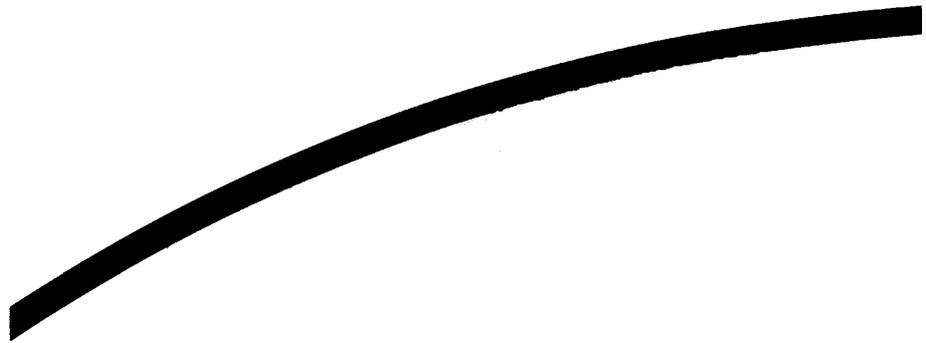


**BODEN
ABFALL
ALTLASTEN**



**Handbuch Altlasten
und Grundwasserschadensfälle**

Leitlinien zur Geophysik an Altlasten



Herausgegeben von der
Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
2. unveränderter Nachdruck

Karlsruhe 1990



Altlastenfachinformation im WWW

Impressum

Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

Bearbeiter: BR Straßburger
- Referat 54 – Altlastensanierung

Dr. Vogelsang, Dipl.-Geophys. Schirmer
Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

Karlsruhe, Dezember 1990

**Bei diesem Ausdruck handelt es sich um eine Adobe Acrobat Druckvorlage.
Abweichungen im Layout vom Original sind rein technisch bedingt.
Der Ausdruck sowie Veröffentlichungen sind -auch auszugsweise- nur für
eigene Zwecke und unter Quellenangabe des Herausgebers gestattet.**

Inhaltsverzeichnis

ANMERKUNG ZU "GEOPHYSIKALISCHE GEMEINSCHAFTSAUFGABEN DER LÄNDER"	1
VORWORT.....	1
KURZFASSUNG.....	2
0 ZUSAMMENFASSUNG.....	3
1 EINLEITUNG	4
1.1 VORBEDINGUNGEN	4
1.2 ZIELSETZUNGEN	4
1.3 PROGRAMMÜBERSICHT	5
1.4 ZUSAMMENARBEIT.....	8
2. UNTERSUCHUNGSVERFAHREN DER GEOPHYSIK.....	9
2.1 GEOMAGNETIK	9
2.2 GEOELEKTRIK.....	15
2.2.1 Gleichstromverfahren.....	15
2.2.2 Wechselstromverfahren.....	37
2.3 SEISMIK.....	46
2.3.1 Allgemeines.....	46
2.3.2 Refraktionsseismik	48
2.3.3 Reflexionsseismik.....	52
2.4 GRAVIMETRIE.....	57
2.5 GEOTHERMIK	60
2.6 BOHRLOCHGEOPHYSIK.....	63
2.6.1 Allgemeines.....	63
2.6.2 Gamma-Ray Messung (GR).....	64
2.6.3 Neutronenmessung (N).....	64
2.6.4 Messung der Schallgeschwindigkeit im Gestein (SONIC).....	68
2.6.5 Elektriklog (EL)	68
2.6.6 Eigenpotentialmessung (EP).....	68
2.6.7 Fokussiertes Elektriklog (FEL), Laterolog (LL)	69
2.6.8 Induktionsmessung (IES)	69
2.6.9 Salinometermessung (SAL).....	69
2.6.10 Temperaturmessung (TEMP).....	70
2.6.11 Flowmetermessung (FLOW)	70
2.6.12 Kalibermessung (CAL).....	70
2.7 WEITERE VERFAHREN.....	71
3 AUSWERTUNG.....	72
3.1 ANWENDUNGSBEREICHE	72
3.2 ÜBERTRAGBARKEIT	73
3.2.1 Altlastentypen	73
3.2.2 Hydrogeologische Standorttypen.....	76
3.2.3 Anwendungsgrenzen.....	76
3.3 KOSTENRAHMEN	79
3.3.1 Kosten Geophysik an Altlasten	79
3.3.2 Kostenvergleich Geophysik / Bohrungen.....	81
3.4 ENTSCHEIDUNGSMATRIX.....	84
3.5 DURCHFÜHRUNG	85
3.5.1 Allgemeines.....	85

3.5.2 Vorarbeiten, Methodenauswahl.....	85
3.5.3 Ausschreibung, Vergabe.....	88
3.5.4 Geländearbeiten.....	89
3.5.5 Auswertung und Interpretation.....	91
3.5.6 Nachfolgearbeiten.....	91
3.6 METHODENKOMBINATIONEN.....	92
4 AUSBLICK	94
4.1 VORSCHLÄGE FÜR WEITERE UNTERSUCHUNGEN AN DEN MODELLSTANDORTEN	94
4.1.1 Allgemeines	94
4.1.2 Leonberg.....	94
4.1.3 Mühlacker.....	95
4.1.4 Osterhofen	96
4.1.5 Bitz.....	96
4.1.6 Herten.....	97
4.1.7 Mannheim.....	97
4.1.8 Geislingen.....	98
4.2 FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSBEDARF	98
4.2.1 Bedarf.....	98
4.2.2 Reflexionsseismik.....	98
4.2.3 Eigenpotentialmessungen.....	99
4.2.4 Induzierte Polarisaton (IP).....	99
5. LITERATURVERZEICHNIS	100
ANHANG	101
A.1: VERFAHRENS-MUSTERBESCHREIBUNGEN/AUSSCHREIBETEXTE	101
Verfahrens-Musterbeschreibung Geomagnetik.....	102
Verfahrens-Musterbeschreibung Geoelektrische Kartierung	104
Verfahrens-Musterbeschreibung Widerstandssondierung	106
Verfahrens-Musterbeschreibung Induzierte Polarisaton.....	108
Verfahrens-Musterbeschreibung Elektromagnetische Kartierung und VLF/VLF-R-Methode	110
Verfahrens-Musterbeschreibung Bodenradar	112
Verfahrens-Musterbeschreibung Refraktionsseismik	114
A.2: LEITLINIEN ZUR GEOPHYSIK AN ALTLASTEN	116
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	125
TABELLENVERZEICHNIS.....	127
INDEXVERZEICHNIS	128

Anmerkung zu "Geophysikalische Gemeinschaftsaufgaben der Länder"

Im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung (NLfB) in Hannover ist eine Abteilung "Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben" eingerichtet, die von den geologischen Landesämtern der einzelnen Bundesländern für bestimmte gemeinsame Untersuchungsaufgaben in Anspruch genommen werden kann. Die Erstellung der vorliegenden Leitlinien zur Geophysik an Altlasten ist als ein gutes Beispiel für die Zusammenarbeit des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg mit dieser Stelle anzusehen.

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

Vorwort

Im Rahmen des Modellstandortprogrammes als einem Teil der Altlastenkonzeption des Landes Baden-Württemberg, das durch den kommunalen Altlastenfonds des Landes Baden-Württemberg finanziell getragen wird, wurden in den Jahren 1988 bis 1990 eine Vielzahl von Erkundungserfahrungen wie Sondierungen, Bohrungen und auch umfangreiche geophysikalische Untersuchungen vorgenommen. Ziel dabei ist es, Erfahrungen und Ergebnisse zu sammeln, die es erlauben, bei anderen Standorten gezielter, sachgerechter und damit insgesamt kostengünstiger und rascher erkunden zu können.

Innerhalb eines Geophysikrahmenprogramms wurden die geophysikalischen Untersuchungen - insgesamt 59 Einzeluntersuchungen - an den Modellstandorten durchgeführt.

Die Ergebnisse wurden standortübergreifend durch das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung in Hannover (NLfB) im Rahmen der geowissenschaftlichen Gemeinschaftsaufgaben der Länder ausgewertet und mündeten in die beiliegenden "Leitlinien zur Geophysik an Altlasten". Diese Leitlinien zur Geophysik werden den Wasserwirtschaftsämtern, den Ingenieurbüros, den Städten und Kommunen etc. zur Verfügung gestellt.

Zielsetzung der Leitlinien ist es:

1. Geophysikalische Untersuchungen in das neue Aufgabengebiet der Altlastenerkundung einzuführen und die Anwendung zu fördern,
2. Unterstützung und Hinweise bei der Verfahrensauswahl zu geben,
3. Hinweise zur Auswertung und Interpretation zu liefern,
4. durch Einbindung der Geophysik in ein konzeptionelles Vorgehen die Erkundung insgesamt wirtschaftlicher zu gestalten.

Die "Leitlinien der Geophysik an Altlasten" stellen eine wesentliche Hilfe im Rahmen der umweltgeophysikalischen Untersuchungen für die bei der Altlastenerkundung tätigen Institutionen und Firmen dar.

Karlsruhe, im Juni 1990

Kurzfassung

Den geophysikalischen Messungen kommt neben erheblichen Vorteilen beim Arbeitsschutz eine besondere Bedeutung im Rahmen der Altlastenerkundung zu, da sie flächenhafte Aussagen über den zu erkundenden Untergrund erlauben. Geophysikalische Untersuchungen ersetzen zwar keine Bohrungen, aber mit diesen kann die Bohrung an eine günstigere Stelle plaziert werden; Fehlbohrungen können so oft vermieden werden, womit der Geophysik-Einsatz vor den eigentlichen Bohrungen dann auch wirtschaftlich sinnvoll ist.

Die Verwendung geophysikalischer Meßergebnisse - also in der Regel die Messung von geophysikalischen Anomalien (Abweichungen) - bedarf einer sachgerechten Interpretation.

Erst durch ein Zusammenfügen der Interpretation der geophysikalischen Ergebnisse und der hydrogeologischen Erkundung mittels Bohrungen können die Erkenntnisse abgesichert und zu einem Gesamtbild geformt werden.

Kernpunkt der Leitlinien ist neben einer allgemeinen Einführung und diversen Checklisten für die Praxis eine Entscheidungsmatrix, wie sie Abb. 12 auf Seite 87 zeigt, mit der nun für altlastenrelevante Fragestellungen die unterschiedlichen geophysikalischen Untersuchungsmethoden ausgewählt werden können.

Die Anwendung der Geophysik für einen konkreten Untersuchungsauftrag bedarf einer intensiven Zusammenarbeit zwischen Auftraggeber, Hydrogeologen und Geophysiker, die sich wie folgt beschreiben läßt:

1. Verfahrensvorauswahl durch den Auftraggeber anhand der "Leitlinien zur Geophysik an Altlasten". Abschätzung eines möglichen Kostenrahmens.
2. Zur Ausarbeitung einer sachgerechten und flexibel formulierten Leistungsbeschreibung Geophysiker hinzuziehen bzw. bei größerem Umfang Planungsauftrag erteilen.
3. Versand dieser Leistungsbeschreibung als Preisanfrage.
4. Auswahl einer Geophysikfirma mit entsprechenden Referenzen und freihändiger Vergabe.
5. Beauftragung mit Höchstpreisvertrag
6. Auswertung und Interpretation in enger Zusammenarbeit zwischen beauftragter Firma, Geophysiker und Hydrogeologe des Auftraggebers.
7. Berichtsabfassung.

Die Anforderungen an die Darstellungen in einem Bericht können wie folgt aufgelistet werden:

- Vorstellung des Gesamtuntersuchungsvorhabens
- Beschreibung der hydrogeologischen Situation
- Beschreibung der Teilmaßnahme "Geophysikalische Untersuchungen"
- Angabe der Störeinfluß- und Randbedingungen
- Beschreibung der Meßanordnung

- Abweichungen, Erkenntnisse bei der Durchführung der Messungen
- Interdisziplinäre Auswertung und Interpretation
- Anschauliche Ergebnisdarstellung in 3-D-Bildern, farbigen Flächenplänen etc.
- Diskussion der Erkenntnisse und Ergebnisse
- Beschreibung und Vorstellung der darauf aufbauenden Erkenntnisse
- Vorschlag für weitere Untersuchungen

Dieses Vorgehen garantiert, daß die vielfältigen Möglichkeiten der umweltgeophysikalischen Untersuchungsmethoden Zeit- und kostengünstig ausgeschöpft werden, wobei auch verschiedene Vergabegrundsätze der öffentlichen Hand wie auch Verordnungen anderer Art berücksichtigt werden.

0 Zusammenfassung

Die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Institut für Altlastensanierung, ließ in den Jahren 1988 und 1989 acht Modellstandorte von Altlasten in Baden-Württemberg untersuchen. Neben Geochemie, Biologie, Hydrogeologie, Bohrungen und Schürfen sind 59 geophysikalische Untersuchungen, überwiegend von Ingenieurbüros, durchgeführt worden. Es wurden dabei vorwiegend erprobte Methoden angewendet.

Ziel war außer der Lokalisierung von verdeckten Altlasten die Eingrenzung der Schadstoffverbreitung innerhalb und außerhalb der Altlasten. Von 12 Meßverfahren bewährten sich insbesondere die Geomagnetik und die Geoelektrik bzw. die Elektromagnetik.

Die Refraktionsseismik war erfolgreich bei der Bestimmung der Mächtigkeiten von lockeren Ablagerungen. Für die hochauflösende Reflexionsseismik zeichnete sich dagegen ab, daß ihre Anpassung an geringe Tiefen noch nicht abgeschlossen ist. Demgegenüber reichte die Eindringtiefe des gleichfalls hochauflösenden Bodenradars nicht immer aus.

Die Methoden der Induzierten Polarisation, des Eigenpotentials, der Gravimetrie und der Geothermik konnten bei speziellen Fragestellungen eingesetzt werden. Die Bohrlochmeßverfahren wurden möglichst in jeder Bohrung gefahren, um die physikalischen Eigenschaften des Mülls oder des Umfeldes festzulegen.

Insgesamt hat der Einsatz der zerstörungsfreien Geophysik an Altlasten die Erkundungskosten erheblich gesenkt, andererseits hat sich gezeigt, daß weitere Forschungen und Entwicklungen erforderlich sind, um die geophysikalische Erkundung von Altlasten und ihrer Schadstoffverteilung zu verbessern.

1 Einleitung

1.1 Vorbedingungen

Seit ca. 70 Jahren sind geophysikalische Verfahren hauptsächlich für die Prospektion von tief-
liegenden Lagerstätten der Kohlenwasserstoffe und Erze entwickelt und eingesetzt worden.
Heute steht hierfür nicht nur ein erprobtes und umfangreiches Instrumentarium zur Verfügung,
sondern es liegen auch diesbezüglich eingehende Erfahrungen in Auswertung und Interpretati-
on vor.

Mit zunehmendem Verbrauch mußte die Erkundung fossiler Energieträger und Erze in noch
größere Tiefen vordringen. Die Geophysik hat dabei mitgeholfen, den wachsenden Rohstoffbe-
darf unserer hochtechnisierten Zivilisation zu stillen.

Die Aufgabe, bei der Beseitigung der umfangreichen Rückstände verbrauchter Rohstoffe mit-
zuhelfen, ist dagegen neu für die Geophysik. Sie erfordert eine Neuorientierung, da nunmehr
die bisher störenden Oberflächeneffekte, welche die Signale der tiefliegenden Lagerstätten
maskierten, das Objekt der Messungen sind.

In dem Modellstandortprogramm (siehe Abschn. 1.2) sollten keine neuen geophysikalischen
Methoden entwickelt werden. Das umfangreiche und erprobte Instrumentarium der ange-
wandten Geophysik sowie große Erfahrungen in DV-Auswertung und Interpretation konnten
genutzt werden. Es war jedoch erforderlich die vorhandenen Verfahren an die neuen Frage-
stellungen der Altlastenerkundung anzupassen: z.B. mußten in der Geoelektrik und Seismik
sehr engmaschige Meßanordnungen angewendet werden, die präzise Aussagen für geringe
Tiefen erlauben.

Da geophysikalische Aussagen häufig vom Aufbau des geologischen Untergrunds und der hy-
drogeologischen Situation abhängen, müssen bei der geophysikalischen Interpretation geologi-
sche und hydrogeologische Erkenntnisse interdisziplinär berücksichtigt werden.

1.2 Zielsetzungen

Zur Erkundung und Bewertung von acht ausgewählten Modellstandorten sind umfangreiche
geophysikalische Untersuchungen durchgeführt worden. Ziel war es herauszufinden, welche
geophysikalischen Verfahren zur Lösung von Altlastenproblemen an verschiedenen Standorten
am besten geeignet sind und ob ihre Ergebnisse auf andere, ähnlich gelagerte Standorte über-
tragen werden können.

Es wurden mehrere Verfahren an einem Standort eingesetzt, damit ihre Effektivität und die
Grenzen einzelner Verfahren, sowie ihre günstigste Kombination ermittelt werden konnten. Für
jedes Verfahren sollte darüber hinaus der finanzielle und zeitliche Aufwand dem Ergebnis ge-
genübergestellt und kritisch bewertet werden.

Weiterhin waren, aufbauend auf diesen Ergebnissen an den Modellstandorten, weiterführende wissenschaftliche Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zur geophysikalischen Altlastenbearbeitung aufzuzeigen, die die noch offenbleibenden Fragen klären und zur Erweiterung der wissenschaftlichen Grundlagen der Altlastenerkundung beitragen könnten.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollten in Leitlinien zur Geophysik an Altlasten zusammengefaßt und allen fachlich Interessierten, namentlich den Behörden und den Sanierungsträgern, durch Veröffentlichung im Altlastenhandbuch Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt werden. Die Leitlinien dienen als Grundlage und praktische Entscheidungshilfe bei der Auswahl geeigneter geophysikalischer Verfahren bei der zukünftigen Erkundung von Altlasten.

1.3 Programmübersicht

Es wurden acht Modellstandorte in Baden-Württemberg ausgewählt, die beispielhaft sind. In Abb. 1 ist die geographische Lage der acht Standorte dargestellt. Sie unterscheiden sich durch folgende geophysikalisch relevante Merkmale :

- Standorttyp - nach Art des eingelagerten Materials
- geologisch/hydrogeologische Situation

In Tab. 1 sind die entsprechenden Merkmale der Modellstandorte aufgelistet.

Tab. 2 gibt einen Überblick über das gesamte geophysikalische Untersuchungsprogramm an den acht Standorten. Zwölf verschiedene geophysikalische Verfahren kamen dabei zum Einsatz. Insgesamt sind 59 Einzeluntersuchungen vorgenommen worden. Die einzelnen Methoden decken nicht immer das gesamte Untersuchungsgebiet ab. Zur Prüfung der Übertragbarkeit auf andere Standorte sind deshalb besondere Testbereiche ausgewählt worden.



Abb. 1: Geographische Lage der Modellstandorte

Standort- Merkmale	Art der Ablagerung		Geo- logie	Hydrogeologie (Aquifergestein)				Bemerkungen
	Hausmüll	Industriemüll Gaswerks- gelände	Festgestein Lockergestein	Tal- füllung eiszeitl. Kiese	Moräne	Malm	Gipskeuper	
BITZ	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>			<input type="radio"/>		Nähe zur Bebauung 2 Grundwasser- Stockwerke Nähe zur Bebauung 2 Grundwasser- Stockwerke
OSTERHOFEN	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>			
LEONBERG	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>			<input type="radio"/>		
MÜHLACKER	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>			<input type="radio"/>		
HERTEN	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
GEISLINGEN		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
MANNHEIM	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
KÜRZELL	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				

Tabelle 1: Standortmerkmale der Modellstandorte

Verfahren	Modell- standorte											
	Geomagnetik	Geoelektrische Kartierung	Widerstands- sondierung	Induzierte Polarisation	Eigenpotential- messung	Elektromagnetische Kartierung	Bodenradar	Refraktions- seismik	Reflexions- seismik	Gravimetrie	Geothermik	Bohrlochgeophysik
BITZ	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
OSTERHOFEN		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
LEONBERG	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
MÜHLACKER	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>
HERTEN			<input type="radio"/>					<input type="radio"/>	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>
GEISLINGEN	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				<input type="radio"/>
MANNHEIM	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>		<input type="radio"/>				<input type="radio"/>
KÜRZELL	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				<input type="radio"/>

Tabelle 2 : Geophysik-Programm an den Modellstandorten

1.4 Zusammenarbeit

Das Programm Geophysik an Modellstandorten wurde von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Institut für Altlastensanierung, (LFU) in Zusammenarbeit mit dem Geologischen Landesamt Baden-Württemberg (GLABW) erstellt. Das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung (NLfB) wurde vom GLABW im Rahmen der "Geowissenschaftlichen Gemeinschaftsaufgaben" beauftragt, eine zusammenfassende Auswertung der Meßergebnisse vorzunehmen. Das dafür erforderliche zusätzliche Personal ist von der LFU durch den Abschluß eines Vertrages mit dem NLfB finanziert worden.

Die Geländemessungen wurden von mehreren Ingenieurbüros und Behörden ausgeführt. An jedem Modellstandort wurde einem Ingenieurbüro die Koordination und Abwicklung aller geophysikalischen Messungen übertragen.

Ein wichtiges Nebenergebnis des Modellstandortprogrammes war, daß die Firmen und Ämter, die bisher noch nicht zusammengearbeitet hatten, an eine enge Zusammenarbeit bei dem Einsatz der Geophysik zur Altlastenerkundung herangeführt worden sind.

Durch das Programm sind nicht nur technologische Fortschritte erzielt worden, sondern der angewandten Geophysik wurde auch ein neues Arbeitsgebiet erschlossen.

2. Untersuchungsverfahren der Geophysik

2.1 Geomagnetik

Magnetische Vermessungen erfassen Anomalien des erdmagnetischen Feldes, die auf Magnetisierungskontraste der Gesteine oder auf magnetisierte Einlagerungen im Untergrund zurückzuführen sind.

Die Magnetisierung von Gesteinen oder von eisenhaltigem Müll setzt sich aus einem induzierten und einem remanenten Anteil zusammen. Die induzierte Magnetisierung wird durch das am Ort des Gesteins oder der Einlagerung herrschende äußere Erdmagnetfeld induziert und ist von dessen Richtung abhängig. Dagegen ist die remanente Magnetisierung dauerhaft und vom augenblicklichen Feld unabhängig. Magnetisierbar sind ferri- und ferromagnetische Minerale, meist Oxide und Sulfide des Eisens.

Die an der Erdoberfläche meßbaren magnetischen Effekte von magnetischen Körpern sind außer von deren Magnetisierung, Form und Größe insbesondere auch von ihrer Tiefenlage abhängig, denn das magnetische Feld nimmt mit zunehmender Entfernung mit der dritten Potenz ab. Es gilt z.B. für den Betrag des Feldes B einer homogen magnetisierten Kugel mit dem Betrag des Dipolmoments m auf der Dipolachse im Abstand r :

$$B = \frac{\mu_0 \cdot m}{2\pi} \cdot \frac{1}{r^3}$$

mit μ_0 : Permeabilität im Vakuum.

Hieraus folgt auch, daß sich die Form magnetischer Anomalien mit der Höhe über der Erdoberfläche ändert. Abb. 2 veranschaulicht diesen Effekt für den Fall einer Deponie mit mehreren Einlagerungen unterschiedlicher Größe und Magnetisierung: Während in geringer Höhe die Anomalien der einzelnen Körper einen unruhigen Kurvenverlauf hervorrufen, nehmen mit zunehmendem Abstand die kleinräumigen Anomalien in ihrer Amplitude rasch ab, so daß sich z.B. in 2 m Höhe glattere Kurven ergeben, in denen sich die Deponie als Ganzes abzeichnet.

Weiterhin ist die Form magnetischer Anomalien von der Inklination des Erdmagnetfeldes, d.h. von der geographischen Breite, abhängig. Dieses wird in Abb. 3 für eine kugelförmige Eisenschrottanhäufung mit induktiver Magnetisierung veranschaulicht. Der in Mitteleuropa mit Inklinationen zwischen 60° und 70° typische Kurvenverlauf ist dargestellt. Dieses Beispiel verdeutlicht, daß die Maxima und Minima der magnetischen Totalintensität („delta“ T) in Mitteleuropa nicht über der Mitte des magnetischen Körpers liegen. Ein normal magnetisierter Körper hat eine Anomalie mit einem Maximum im Süden und einem schwächeren Minimum im Norden. Dies ist bei Schürf- und Bohrarbeiten zu berücksichtigen.

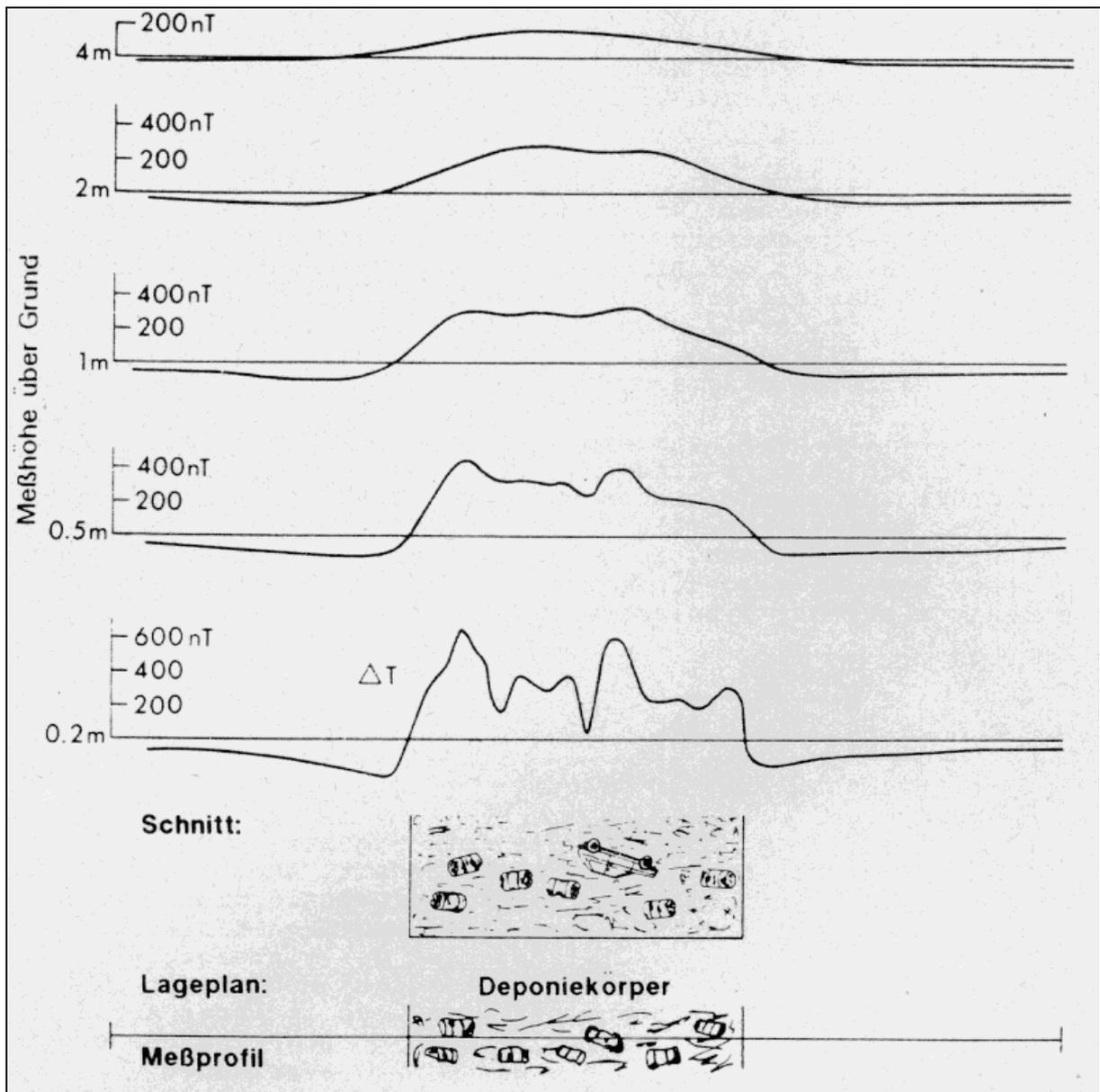


Abb. 2: Magnetische Anomalien in unterschiedlicher Höhe über Grund

Für magnetische Messungen stehen mehrere Instrumente zur Verfügung. Am gebräuchlichsten sind Protonenmagnetometer zur Messung der Totalintensität. Sie sind einfach zu handhaben und erlauben rasches Arbeiten. Durch eine Messung in zwei verschiedenen Niveaus über der Erdoberfläche (z.B. in 1 und 2 m Höhe) läßt sich die Änderung der Totalintensität mit der Höhe, d.h. der Vertikalgradient, ermitteln. Dieser erlaubt eine bessere Tiefenabschätzung.

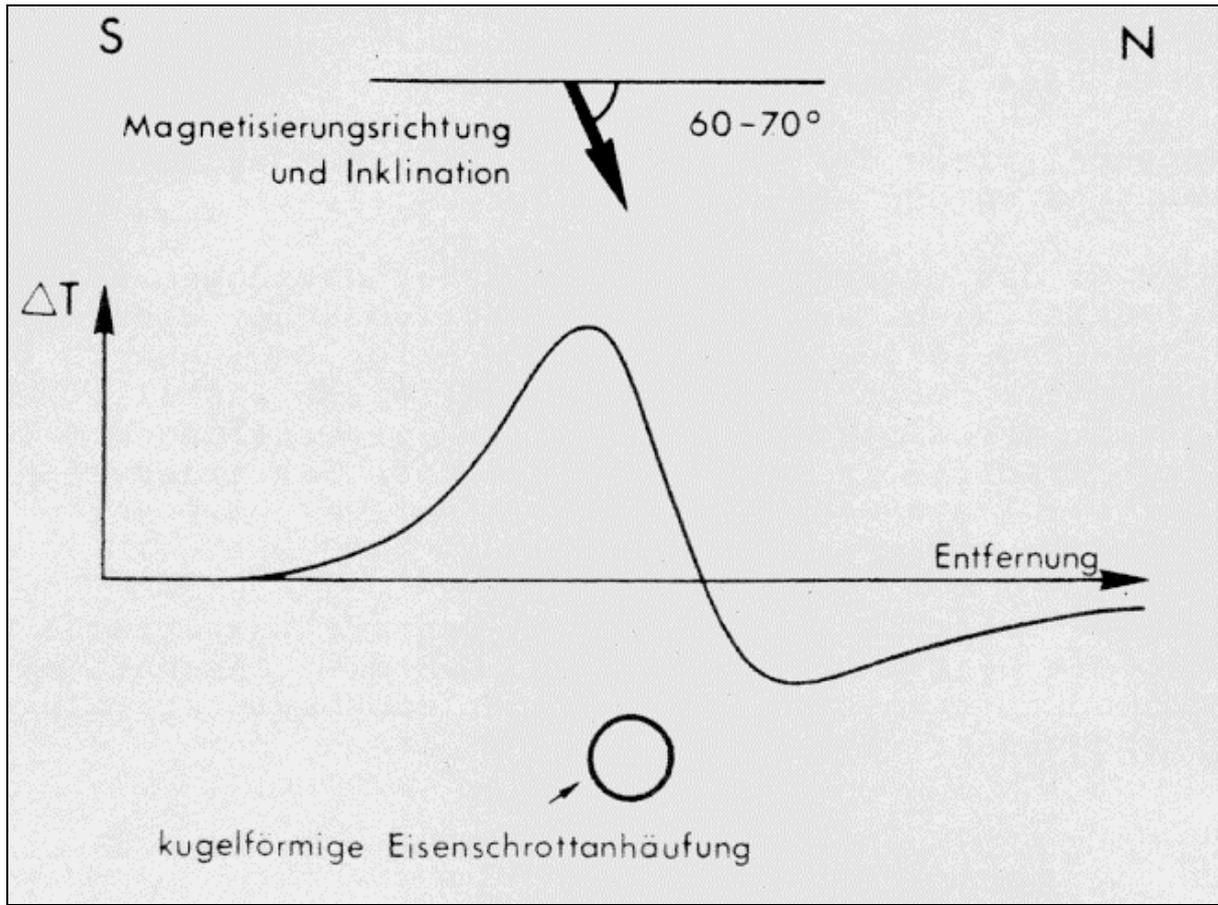


Abb. 3: Magnetisches Profil der Totalintensität ΔT über eine kugelförmige Eisenschrottanhäufung in Mitteleuropa

Bei Messungen an Deponien mit wenig Eisen müssen die tageszeitlichen Schwankungen des Erdmagnetfeldes berücksichtigt werden. Diese sollen durch fortlaufende Beobachtungen an einer festen Station erfaßt werden. Die Tagesvariationen werden eliminiert, indem die Differenz zu einem Bezugsniveau von den Feldmeßdaten abgezogen wird.

Die Geomagnetik eignet sich zur Lokalisierung, d.h. zur Bestimmung der randlichen Begrenzung einer Altlast, insbesondere von Hausmülldeponien mit hohem Eisenschrottanteil. Selbst in Bauschuttdeponien ist häufig so viel Eisen enthalten, daß die Geomagnetik erfolgreich angewendet werden kann.

Weiterhin können in Altlasten einzelne magnetisierte Einlagerungen, z.B. Metallfässer, Autoteile oder anderer Eisenschrott, identifiziert werden. Voraussetzung ist, daß das restliche Deponiematerial unmagnetisch ist. Das Verfahren versagt z.B. bei der Aufgabe, einzelne magnetische Gegenstände in einer Hausmülldeponie zu erkunden.

Größe und Ausdehnung der Anomalien bestimmen die erforderliche Meßdichte. Die Messungen sollten möglichst flächenhaft in einem engen quadratischen Meßraster mit Kantenlängen von 1-5 m durchgeführt werden. Für Übersichtskartierungen genügen größere Abstände. Der Meßpunktabstand sollte stets etwa der halben Erkundungstiefe entsprechen.

Die Messungen werden von magnetischen Installationen, wie Stromleitungen, Eisenpfosten oder Bauarmierungen, gestört, die im Meßnetz oder in der Nähe des Meßnetzes liegen.

Anwendungsbeispiele der Geomagnetik aus dem Modellstandortprogramm sind in den Abb. 4 bis 6 dargestellt.

Abb. 4 zeigt das Ergebnis geomagnetischer Messungen am Modellstandort Geislingen. Auf dieser Industriebrache, einem ehemaligen Gaswerksgelände, bestanden schwierige Bedingungen für die Geomagnetik durch die Gebäude, zahlreiche Installationen und den z.T. asphaltierten Boden. Die Registrierung der Totalintensität erfolgte in 1 und 2 m Höhe über der Erdoberfläche bei einem 1 x 1 m Meßraster für die niedrige und 2 x 2 m Raster für die größere Meßhöhe.

Trotz dieser Einschränkungen konnten mehrere magnetische Objekte geortet werden. Hieraus folgt, daß die Geomagnetik, auch in bebauten Gebieten, bei vorsichtiger und bewußter Interpretation, angewendet werden kann.

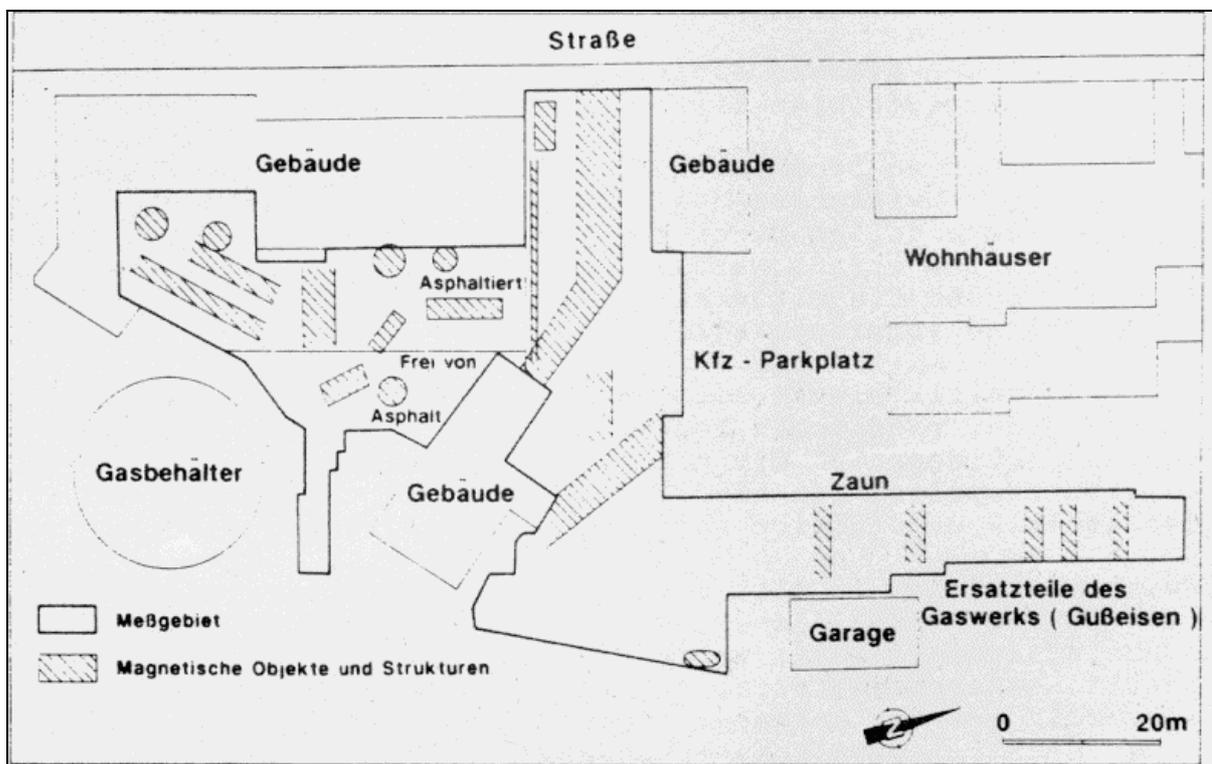


Abb. 4: Geomagnetische Messungen am Modellstandort Geislingen zur Erkundung magnetischer Objekte und Strukturen auf einem ehemaligen Gaswerksgelände (Untersuchungen: Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen, Karlsruhe; Koordination: INST. DR. JUNGBAUER + PARTNER, 1988/89)

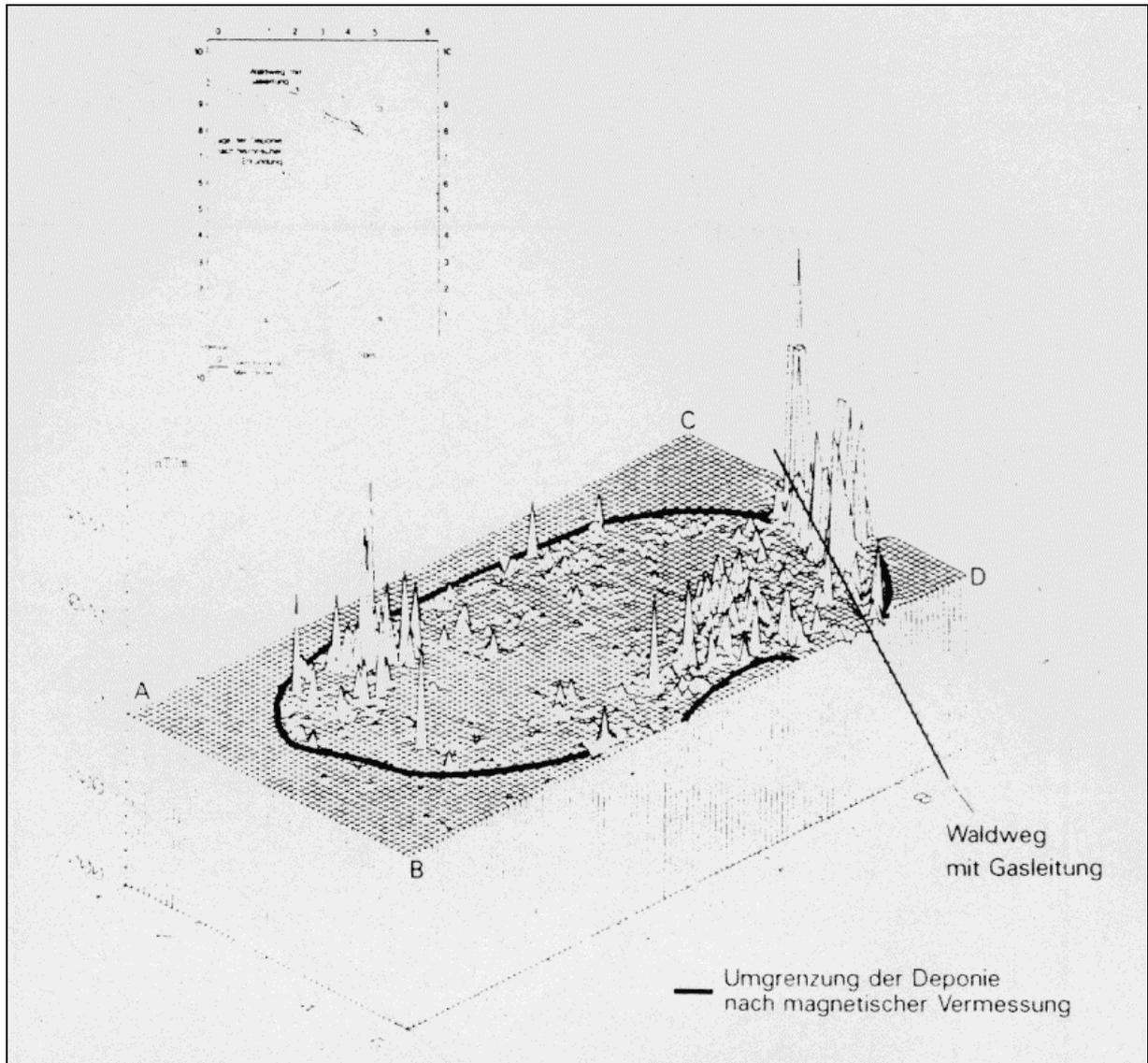


Abb. 5: Raumbild des Vertikalgradienten der magnetischen Totalintensität am Modellstandort Leonberg (Untersuchungen: THOR Geophysikalische Prospektion GmbH, Kiel; Koordination: LURGI/ OBERMEYER, 1988/89)

Die Ergebnisse einer Geomagnetik-Vermessung am Modellstandort Leonberg im 2 x 2 m Raster sind als Raumbild des Vertikalgradienten der magnetischen Totalintensität in Abb. 5 dargestellt. Der Gradient wurde aus zwei Messungen, ca. 1 und 2 m über der Oberfläche, errechnet. Eine leichte Häufung von schwachen Anomalien gibt Hinweise auf die randliche Begrenzung der Deponie. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß armierte Betonteile und anderes eisenhaltiges Material (Zäune, Maschendraht) verfüllt worden ist. Die sich so abzeichnende Umgrenzung stimmt gut mit der nach der historischen Erkundung rekonstruierten Lage der Deponie (siehe Lageplan) überein.

Sehr starke Anomalien sind wahrscheinlich auf lokale Konzentrationen von Eisenschrott, die nach dem Anomaliebild in zwei Abschnitten vorhanden sein müßten, und auf eine an einem Waldweg verlegte Gasleitung zurückzuführen.

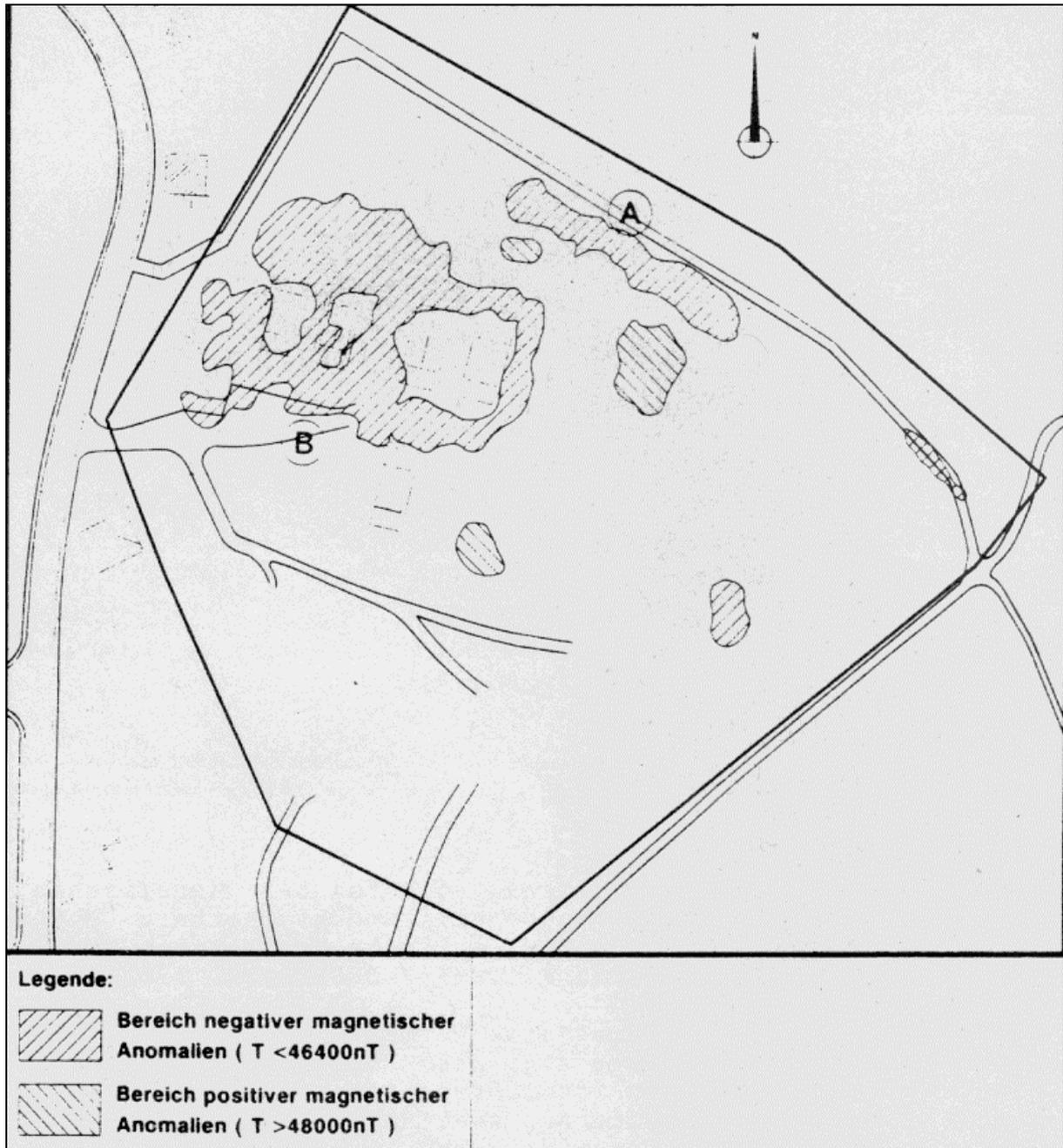


Abb. 6: Anomalien der magnetischen Totalintensität T am Modellstandort Bitz (Untersuchungen: Geophysik Consulting GmbH, Kiel; Koordination: VEDEWA, 1988/89)

Bei der geomagnetischen Vermessung am Modellstandort Bitz (Abb. 6), in einem quadratischen Raster mit einer Kantenlänge von 4 m, zeigt die starke Anomalie "A", im NW des Deponeerkörpers, eine größere Eisenansammlung an. Dieser Hinweis ist hier möglich, da in den anderen Teilen der Deponie nur wenig magnetische Einlagerungen vorhanden sind. Aus der historischen Erkundung ist bekannt, daß im NW Autoschrott abgelagert worden sein soll.

Die Anomalien "B" können auf die Eisenumzäunung der Tennisplätze zurückgeführt werden. Für die weiteren, kleinen Anomalien, die z.T. außerhalb der Deponie liegen, liegt noch keine schlüssige Erklärung vor.

Dieses Beispiel macht deutlich, daß eine Interpretation von magnetischen Anomalien nur bei genauer Kenntnis des Untersuchungsgebietes hinsichtlich Bebauung, Installationen etc. möglich ist.

2.2 Geoelektrik

2.2.1 Gleichstromverfahren

2.2.1.1 Allgemeines

Die Gleichstromverfahren der Geoelektrik machen sich die unterschiedlichen spezifischen elektrischen Widerstände der Minerale, Gesteine und der Inhaltsstoffe von Altlasten unter Verwendung künstlicher Gleichstromfelder zu Nutze. Die maßgebende Materialeigenschaft ist der spezifische elektrische Widerstand ρ , der in Ωm angegeben wird. Grundlage der Messungen ist das Ohm'sche Gesetz. Dieses beschreibt den Zusammenhang zwischen Stromstärke und Spannung, wenn durch einen räumlich begrenzten Leiter ein Gleichstrom fließt. Gegeben sei ein Quader mit dem Querschnitt q und der Länge b (Abb. 7). Ein Gleichstrom der Stärke I [A] fließe in Längsrichtung durch diesen Quader. Dann beträgt die Spannung U [V] zwischen den Enden des Quaders

$$U = I \cdot R$$

Die Größe R , der Ohm'sche Widerstand [*Ohm*], ist proportional der Länge b und umgekehrt proportional dem Querschnitt q des Leiters und enthält den spezifischen Widerstand ρ [*Ohm m*]. Es gilt

$$R = (b / q) \cdot \rho$$

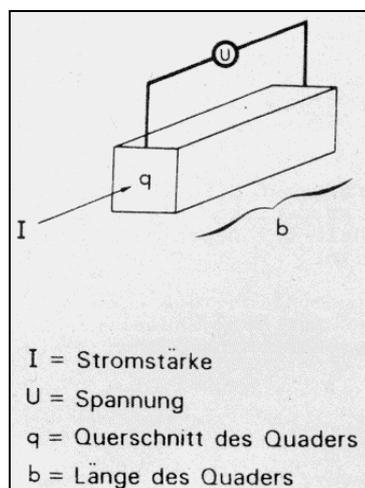


Abb. 7: Stromdurchgang in einem räumlich begrenzten Leiter

In verschiedenen Meßanordnungen wird dem Untergrund über zwei geerdete Metallelektroden ein Gleichstrom zugeführt, wodurch sich ein Potentialfeld ausbildet (Abb. 8). Dieses wird von der Verteilung des spezifischen Widerstandes im Untergrund bestimmt. Mit wachsendem Elektrodenabstand wird das Feld von tiefer liegenden Strukturen beeinflusst.

Aus der Messung des Potentialunterschiedes (= elektrische Spannung U) zwischen zwei geerdeten Sonden können Angaben über die Verteilung der spezifischen Widerstände und zugehöriger Strukturen im Untergrund abgeleitet werden.

Für die Darstellung und Auswertung geoelektrischer Meßergebnisse ist es üblich, das für einen beliebigen Untergrund gemessene Verhältnis Spannung U zu Stromstärke I unter Berücksichtigung der Elektroden- und Sondenabstände in den Wert des spezifischen Widerstandes umzurechnen, der für einen homogenen Halbraum gelten würde, d.h. für einen bezüglich des spezifischen Widerstandes vollkommen homogenen und unendlich ausgedehnten Untergrund mit ebener Oberfläche. Der so errechnete Wert wird als scheinbarer spezifischer Widerstand ρ_s bezeichnet.

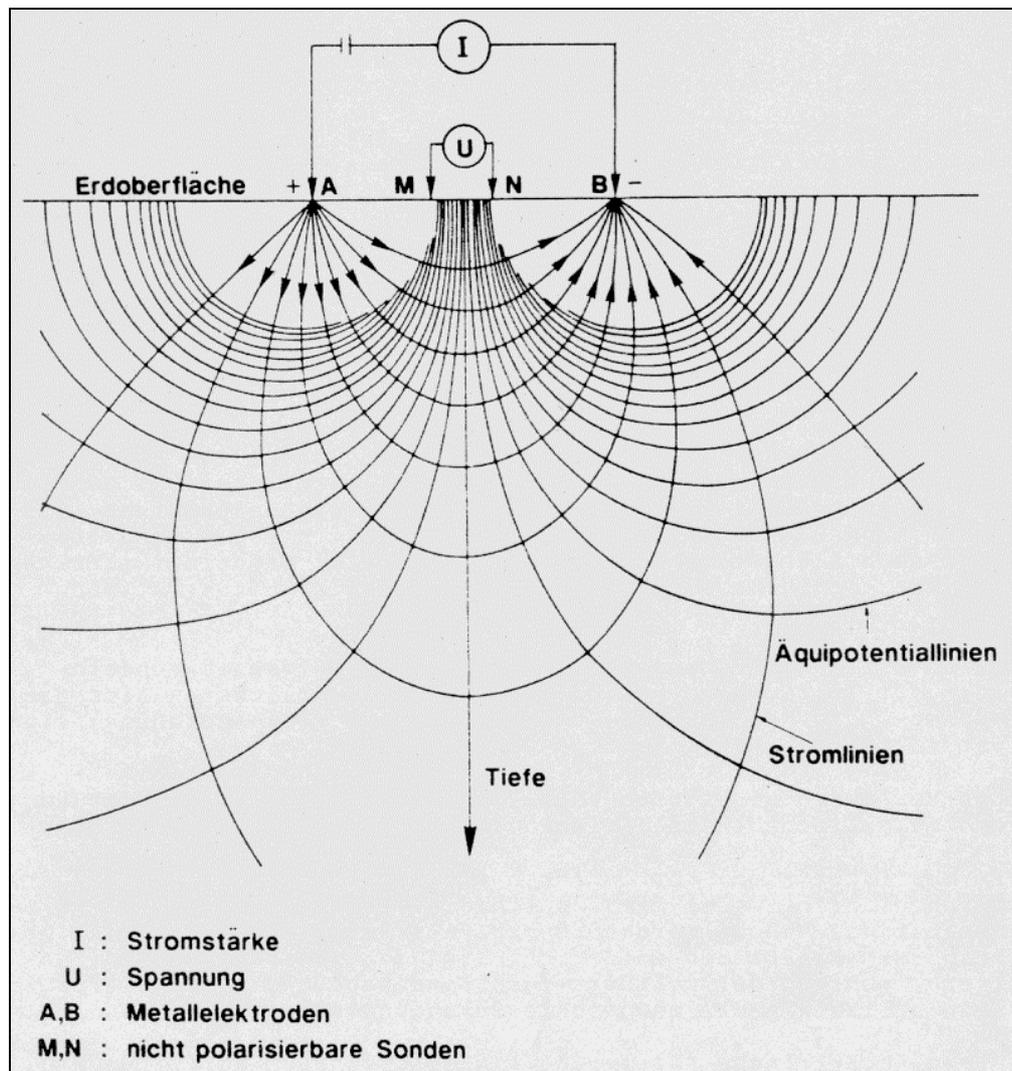


Abb. 8 : Meßprinzip der Gleichstromverfahren

Die geoelektrischen Gleichstromverfahren werden für zwei Zielrichtungen eingesetzt:

1. Geoelektrische Kartierung: Ermittlung der horizontalen Widerstandsverteilung in bestimmten Tiefeniveaus.
2. Widerstandssondierung oder geoelektrische Tiefensondierung: Ermittlung des Widerstandes und der Mächtigkeit horizontaler Schichten in vertikaler Richtung.

2.2.1.2 Geoelektrische Kartierung

Es werden laterale Unterschiede des scheinbaren spezifischen Widerstandes für einen bestimmten Tiefenbereich festgestellt (z.B. für die randliche Begrenzung eines Deponiekörpers oder einer Einlagerung). Dies geschieht, indem die Potentialdifferenzen in einer festen Anordnung zwischen den Elektroden und Sonden gemessen werden und diese Anordnung entlang einer Meßlinie ständig umgesetzt wird. Das Ergebnis wird als Profil oder Isolinienkarte dargestellt.

Von vielen möglichen Meßanordnungen sollte diejenige ausgewählt werden, die nur die Deponie erfaßt und nicht in den Untergrund eindringt. Die geoelektrische Kartierung kann auf diese Weise zur Lokalisierung einer Altlast, d.h. zur Erfassung ihrer randlichen Begrenzung, eingesetzt werden, wenn die im Bereich von Altlasten häufig auftretenden niedrigen spezifischen Widerstände (Größenordnung 5 - 50 *Ohm* m) vom Nebengestein abweichen. Dies trifft zu bei Kiesen und Sanden mit Widerständen in der Größenordnung 100 - 2 000 *Ohm* m, nicht aber bei Tonen und Mergeln, weil letztere ähnliche Widerstände besitzen (Größenordnung 2 - 40 *Ohm* m). Auch der Nachweis von Deponieinhaltsstoffen mit abweichenden Widerständen, z.B. Sande mit sehr hohen oder Schlämme mit sehr niedrigen Widerständen, ist möglich.

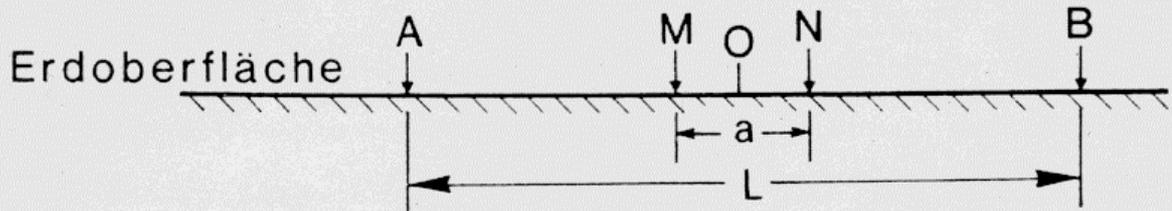
Durch die Meßanordnung wird nicht nur das Ergebnis sondern auch der Zeitaufwand beeinflusst. Am gebräuchlichsten sind die Wenner-, die Dipol-Dipol- und die Schlumberger-Anordnung; sie werden schematisch in Abb. 9 wiedergegeben.

Das Verfahren wird durch metallische Leitungen im Untergrund und metallische Installationen im Meßgebiet beeinträchtigt.

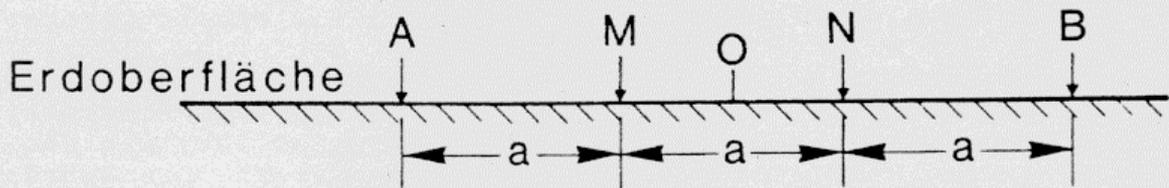
Es empfiehlt sich, Kartierungen mit mehreren Eindringtiefen durchzuführen, wobei diese durch die Vergrößerung der Elektrodenabstände erhöht werden können. Als Faustregel gilt: der Abstand der Elektroden entspricht etwa der zweifachen Eindringtiefe, während der Meßpunkt- und Sondenabstand etwa so groß sein sollte wie die gewünschte Erkundungstiefe.

Die geoelektrische Kartierung eignet sich auch zur Erkundung des geologischen Untergrundes im Umfeld einer Altlast. Z.B. können in Lockergesteinen Grundwasserleiter, wie z.B. wasser-gesättigte Sande und Kiese, mit relativ hohen spezifischen Widerständen von Grundwasserstauern, wie z.B. Tonen und Mergeln, mit niedrigen spezifischen Widerständen abgegrenzt werden. Die Existenz von wasserundurchlässigen Schichten sowie Sickerwege von Schadstofflösungen können ggf. nachgewiesen werden.

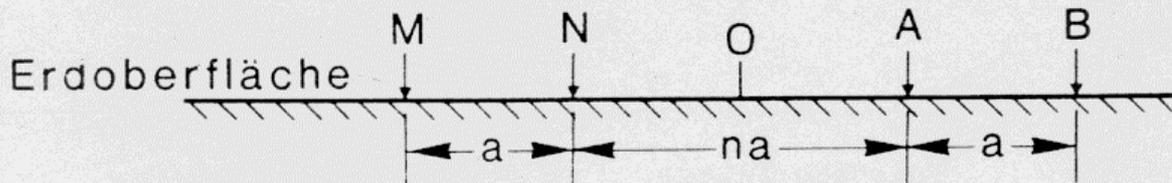
Schlumberger – Anordnung :



Wenner – Anordnung :



Dipol – Dipol – Anordnung :



- A,B = Metallelektroden (Stahlstäbe)
M,N = nicht polarisierbare Sonden
(Filterkerzen mit Kupfersulfatlösung gefüllt)
- $L = \overline{AB}$ = Elektrodenabstand
 $a = \overline{MN}$ = Sondenabstand
O = Meßpunkt

Abb. 9: Meßanordnungen bei geoelektrischen Kartierungen und Widerstandssondierungen

Ergebnisbeispiele von geoelektrischen Kartierungen an den Modellstandorten sind in Abb. 10 und 11 dargestellt.

Eine geoelektrische Kartierung auf dem Deponiegelände am Modellstandort Osterhofen, mit einem halben Elektrodenabstand $L/2 = 5$ m, zeigt, daß auf dem Deponiekörper sehr niedrige scheinbare spezifische Widerstände gemessen werden (Abb. 10). Im Zentrum der Deponie ergeben sich Minimalwerte $< 15 \text{ Ohm m}$, während zu den Rändern hin die Werte konzentrisch zunehmen.

Erstaunlich ist, daß trotz der Vielfalt der Widerstände der in diese Hausmülldeponie eingelagerten Abfallstoffe eine derartig homogene Widerstandsverteilung gemessen worden ist. Vermutlich sind die einzelnen Müllkomponenten so klein, daß bereits in dieser Detailvermessung ein integrierender Effekt zu beobachten ist.

Auch die geoelektrische Kartierung am Modellstandort Leonberg im $7,5 \times 7,5$ m Raster in Wenner-Anordnung mit einem Elektrodenabstand $a = 5$ m zeigt in Übereinstimmung mit dem Ergebnis in Osterhofen, daß der Deponiekörper durch geringe scheinbare spezifische Widerstände $< 20 \text{ Ohm m}$ gekennzeichnet ist, während in der Umgebung Widerstände $> 50 \text{ Ohm m}$ gemessen werden. Die Umgrenzung der Deponie kann demzufolge aus der Kartierung abgeleitet werden.

Als Hinweise auf bevorzugte Abstromrichtungen für Sickerwässer werden gerichtete Zonen mit geringen Widerständen am Rand der Deponie angesehen. Diese Vermutung bedarf jedoch noch weiterer Untersuchungen auch an anderen Altlasten, um sie abzusichern.

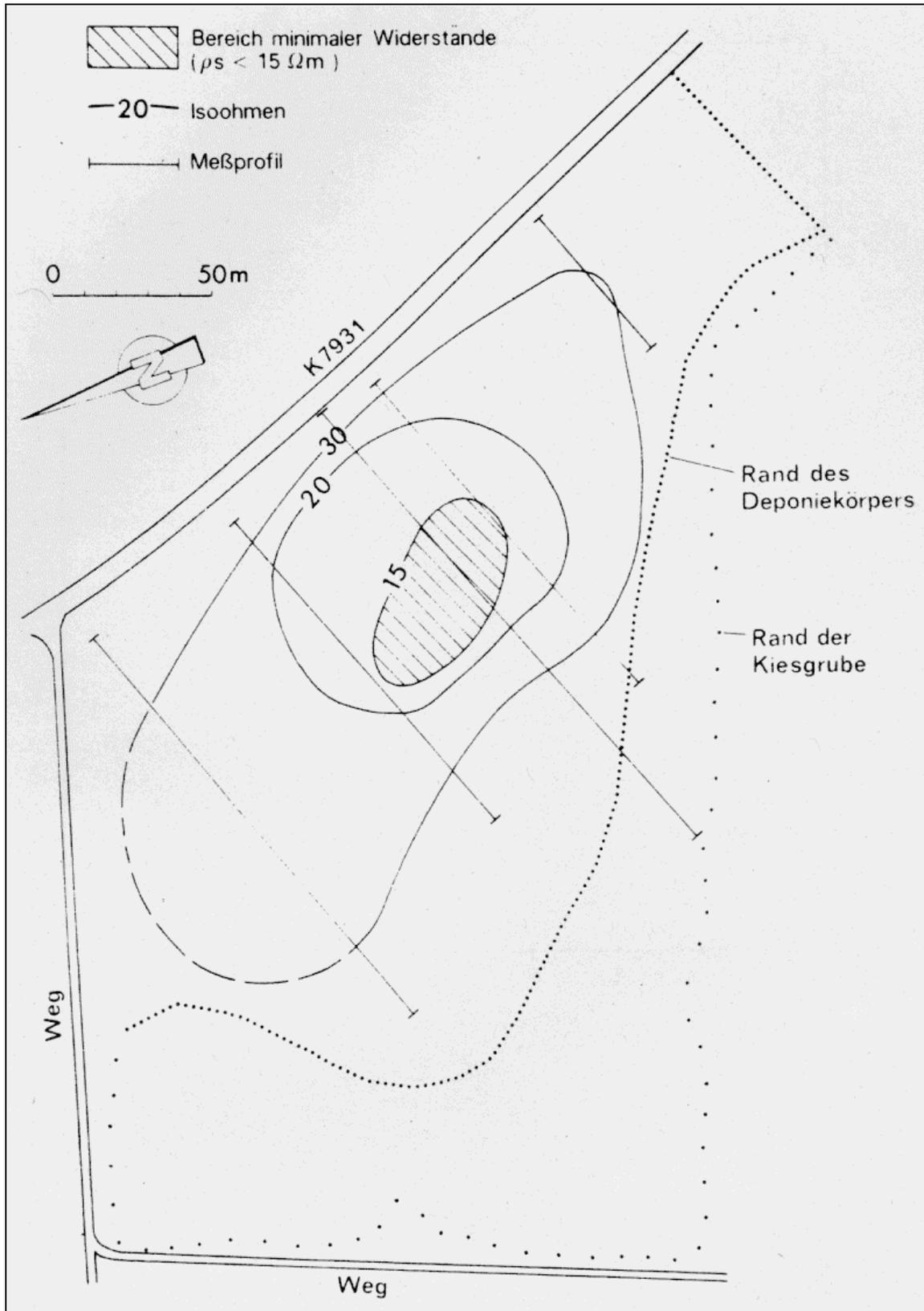


Abb. 10: Isolinienkarte des scheinbaren spezifischen Widerstandes p_s nach geoelektrischer Kartierung am Modellstandort Osterhofen (Untersuchungen: R. Buchholz Büro für Ingenieurgeophysik, Heiligenberg; Koordination: TGU, 1988/89)

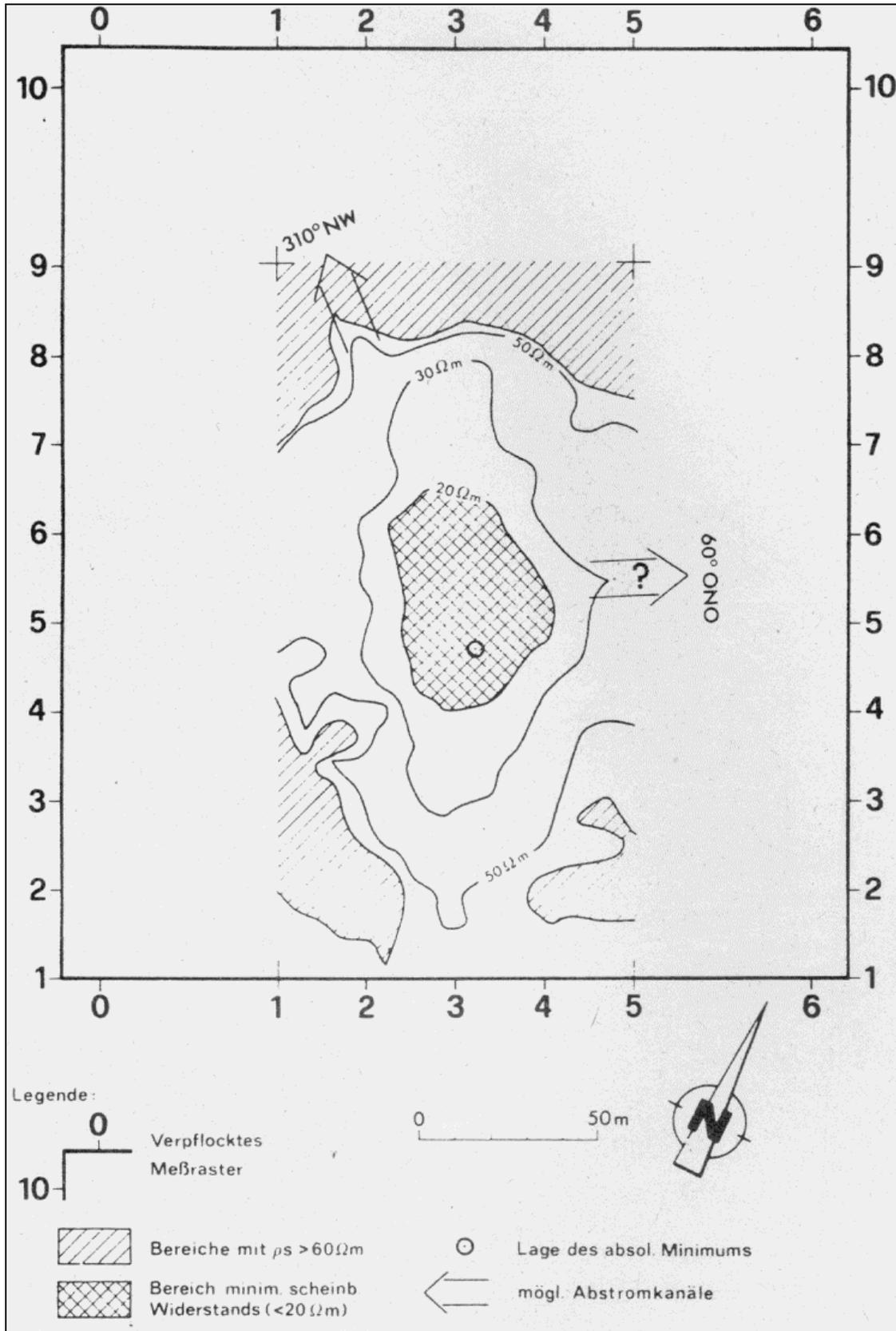


Abb. 11: Isolinienkarte des scheinbaren spezifischen Widerstandes ρ_s nach geoelektrischer Kartierung am Modellstandort Leonberg (Untersuchungen: THOR Geophysikalische Prospektion GmbH, Kiel; Koordination: LURGI / OBERMEYER, 1988/89)

2.2.1.3 Widerstandssondierung

Die scheinbaren spezifischen Widerstände von mehr oder weniger horizontal gelagerten Schichten und ihre Mächtigkeiten, und damit die Tiefenlagen der Schichtgrenzen, sind die Ergebnisse von Widerstandssondierungen.

Es wird eine Vierpunkt-Anordnung verwendet, bei der ein stationäres elektrisches Feld künstlich erzeugt und in der sog. "Schlumberger-Anordnung" (siehe Abb. 9, Abschn. 2.2.1.2) gemessen wird. Über zwei gut geerdete Elektroden wird dem Untergrund ein Gleichstrom zugeführt mit der Stromstärke I . Die Potentialunterschiede U werden zwischen zwei eng benachbarten Sonden, die sich in der Mitte der Meßanordnung befinden, gemessen. Um eine Aussage über die Tiefenlage einzelner Schichten machen zu können, sind viele Einzelmessungen mit unterschiedlichen Elektrodenabständen L erforderlich.

Aus Stromstärke I , Spannung U und einem Geometriefaktor K wird der scheinbare spezifische Widerstand ρ_s berechnet:

$$\rho_s = K \cdot U / I \text{ [Ohm m]}$$

$$K = \pi/a \cdot [(L/2)^2 - (a/2)^2]$$

mit:

L =Elektrodenabstand

a = Sondenabstand.

Die scheinbaren spezifischen Widerstände ρ_s werden auf doppeltlogarithmischen Papier als Funktion aller gemessenen halben Elektrodenabstände ($L/2$) dargestellt und zu einer "Sondierungskurve" verbunden (Abb. 12).

Die Auswertung der Sondierungskurven ergibt die Anzahl der Schichten, die Schichtmächtigkeiten und die Schichtwiderstände durch einen Vergleich mit Modellkurven (Hilfspunktverfahren) oder durch die Anwendung von DV-Programmen (z.B. INGESO, einem Inversionsverfahren).

Die Widerstandssondierung unterliegt zwei Einschränkungen:

1. Dem Prinzip der Schichtunterdrückung: Geringmächtige Schichten zeichnen sich u.U. nicht in den Sondierungskurven ab.
2. Dem Äquivalenzprinzip: Die Auswertung einer Sondierungskurve liefert in der Regel mehrere äquivalente Lösungen, aus denen diejenige, welche den Schichtaufbau des Untergrundes am besten wiedergibt, ausgewählt werden muß. Das geschieht durch Korrelation benachbarter Sondierungen und unter Berücksichtigung geologisch/hydrogeologischer Gesichtspunkte. Diese interdisziplinäre Auswertung liefert außerdem Anhaltspunkte, ob einzelne Schichten unterdrückt worden sind.

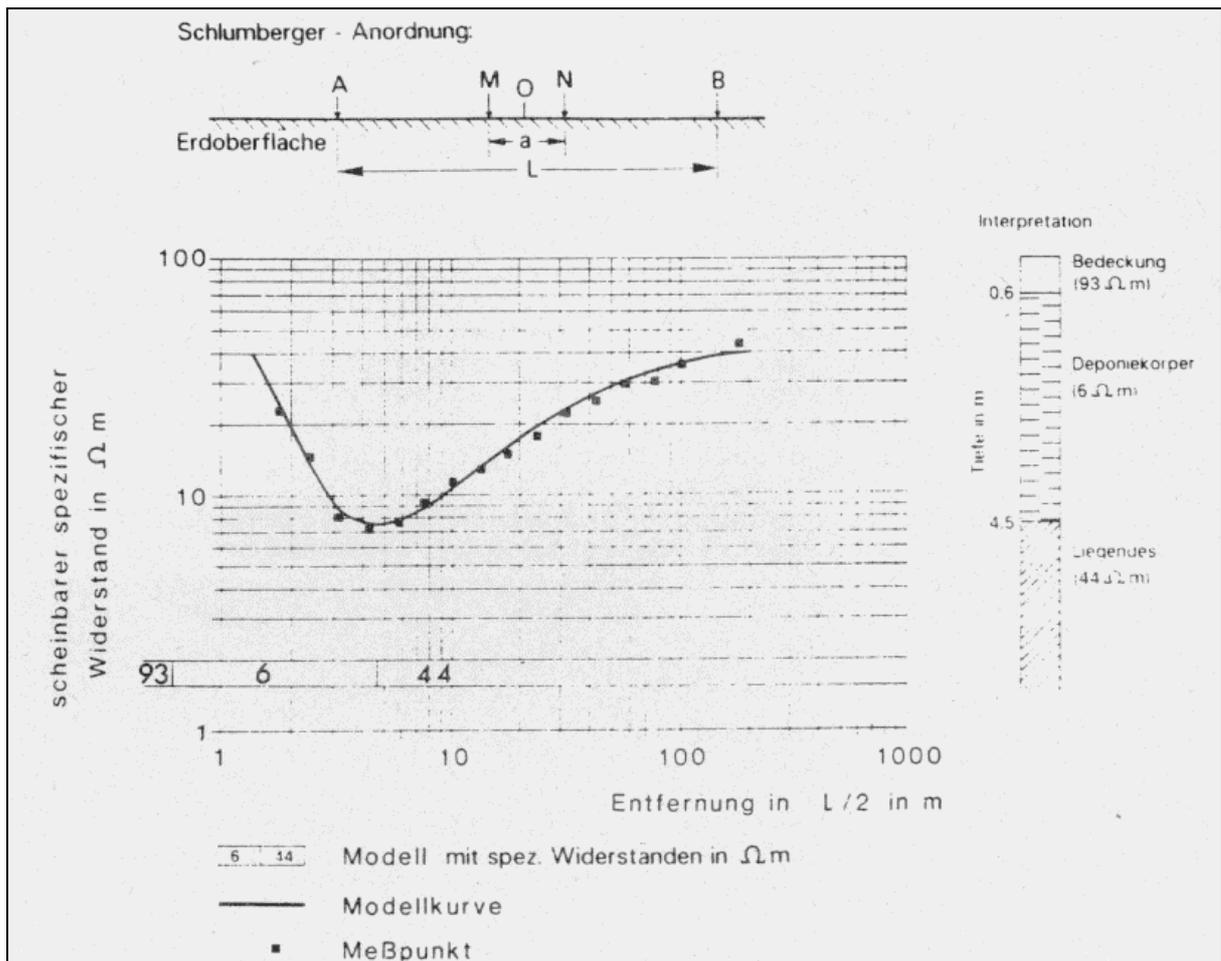


Abb. 12: Beispiel für eine Sondierungskurve und Interpretation mit elektronisch berechneter Modellkurve nach einer Widerstandssondierung in Schlumberger-Anordnung am Modellstandort Mannheim

Aus den Ergebnissen der Einzelauswertungen von Sondierungskurven werden dann geoelektrische Profilschnitte oder Tiefenlinienpläne konstruiert, in denen alle erkennbaren Schichtwiderstände und Schichtmächtigkeiten enthalten sind.

Wenn das Meßgebiet keinen homogenen, horizontal geschichteten Untergrund aufweist, treten störende Seiteneffekte auf, die eine Auswertung verhindern. Im Modellstandortprogramm sind jedoch unerwartet homogene Widerstandsverteilungen, z.B. für Hausmülldeponien, nachgewiesen worden. Deshalb können auch für die Schichtmächtigkeiten und Widerstandswerte in derartigen Deponien Angaben abgeleitet werden.

Hinsichtlich der Untersuchung allgemeiner geologisch/hydrogeologischer Gegebenheiten im Umfeld einer Altlast gelten die selben Anwendungsbereiche wie bei der geoelektrischen Kartierung (vgl. Abschn. 2.2.1.2).

Abb. 13 und 14 zeigen Anwendungsbeispiele für Widerstandssondierungen im Rahmen des Modellstandortprogramms.

Abb. 13 zeigt die Ergebnisse von Widerstandssondierungen zur Erkundung der hydrogeologischen Verhältnisse des Deponieumfeldes am Modellstandort Osterhofen in Form einer Isolinien- und Isoliendarstellung der Basis des Grundwasserleiters, unter Einbeziehung der Ergebnisse von Pegelbohrungen. Die Basis bildet die Schichtgrenze zwischen Kiesen mit geringem Schluffanteil (scheinbare spezifische Widerstände 700-2 500 Ω m) und Beckentonen bzw. Geschiebemergeln (scheinbare spezifische Widerstände 20-150 Ω m).

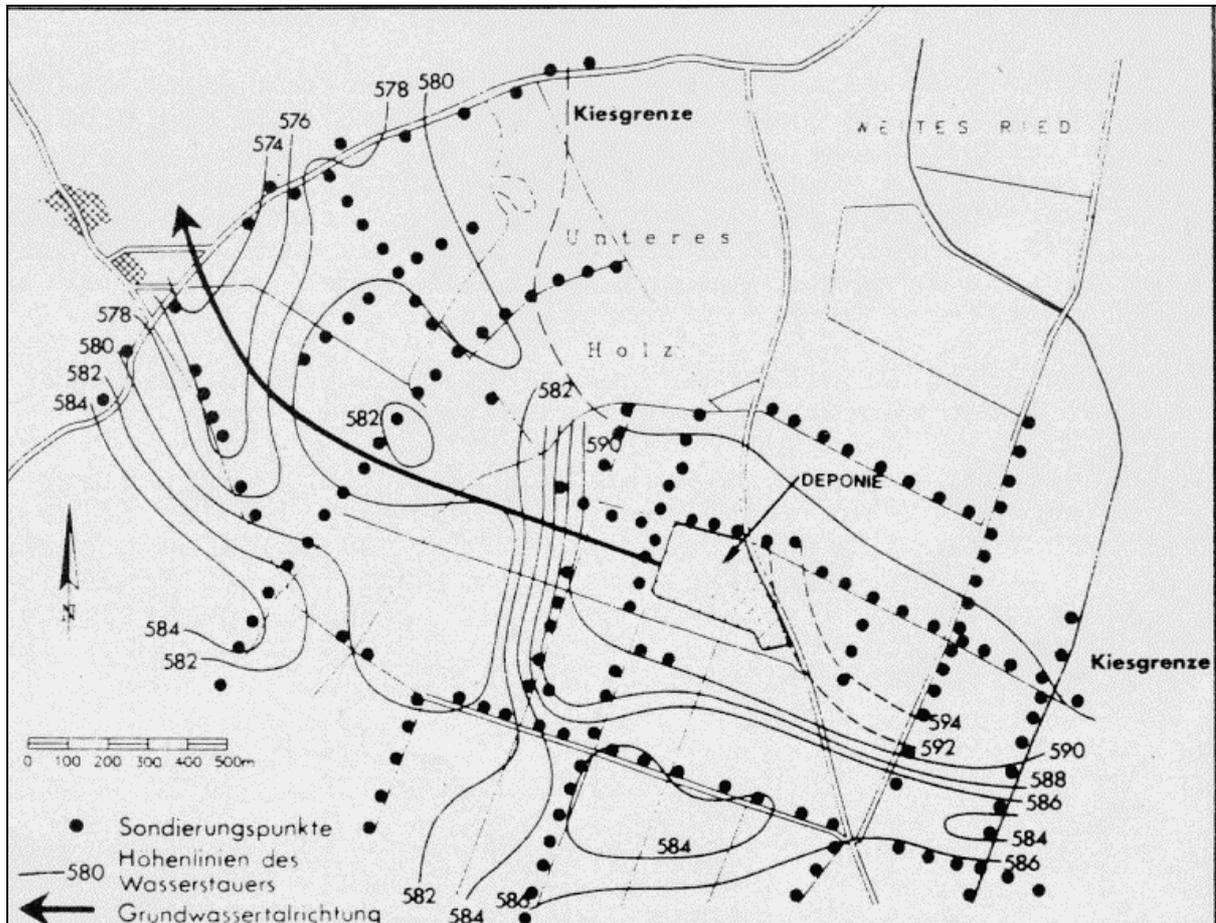


Abb. 13: Isolinienplan der Basis des Grundwasserleiters nach Ergebnissen von Widerstandssondierungen am Modellstandort Osterhofen (Untersuchungen: R. Buchholz Büro für Ingenieurgeophysik, Heiligenberg; Koordination: TGU, 1988/89)

Die Widerstandssondierungen wurden in Hummel-Anordnung mit maximaler Auslage von 160 m, entlang von insgesamt 9 Meßprofilen mit einer Gesamtlänge von 17 km, durchgeführt. (Die Hummel-Anordnung unterscheidet sich von der Schlumberger-Anordnung durch eine halbierte Auslage der Elektroden, d.h. daß nur eine Elektrode versetzt wird, während die zweite in großer Entfernung vom Sondierungspunkt festgehalten wird.)

Im Ergebnis dieser Arbeiten, dem Isolinienplan, ist westlich der Deponie eine Stufe der grundwasserstauenden Schicht von 8 m Höhe zu erkennen, danach folgt zunächst ein WNW gerichtetes Tal, das am NW-Rand des untersuchten Gebietes nach N umbiegt. Sickerwässer der Deponie oder, falls vorhanden, Schadstoffahnen, müßten dieser Senke folgen.

Das Beispiel zeigt, daß sich mit Widerstandssondierungen das Relief des Grundwasserstauers ermitteln läßt, worin sich die Talwege abzeichnen. Schadstoffahnen können auf diese Weise auch dann verfolgt werden, wenn sie nicht salinar sind, d.h. geoelektrisch nicht direkt erfaßt werden können.

Widerstandssondierungen in Schlumberger-Anordnung mit Maximalauslagen von 130 m wurden auf dem Deponiegelände des Modellstandortes Mannheim und der Umgebung durchgeführt. Abb. 14a und b zeigen die doppeltlogarithmisch aufgetragenen Widerstandswerte und darunter ihre Auswertung nach dem Inversionsverfahren für zwei Sondierungspunkte. Ergebnisse von 10 Sondierungen in Form von Säulendiagrammen wurden in Abb. 14c zu einem geoelektrischen Profil zusammengestellt.

Die Widerstandssondierungen auf dem Deponiekörper zeigen gegenüber denen der Umgebung ein anderes Bild:

Außerhalb der Deponie, z.B. am Punkt 17E (Abb. 14a), liegt eine Sondierungskurve mit einem Maximum vor, d.h. es folgt zur Teufe auf die niederohmige Bodenschicht (90 *Ohm* m) eine hochohmige, ca. 10 m mächtige Schicht (650 *Ohm* m), die nassen Sanden und Kiesen zugeordnet wird. Darunter liegt wieder eine Schichten mit niedrigen Widerständen (ca. 50 *Ohm* m), die als Abfolge von sandigen und tonigen Schichten gedeutet wird.

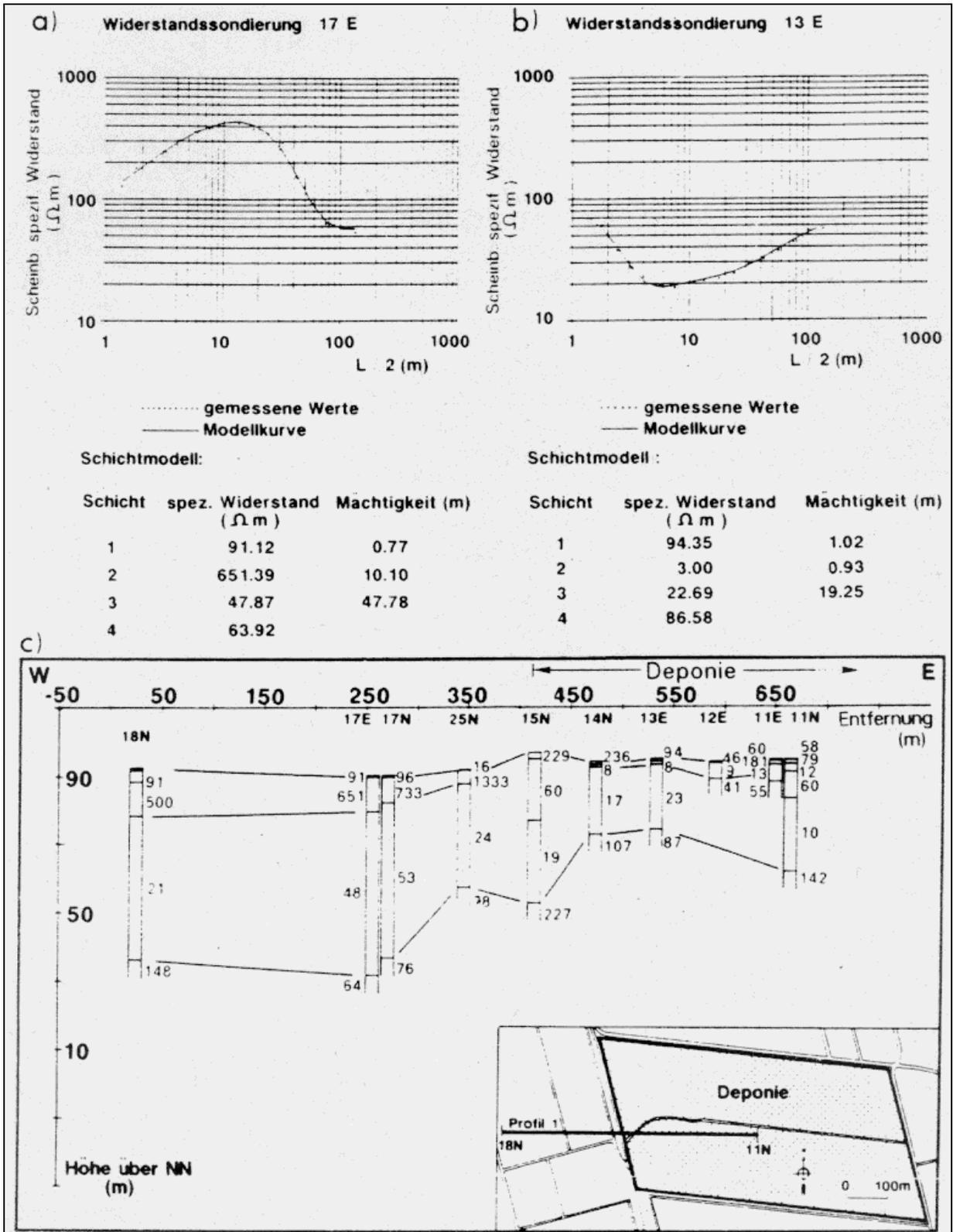


Abb. 14 : Ergebnisse von Widerstandssondierungen in Schlumberger-Anordnung am Modellstandort Mannheim (Untersuchungen: Geophysik Consulting GmbH, Kiel; Koordination: RÖVER + PARTNER / TAUW, 1988/89), (a) Sondierungskurve und Schichtenmodell am Punkt 17E außerhalb der Deponie, (b) Sondierungskurve und Schichtenmodell am Punkt 13E auf dem Deponiekörper, (c) Geoelektrisches Profil

Dagegen besitzen die Sondierungen auf dem Deponiekörper Minimumkurven: Unter dem Punkt 13E (Abb. 14b) liegt zunächst eine abdeckende Schicht mit 94 *Ohm* m. Darunter folgen 2 Ablagerungen mit sehr niedrigen Widerständen (8-20 *Ohm* m), die dem Deponiematerial zuzuordnen sind. Die liegenden Schichten der Deponie haben wieder höhere Widerstände (> 80 *Ohm* m).

Aus dem Geoelektrik-Profil (Abb. 14c) geht hervor, daß diese Unterschiede zwischen Umfeld und Deponie bei allen Sondierungen auftreten. Außerdem streuen die Widerstände und Mächtigkeiten in der Deponie mehr als im Umfeld. Insgesamt beweist diese geoelektrische Untersuchung, daß auch bei ähnlichen Widerständen im Müll und in Schichten des Umfeldes durch die Profildarstellung der Widerstandssondierungen Abgrenzungen möglich sind.

Darüber hinaus helfen Widerstandssondierungen die Lage besonderer Müllkomponenten zu bestimmen. In diesem Beispiel ist zu vermuten, daß die Widerstände zwischen 180 und 230 *Ohm* m innerhalb der Deponie von Gießereisanden hervorgerufen werden, deren Einlagerung aus der historischen Erkundung bekannt ist.

2.2.1.4 Induzierte Polarisation

Die Methode der Induzierten Polarisation (IP) beruht auf der Um- und Anlagerung von Ionen und Elektronen an Wänden oder Grenzflächen des Porensystems im mikroskopischen Bereich der Gesteine in einem Gleich- oder Wechselstromfeld. Die dabei entstehende Aufladung bzw. ihre Entladung sind die Meßparameter des Verfahrens. Folgende Prozesse sind für die Altlastenerkundung wichtig:

1. Metallische Polarisation in Gegenwart von Mineralen mit metallischer Stromleitung und hohem Glanz.
2. Grenzschichtpolarisation als ein Effekt der elektrischen Doppelschicht im Porenraumreich.

Die metallische Polarisation tritt an metallischen oder mit Metall überzogenen Einlagerungen auf. Sie erzeugt starke IP-Anomalien. Die Grenzflächenpolarisation tritt an Grenzflächen zwischen Mineralen und Flüssigkeiten auf. Sie bringt nur schwache IP-Anomalien hervor, die von Effekten der metallischen Polarisation überlagert werden können. In salinaren Wässern geht jede Aufladung verloren. Dies kann als Anzeichen einer Versalzung von Grund- oder Sickerwässern gedeutet werden.

Zur IP-Messung wird dem zu untersuchenden Untergrund über zwei Elektroden Strom zugeführt, worauf sich eine Aufladung einstellt. Diese verschwindet nach Abschalten des Stroms nicht sofort, sondern klingt langsam ab. Durch mehrfache Messungen der Spannung zwischen zwei Sonden in verschiedenen Zeitabständen wird eine Abklingkurve registriert, woraus sich die Meßgröße Aufladefähigkeit M ableiten läßt. Sie ist der Mittelwert über ein Zeitintervall der Abklingkurve. Häufig werden drei bzw. sechs Einzelabschnitte der Kurve getrennt registriert. Danach wird der Gleichstrom wieder eingeschaltet, aber umgepolt, damit Restaufladungen wieder gelöscht werden. In Abb. 15 sind diese Vorgänge graphisch dargestellt.

Der Verlauf der Abklingkurve ist sowohl von der Höhe des Primärstromes als auch vom Bau des Untergrundes abhängig. Der erste Zeitabschnitt nach dem Abschalten verläuft nach den Gesetzen der Elektrodynamik. Induktionsvorgänge durch das Abschalten des Aufladestroms bestimmen die Spannungsverteilung im Untergrund. Man beginnt deshalb mit der Messung der Abklingkurve erst nach ca. 10-30 ms.

Bei jeder IP-Messung wird die Eingangsspannung V_p zur Berechnung des scheinbaren spezifischen Widerstandes nach

$$\rho_s = K \cdot V_p / I \text{ [Ohm m]}$$

eingesetzt. Das Verfahren beinhaltet demzufolge eine Widerstandsmessung ohne zusätzlichen Zeit- und Kostenaufwand, so daß dieser Aufwand bei jeder IP-Messung eingespart werden kann.

Die gemessenen Abklingspannungen betragen im allgemeinen nur 1% der Primärspannung V_p . Wenn sie unter das Niveau industrieller Störspannungen absinken, ist es erforderlich, hohe Primärströme einzuspeisen, um ungestörte Abklingkurven zu erzielen.

Häufig wird die Dipol-Dipol-Meßanordnung bei IP-Messungen eingesetzt. Ihre Vorteile liegen in ihrer Symmetrie: die IP-Körper befinden sich in der Regel im Zentrum der Anomalien, es können Hinweise auf das Einfallen abgeleitet werden, der mit Starkstrom gespeiste Elektrodendipol ist leichter überwachbar und kann gegen Unbefugte abgeschirmt werden.

Die Aussagetiefe und das Auflösungsvermögen der IP-Messungen hängen von der Dipollänge a und dem Abstand ($n \cdot a$) der beiden Dipole ab (Abb. 15). a sollte mindestens das Doppelte und höchstens das 10-fache der erwarteten Mächtigkeit des gesuchten Körpers betragen, um eine gute Auflösung zu erzielen. Die Wahl des Dipolabstandes bestimmt die geometrische Eindringtiefe mit

$$d \sim a \cdot (n+1) / 2$$

Üblich sind die Dipolabstände $n = 1$ bis $n = 6$. Man kann indessen die Dipolabstände solange erweitern bis das verschlechterte Signal/Störverhältnis exakte Messungen verhindert.

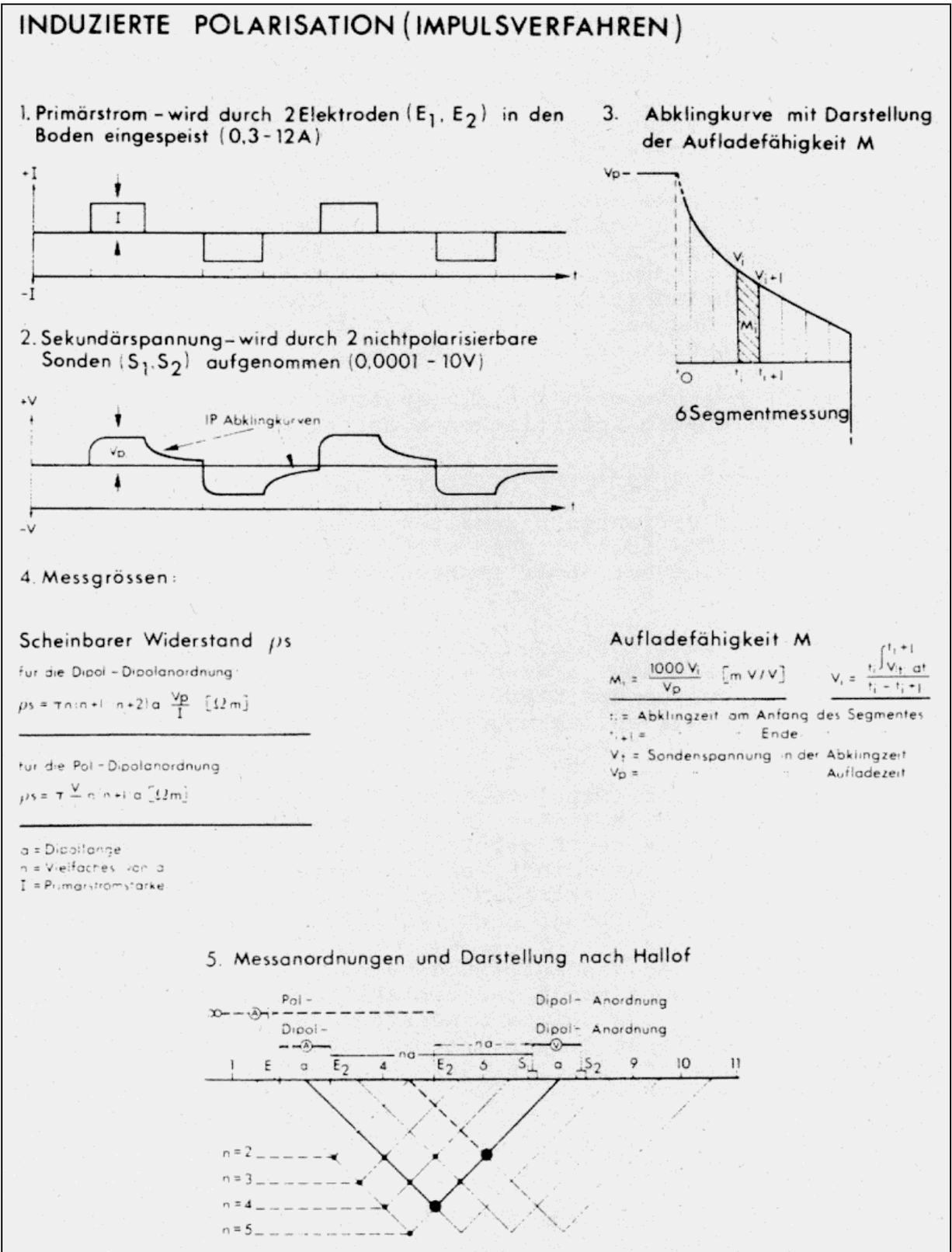


Abb. 15: Meßprinzip der Induzierten Polarisation

Die IP-Rohmeßdaten der Dipol-Dipol-Anordnung werden umgerechnet in den scheinbaren spezifischen Widerstand p_s , die Aufladefähigkeit sowie den Abklingkoeffizienten und in Pseudoprofilen dargestellt. Diese stellen lediglich eine graphische Veranschaulichung der o.g. Parameter dar, aus denen gewisse Angaben über Form und Ort der IP-Körper abgeleitet werden können, die indessen keine direkten Vergleiche mit geologischen Profilen ermöglichen (Abb. 15).

Anwendungsgebiete der IP-Messungen sind die Abgrenzung von Altlasten zum umgebenden Bodenmaterial und die Erfassung von polarisierbaren Einlagerungen sowie die Verfolgung von salinaren Kontaminationsfahnen im Umfeld.

Abb. 16 und 17 zeigen Anwendungsbeispiele von IP-Messungen im Rahmen des Modellstandortprogramms.

Die Ergebnisse der Messungen der Induzierten Polarisation am Modellstandort Leonberg in Dipol-Dipol-Anordnung mit 5 verschiedenen Dipolabständen (von 12,5 m bis 62,5 m) sind als Pseudoprofile in Abb. 16 für ein typisches Meßprofil dargestellt. Besonders auffällig ist ein Bereich extrem hoher Aufladungen > 100 mV/V in den unteren Niveaus im NNW des Profils.

Die Aufladefähigkeit zeigt eine völlig andere Anordnung als die Widerstände, die hier von ca. $25 \Omega\text{m}$ bis auf über 50 Ohm m ansteigen. Da aus der historischen Erkundung bekannt ist, daß in diese Deponie galvanische Schlämme eingelagert worden sind, wird vermutet, daß diese die Ursache dieser speziellen Anomalien sind. Diese Schlämme liegen wahrscheinlich am NE-Rand der Deponie.

Der Einsatz der IP hat in Leonberg zusätzliche Erkenntnisse über spezielle Einlagerungen vermittelt, die mit keiner anderen geophysikalischen Untersuchungsmethode gewonnen werden könnten.

Das Ergebnis einer IP-Messung am Modellstandort Osterhofen ist in Abb. 17 dargestellt. Die Meßwerte der IP, d.h. die Aufladefähigkeiten M_2 , für das Meßniveau $n=5$ (Dipolabstand 50 m) sind im Gegensatz zu den niedrigen Widerständen im Deponiebereich im allgemeinen sehr hoch und sinken im Nebengestein erheblich ab (Abb. 17a). Es zeigen sich bestimmte Bereiche mit maximalen Aufladefähigkeiten, d.h. die IP erzielt in dieser Hausmülldeponie eine bessere Auflösung als die geoelektrische Kartierung (vgl. Abb. 10).

Abb. 17b und c zeigen die IP-Ergebnisse in der üblichen Pseudoprofil-Darstellung für zwei Meßlinien über dem Deponiekörper. In Abb. 17b sind Bereiche minimalen Widerstands sowie maximaler Aufladefähigkeiten schraffiert hervorgehoben. Auch in dieser Profildarstellung tritt die stärkere Gliederung der IP-Anomalien gegenüber den Widerständen hervor.

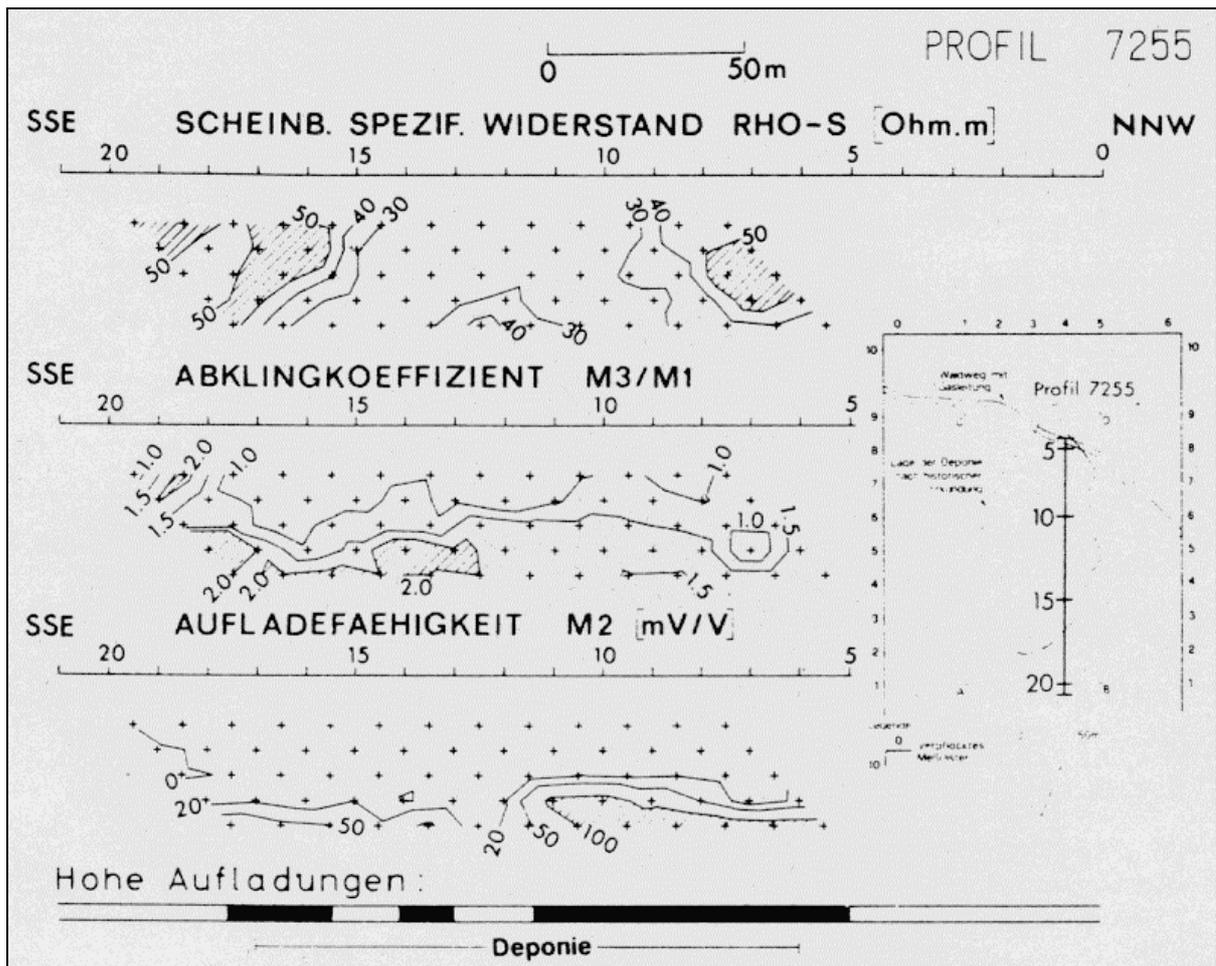


Abb. 16: Pseudoprofil-Darstellung einer IP-Messung in Dipol-Dipol-Anordnung mit 5 verschiedenen Dipolabständen (von 12,5 bis 62,5 m) am Modellstandort Leonberg (Untersuchungen: NLfB, Hannover; Koordination: LURGI / OBERMEYER, 1988/89)

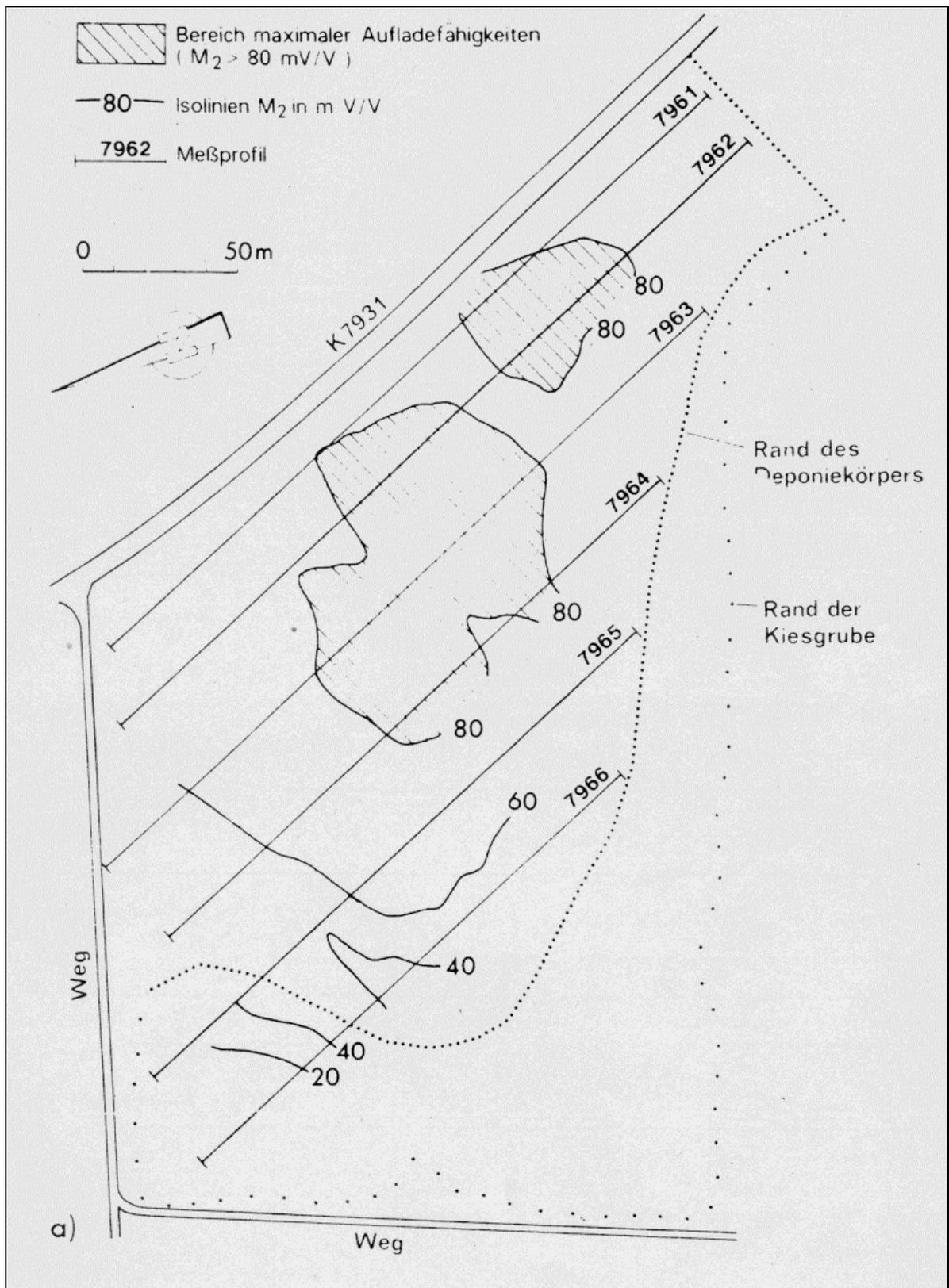


Abb. 17: Ergebnis von IP-Messungen in Dipol-Dipol-Anordnung mit 5 verschiedenen Dipolabständen von 10 bis 50 m am Modellstandort Osterhofen (Untersuchungen: NLF, Hannover; Koordination: TGU, 1988/89), a) Isolinienkarte der Aufladefähigkeit M_2 für das Meßniveau $n=5$ (Dipolabstand 50 m)

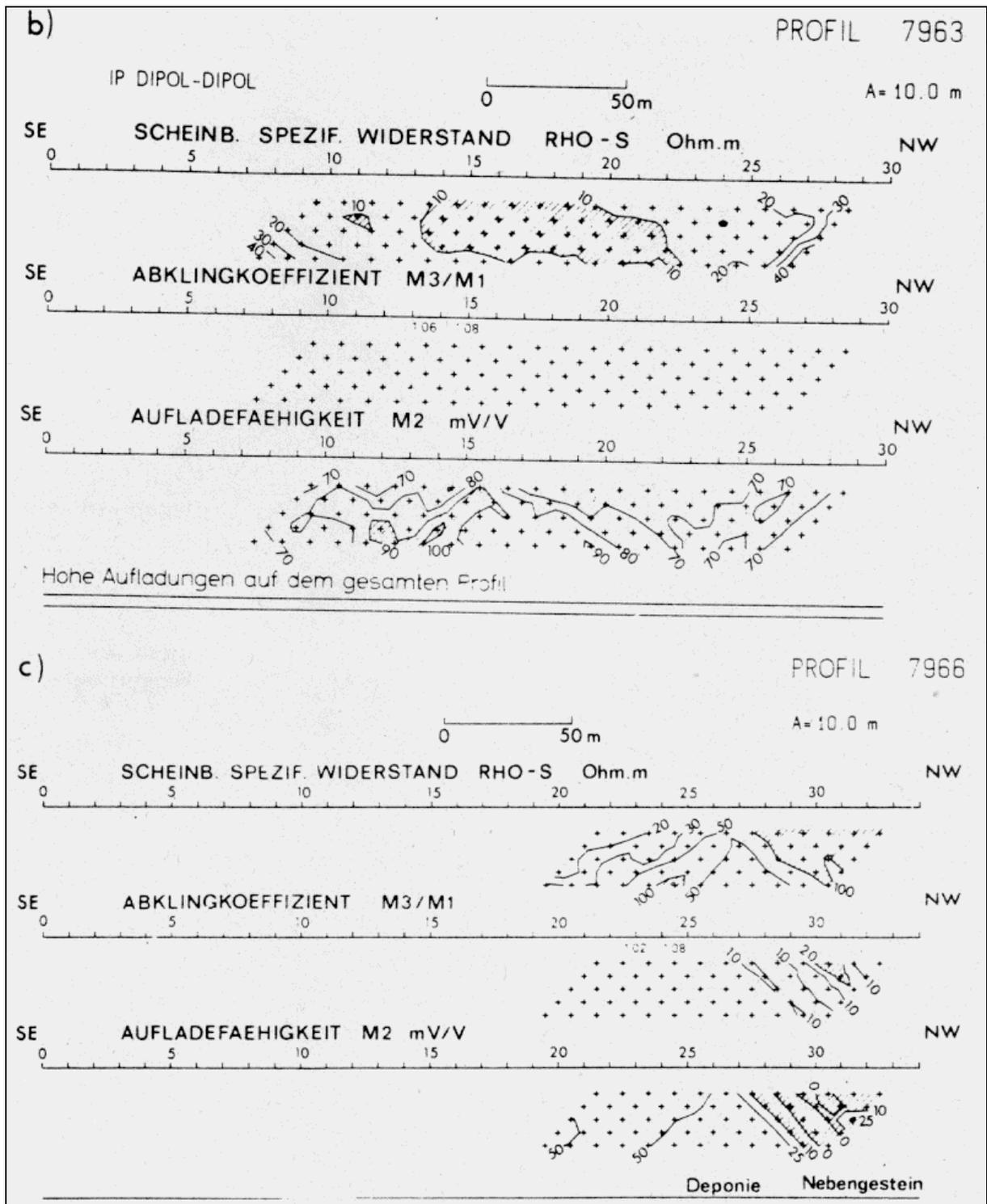


Abb. 17: b) Pseudoprofil-Darstellung für Meßprofil 7963, c) Pseudoprofil-Darstellung für Meßprofil 7966

Allerdings ist nicht bekannt, welches Material diese besonders hohen Aufladefähigkeiten besitzt. Die Beantwortung dieser Frage erfordert die Kenntnis der elektrischen Widerstände und der Aufladefähigkeiten unterschiedlicher Mülltypen, die noch nicht vorliegt und erst durch weitere Messungen über Deponien und/oder an Müllproben in Labors erarbeitet werden sollte.

Abb. 17c zeigt die charakteristische Veränderung der Meßwerte beim Übergang von der Deponie zum trockenen Kies als Nebengestein: der scheinbare spezifische Widerstand steigt von ca. 20 *Ohm* m auf > 100 *Ohm* m, die Aufladefähigkeiten fallen von Werten > 50 mV/V bis ins Negative ab.

Hieraus ergibt sich, daß es mittels IP-Messungen möglich ist, Hausmüll vom Nebengestein zu unterscheiden. Diese Möglichkeit besteht auch dann, wenn die elektrischen Widerstände gleich sein sollten.

2.2.1.5 Eigenpotentialmessung

Natürliche elektrische Gleichstromfelder (Eigenpotentiale) bzw. deren Potentialverteilung an der Erdoberfläche können Hinweise über Inhomogenitäten im Untergrund liefern.

Eigenpotentiale (EP), nach dem englischen Ausdruck *self potential* oft auch mit *SP* abgekürzt, entstehen bei elektrochemischen Prozessen, die sich zwischen dem Gestein und dem Grundwasser bzw. Gesteinsfluiden abspielen.

Zu unterscheiden ist zwischen Potentialen, die auf statische Kontakte bei Reduktions- und Oxidationsvorgängen zurückzuführen sind (Redox-Potentiale) und Potentialen, die mit der Bewegung von Wässern oder Gasen im Boden zusammenhängen (Fließ- bzw. Strömungspotentiale). Sie werden durch Grundwasserbewegungen, z.B. durch das Versickern von Niederschlags- oder Deponiewässern, hervorgerufen. Die Redox-Potentiale sind im allgemeinen viel größer (20 → 100 mV) als die Fließpotentiale (1-10 mV).

Abb. 18 zeigt schematisch verschiedene Eigenpotentialanomalien, die im Bereich einer Altlast auftreten können.

Das Verfahren kann bedingt zur Erfassung von oxydierenden Metalleinlagerungen oder von Fließvorgängen im Untergrund eingesetzt werden. Die ineinandergreifenden elektrochemischen und elektrokinetischen Wechselwirkungen führen jedoch dazu, daß die Interpretation der Meßergebnisse schwierig ist. Die Methode kann deshalb z.Zt. im Altlastenbereich nur qualitative Übersichtskennntnisse vermitteln.

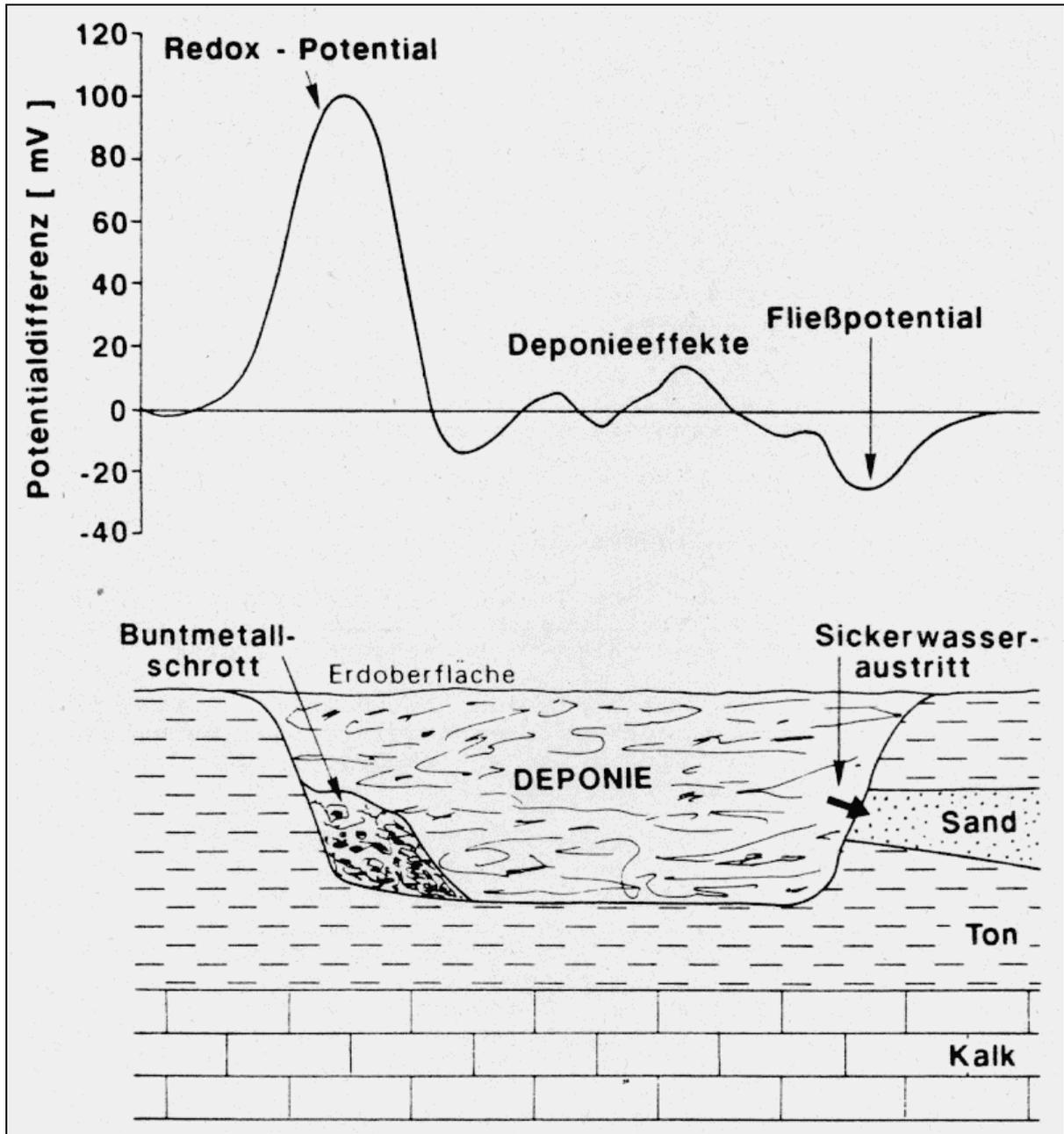


Abb. 18: Schematische Darstellung verschiedener EP-Anomalien über einer Altlast

Die EP-Messung ist technisch einfach. Sie besteht aus einer Spannungsmessung zwischen zwei unpolarisierbaren Sonden, wobei eine Sonde als Referenzelektrode dient, die in einem elektrisch ungestörten Gebiet in den Boden gesteckt wird. Mit der zweiten Sonde, die als Wander-sonde entlang eines Profils versetzt wird, werden Betrag und Vorzeichen der jeweiligen Potentialdifferenz gegen die Festelektrode bestimmt. Von Vorteil ist die gleichzeitige Registrierung vieler Sonden in kurzen Zeitabständen (Scannermethode), die zur Eliminierung der kurzzeitigen Störspannungen führt, die häufig in Industrienähe auftreten.

Das Ergebnis einer EP-Messung am Modellstandort Bitz zeigt Abb. 19.

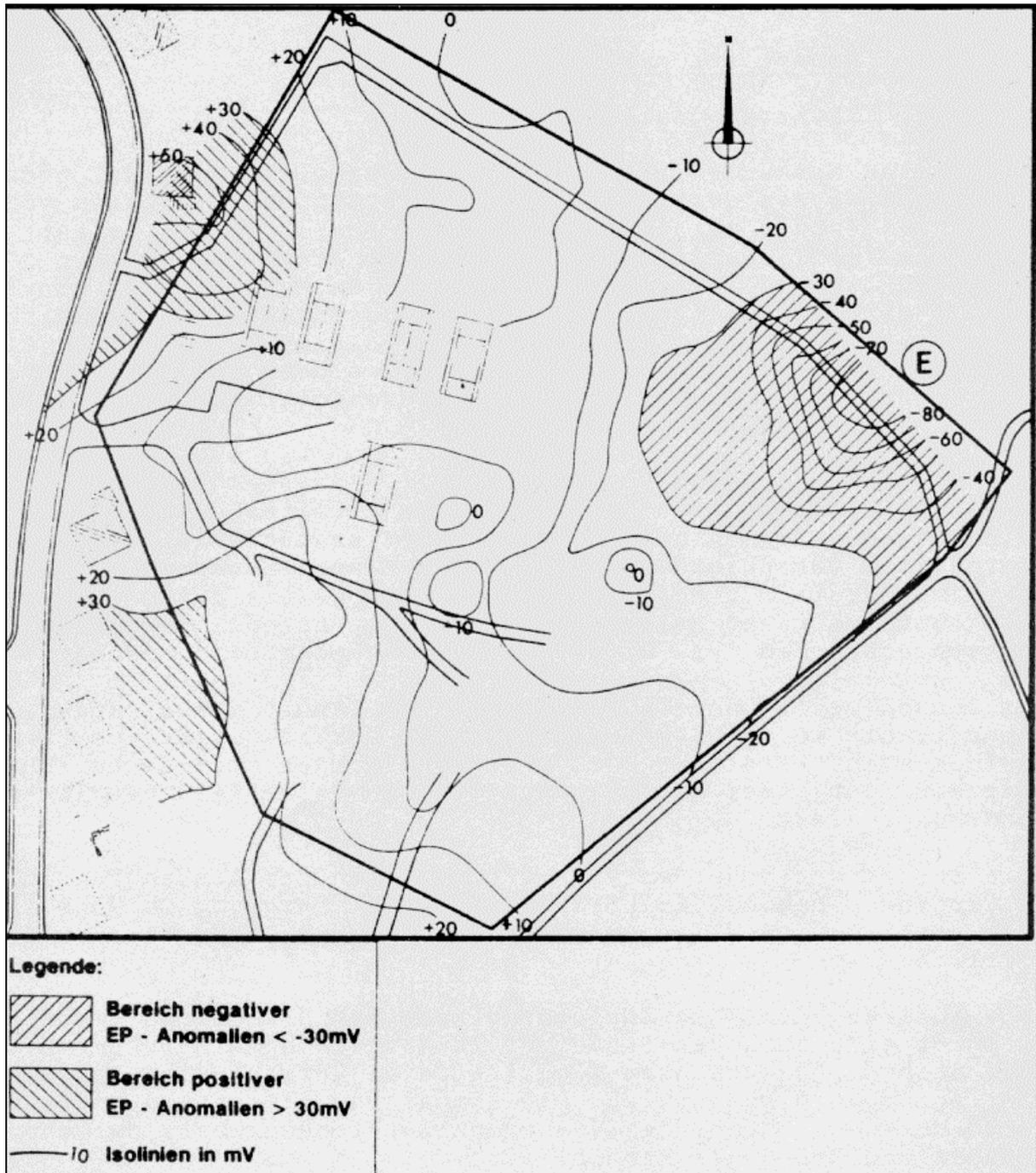


Abb. 19: Isolinien des elektrischen Eigenpotentials am Modellstandort Bitz (Untersuchungen: Geophysik Consulting GmbH, Kiel; Koordination: VEDEWA, 1988/89)

Die Messung in einem 15 x 15 m Raster ergab eine starke negative Anomalie bis -80 mV in Form eines nach Osten absinkenden Minimums (Bereich "E"), das nicht mit der Oberflächenmorphologie und - nach den Ergebnissen der Seismik - auch nicht mit dem anstehenden Untergrundgestein korreliert. Möglicherweise ist für diese Anomalie an einem Steilhang austretendes Sickerwasser verantwortlich.

2.2.2 Wechselstromverfahren

2.2.2.1 Elektromagnetische Kartierung

Bei diesen Messungen mit koplanaren, beweglichen Sender und Empfänger werden vertikal polarisierte Sinusschwingungen von einer Sendespule mit vertikaler Achse abgestrahlt. Das entstandene Feld induziert bei seinem Lauf durch die Erde in Gesteinskörpern elektrische Ströme. Deren Magnetfelder können am Ort der Empfangsspule dem Primärfeld entgegen oder gleichgerichtet sein. Durch Überlagerung beider Felder entsteht ein drittes Feld, das resultierende Feld, welches schließlich vom Empfänger aufgenommen wird. Das elektromagnetische Meßprinzip wird in Abb. 20 veranschaulicht.

Aus den Veränderungen von "Inphase- (0°-Phase-)" und "Outphase- (90°-Phase-) Daten" gegenüber dem Primärfeld kann man auf die Lage elektrisch besonders gut oder schlecht leitender "EM-Körper" im Untergrund schließen. Als "Inphasekomponente" wird der Feldanteil mit der gleichen Phasenlage wie die primäre elektromagnetische Welle bezeichnet. Der Anteil, der um 90° phasenverschoben ist, wird "Outphasenkomponente" genannt.

Es können meist mehrere Frequenzen vom Sender nacheinander abgestrahlt werden. Im Empfänger wird das resultierende Feld aufgenommen, verstärkt und durch eine Kompensationschaltung mit dem über Kabel direkt übermittelten Primärfeld verglichen und kompensiert.

Die Inphasewerte werden von Veränderungen des Abstandes Sender - Empfänger beeinflusst. Bei Messungen im bergigen Gelände ist die Bestimmung der Hangneigung zwischen zwei Meßpunkten erforderlich.

Die Auslage, d.h. die Entfernung zwischen Sender und Empfänger richtet sich nach der Größe der zu kartierenden Strukturen sowie nach der gewünschten Eindringtiefe. Verschiedene Längen der Auslagen sind möglich. Die Einhaltung dieses Abstandes wird durch die Länge des Verbindungs-Referenzkabels zwischen Sender und Empfänger kontrolliert.

Die maximale Erkundungstiefe eines solchen Gerätes liegt aufgrund unvermeidlicher Abstandsfehler meist zwischen 0,4 bis 0,8 der Auslagenlänge.

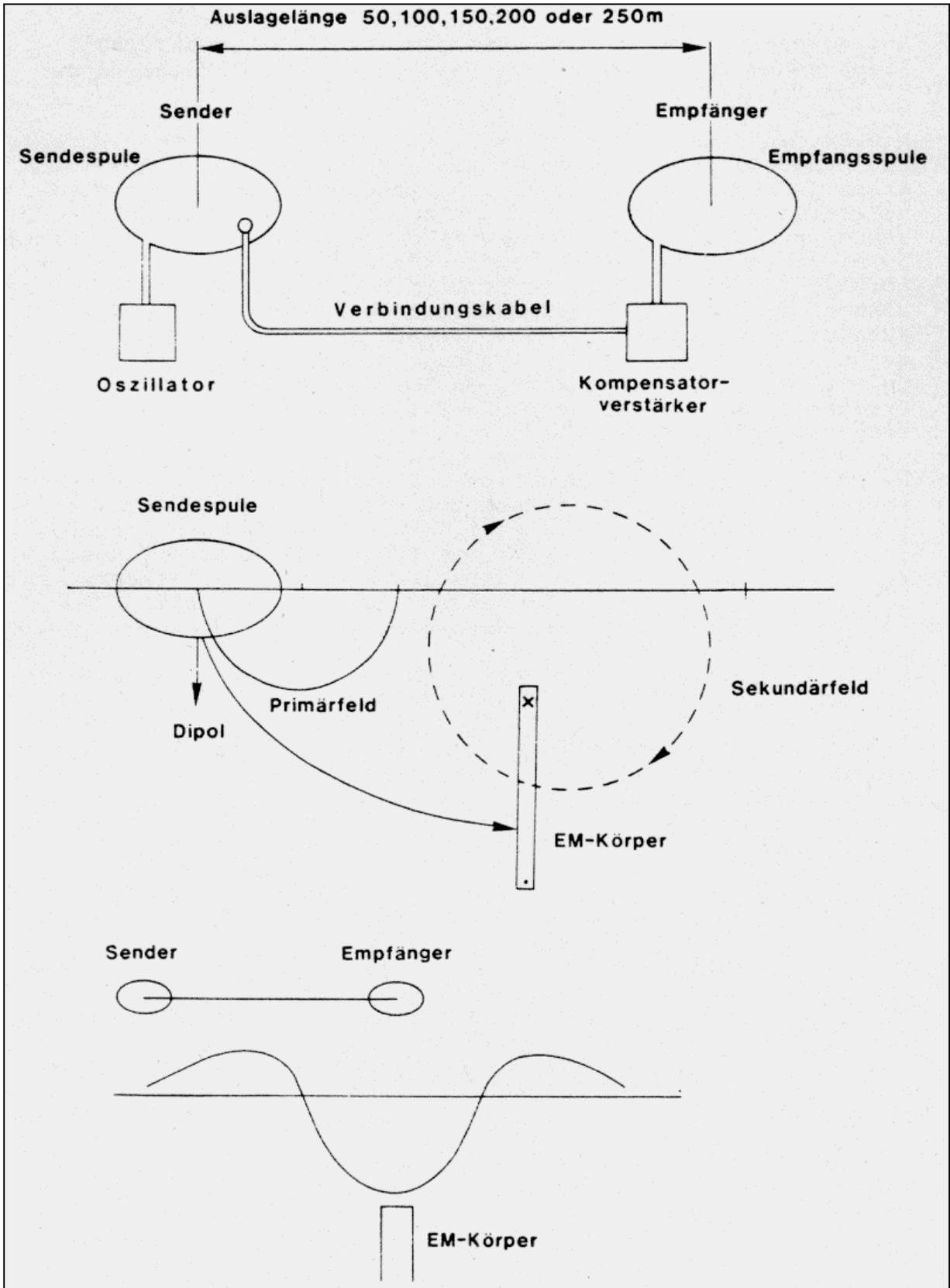


Abb. 20: Meßprinzip der elektromagnetischen Kartierung

Der Meßpunkt, auf den sich die gemessenen Daten beziehen, liegt stets in der Mitte der Auslage. Die Meßpunktabstände dürfen höchstens 1/4 der Auslagenlänge betragen.

Die Beziehung zwischen spezifischem Widerstand, Eindringtiefe und Meßfrequenz einer ebenen homogenen Welle zeigt das Nomogramm in Abb. 21. Im eingezeichneten Beispiel entspricht der Meßfrequenz von 3555 Hz und dem spezifischen Gesteinswiderstand von 30 *Ohm* m eine Eindringtiefe der EM-Messung von maximal 50 m. Bei gleichem Widerstand würden z.B. bei 10 000 Hz nur noch 20 m Eindringtiefe erzielt. Einer Vergrößerung der Eindringtiefen durch die Verminderung der Frequenz sind indessen auch Grenzen gesetzt, da für die Abstrahlung niedrigerer Frequenzen viel mehr Energie benötigt wird, als bei tragbaren Geräten erzeugt werden kann. Es ist deshalb erforderlich, die Frequenzen so auszuwählen, daß sie unter Feldbedingungen gute Eindringtiefen erzielen.

Das Verfahren wird vornehmlich zur Kartierung lateraler Leitfähigkeitsunterschiede eingesetzt. Mögliche Zielobjekte sind z.B. Deponieabgrenzungen, steilstehende grundwasserleitende Strukturen wie Verwerfungen, Spalten und Kluftzonen. Aus der Korrelation einzelner EM-Indikationen können Verwerfungs- und Spaltensysteme konstruiert werden, welche die Sicker- und Fließwege von Schadstoffen darstellen.

Abb. 22 zeigt typische elektromagnetische Meßkurven der Inphase- und Outphasekomponente über steilstehenden, elektrisch gut leitenden Strukturen, wie z.B. Verwerfungen, Spalten oder Kluftzonen. Während bei dem senkrecht stehenden Leiter die Minima beider Komponenten über dem Leiter liegen und die Maxima an beiden Seiten der Anomalie gleich stark ausfallen, sind bei dem geneigten Leiter die Kurven gegeneinander verschoben und es treten deutliche Unterschiede in den Seitenmaxima auf.

Abb. 23 zeigt das Ergebnis von EM-Messungen am Modellstandort Mühlacker. Die elektromagnetische Kartierung mit einer horizontalen Spulenanordnung (Auslagenlänge 50 m, Sendefrequenzen 888, 1777 und 3555 Hz) konnte die Lage dieser Sondermülldeponie (Schadstoffinventar CKW und Schwermetalle) nachweisen. Dargestellt ist ein Profil der EM-Meßwerte: Inphase und Outphase über der Deponie. Diese hebt sich als breites, flaches Minimum aller Phasen und Frequenzen heraus. D.h. die Deponie hat einen noch geringeren spezifischen Widerstand als die tonigen Schichten des Keupers, der das Nebengestein bildet.

Zu bemerken ist, daß die Abdeckfolie über der Deponie, die eine isolierende Schicht darstellt, offensichtlich keine Erhöhung der EM-Werte, und damit des Widerstandes, bewirkt hat.

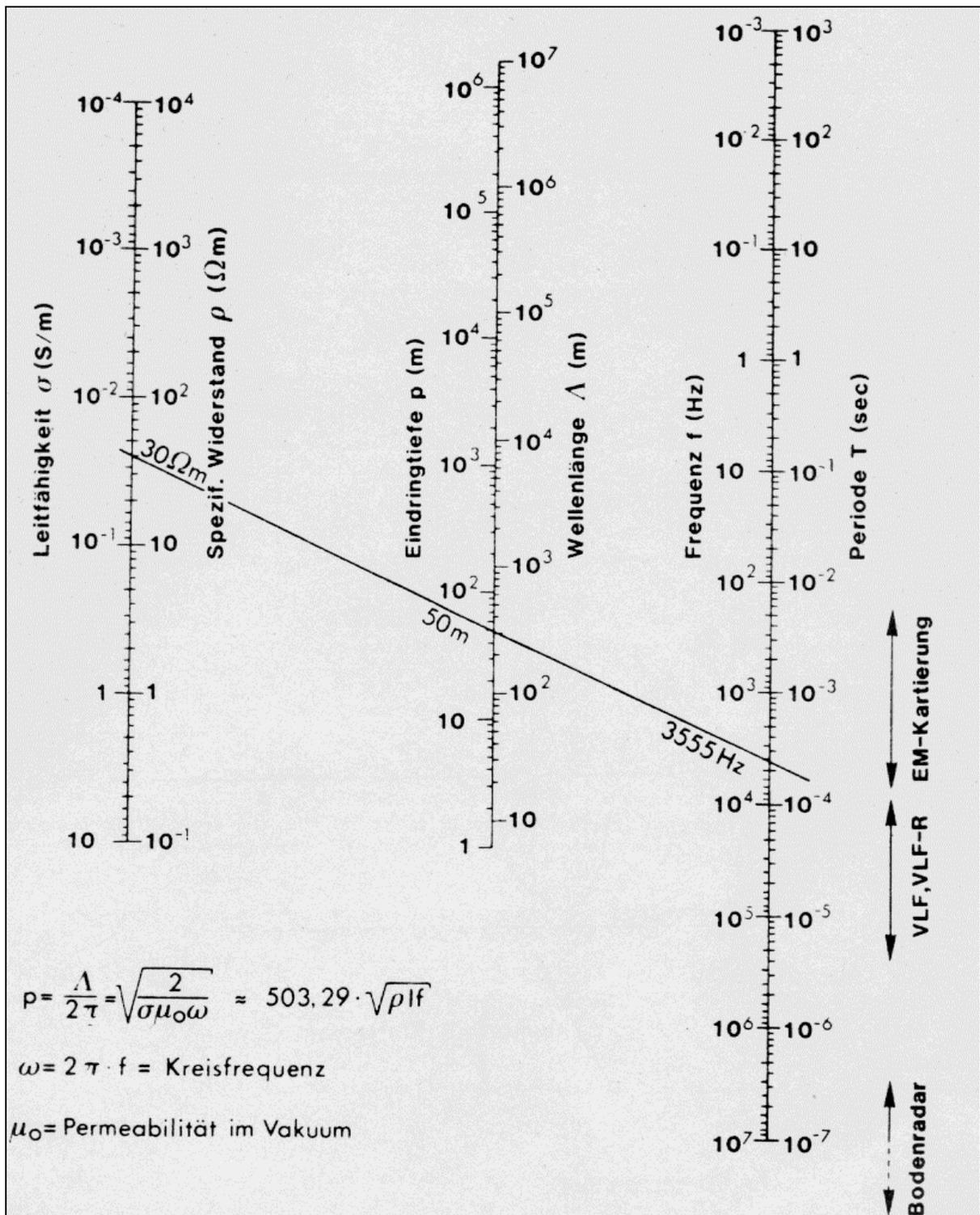


Abb. 21: Nomogramm zur Beziehung zwischen spezifischem Widerstand (linke Säule), Eindringtiefe (mittlere Säule) und Meßfrequenz (rechte Säule) einer ebenen homogenen Welle

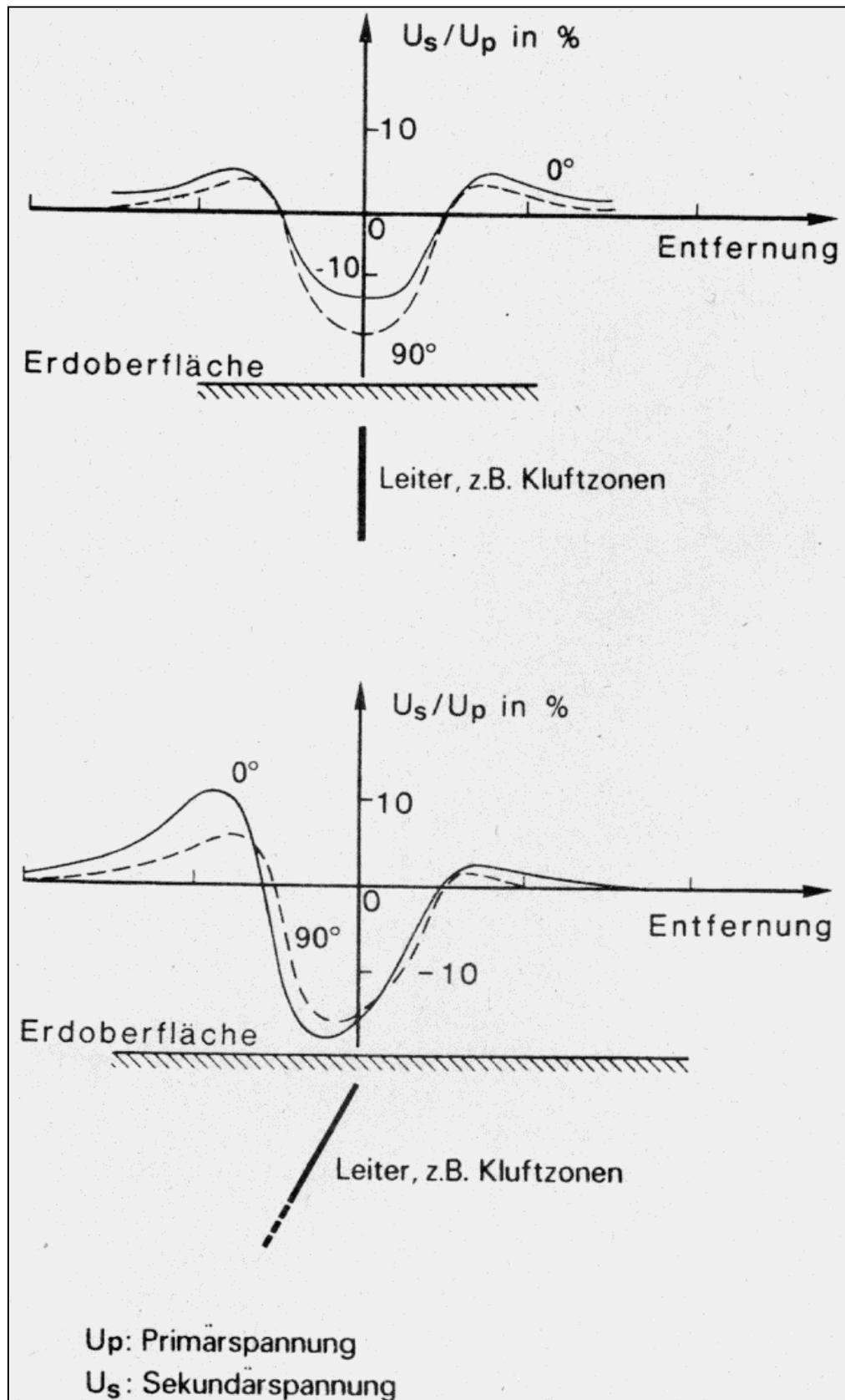


Abb. 22: Typische elektromagnetische Meßkurven über steilstehenden, elektrisch gut leitenden Strukturen, z.B. Verwerfungen, Spalten oder Kluffzonen

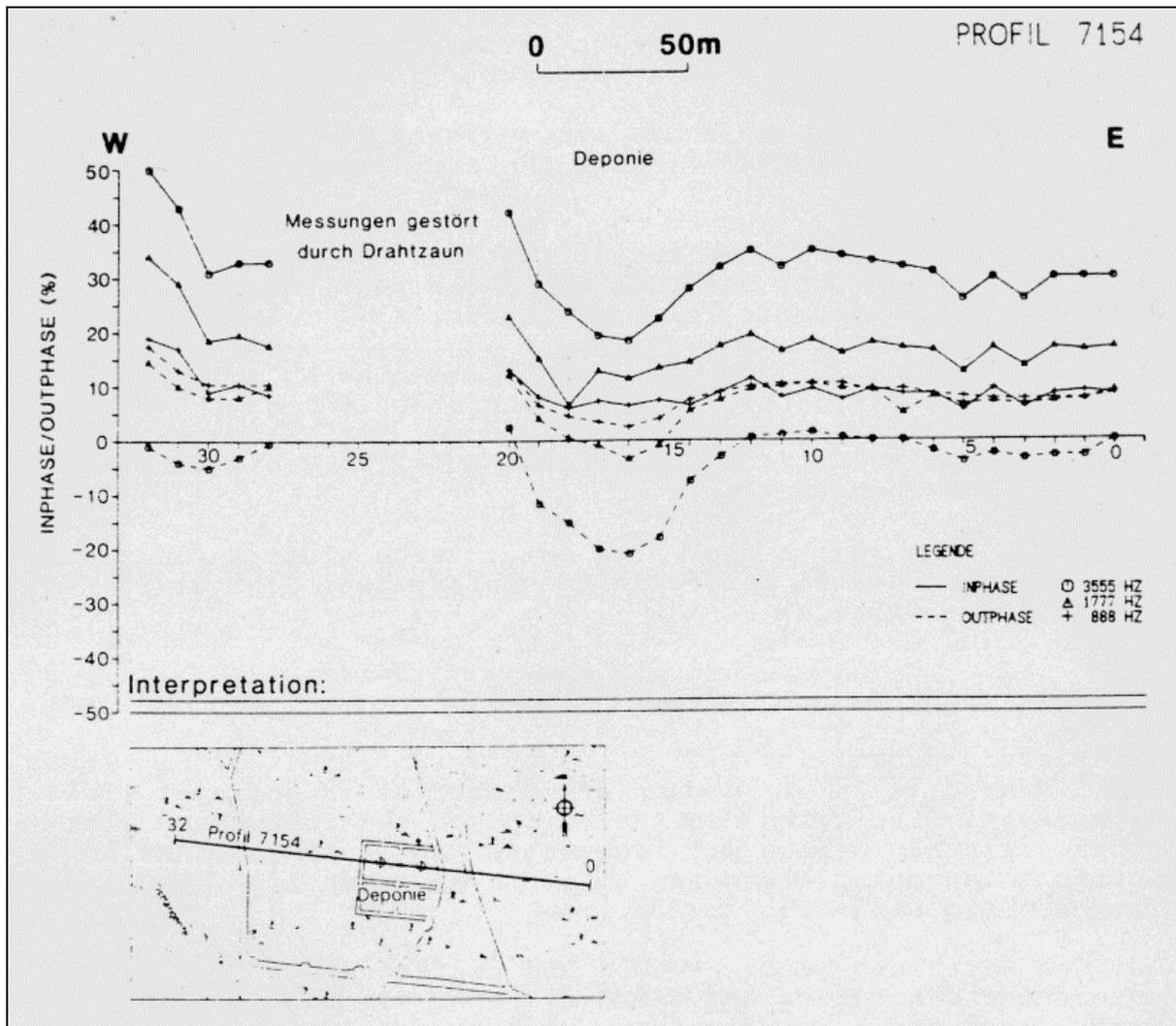


Abb. 23: Profil der EM-Meßwerte: In- und Outphase für drei Frequenzen über der Sondermülldeponie Mühlacker (Untersuchungen: NlFB, Hannover; Koordination: WEBER/IFU/TAUW, 1988/89)

2.2.2.2 Elektromagnetik mit entfernten Sendern

Ein besonderes EM-Verfahren stellt die **Very Low Frequency-(VLF-)Methode** dar. Es arbeitet mit Frequenzen zwischen 12 und 24 kHz. Diese sind aus Sicht der elektromagnetischen Kommunikationstechnik sehr niedrig, für die geophysikalische Anwendung der Elektromagnetik indessen ungewöhnlich hoch. Die Sinusschwingungen werden von fest installierten, extrem starken, jedoch zumeist weit entfernten Sendern für die U-Boot Navigation ausgestrahlt. Obwohl man hierbei den eigenen Sender einspart, hat das Verfahren Nachteile: Durch den großen Senderabstand entsteht ein nahezu homogenes Feld, das kleine Strukturen nicht immer erfassen kann. Außerdem muß das Meßprofil senkrecht zur Verbindungslinie zwischen dem Sender und dem zu untersuchenden Objekt stehen. Darüber hinaus ist die Eindringtiefe auf ca. 10 - 20 m begrenzt.

Bei Beachtung dieser Einschränkungen ist VLF jedoch bei den gleichen Fragestellungen wie die EM-Kartierung einsetzbar.

Bei dem Radioohm-Verfahren, auch VLF-R genannt, wird das elektrische Feld im Boden und zusätzlich das Magnetfeld in der Luft bestimmt und aus dem Quotienten der scheinbare spezifische Widerstand und die Phase berechnet.

Vorteil dieser aufwendigeren Methode ist eine höhere Auflösung und die Möglichkeit bei Verwendung unterschiedlicher Sender, einschließlich der Langwellen-Radiosender mit Frequenzen bis zu 240 kHz, eine Art FEM-Sondierung (multifrequente Tiefensondierung) vorzunehmen.

Diese VLF-R-Methode eignet sich dazu, rasch größere Flächen zu überdecken und dabei generelle Kenntnisse über Schichtwiderstände zu vermitteln.

2.2.2.3 Bodenradar

Das Elektromagnetische Reflexionsverfahren (EMR) wird in Form des Bodenradars zur Erkundung des Erdbodens in geringer Tiefe angewendet. Dabei wird die Reflexion von hochfrequenten elektromagnetischen Wellen mit Frequenzen von 10 bis 500 MHz an horizontalen Materialgrenzen genutzt, an denen sich die elektrischen Eigenschaften ändern.

Bei den Messungen werden Sender und Empfänger über den zu untersuchenden Untergrund gezogen, wobei ein kontinuierliches Profil registriert wird. Dazu werden kurzzeitige elektromagnetische Impulse über eine Antenne senkrecht in den Boden abgestrahlt. Das Meßprinzip ist in Abb. 24 graphisch veranschaulicht.

Der Empfänger registriert die an Diskontinuitätsflächen reflektierten Signale nach einer bestimmten Laufzeit, die von dem durchstrahlten Material abhängig ist. Dieses Verfahren ähnelt nicht nur der Reflexionsseismik, sondern es ist sogar möglich, deren Auswerteprogramme bei der Bodenradar-Interpretation zu verwenden.

Wie in der Seismik kann aus der Laufzeit, bei Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit, auf die Tiefenlage des Reflektors geschlossen werden.

Bodenradarmessungen sind eine schnelle und hochauflösende Untersuchungsmethode für oberflächennahe Objekte (von 0,2 bis ca. 3 m Tiefe). Voraussetzung sind z.B. trockener, homogener Untergrund und geringe Objekttiefe. Mit dem Bodenradar kann die Ortung von Einzelobjekten, wie Rohrleitungen, Kabel, Fundamenten und Hohlräumen erfolgen. Sowohl metallische als auch nichtmetallische Objekte können erkundet werden. Die Methode eignet sich somit speziell zum Einsatz an Altlasten mit geringmächtiger Überdeckung und an Industriebrachen.

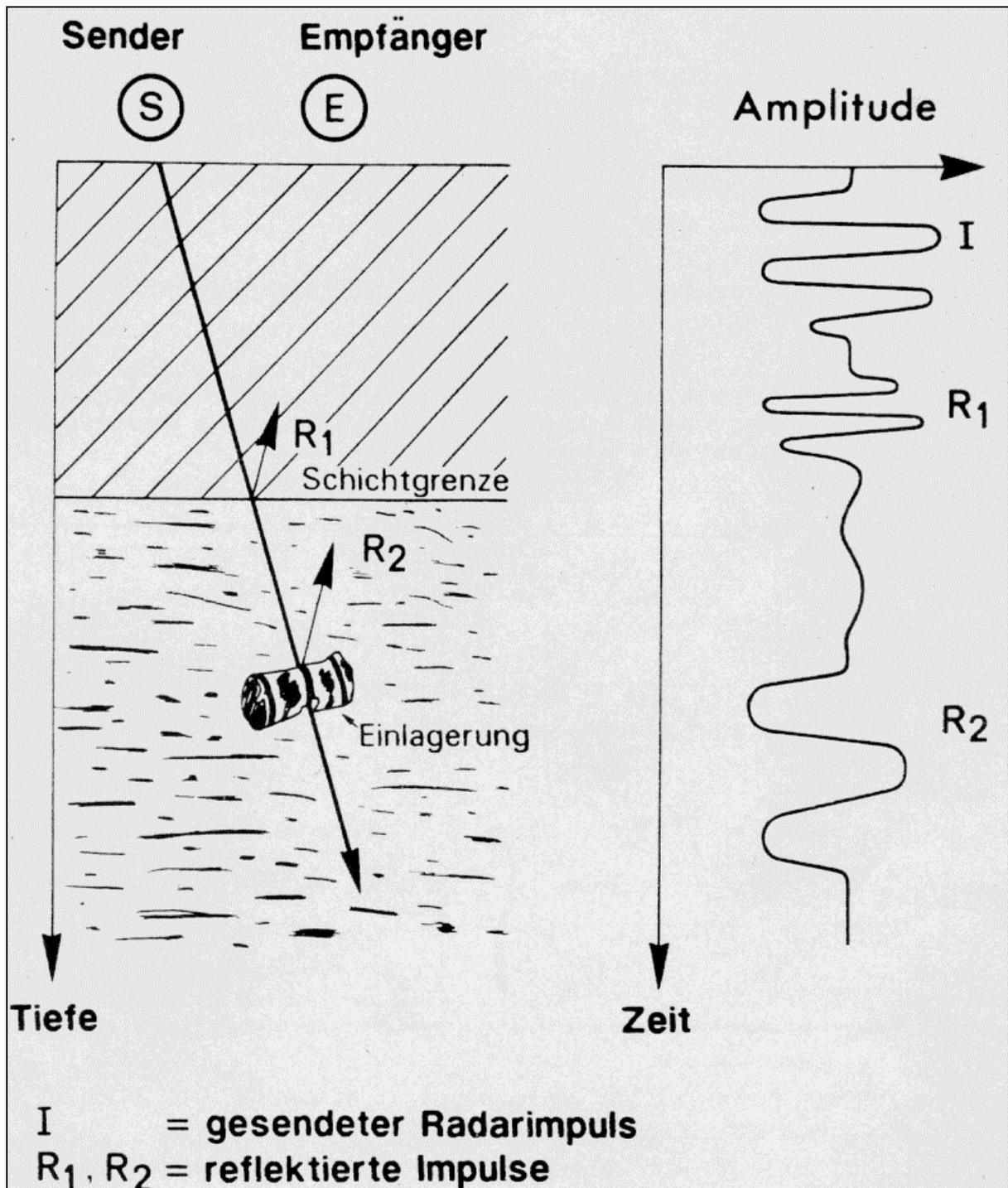


Abb. 24 : Meßprinzip des Bodenradars

Zur Erzielung größerer Eindringtiefen ist es gemäß Abb. 21 (Abschn. 2.2.2.1) notwendig, niedrige Sendefrequenzen zu verwenden. Damit verringert sich jedoch das Auflösungsvermögen, denn dieses wächst mit zunehmender Frequenz. Ein optimaler Frequenzbereich stellt deshalb immer einen Kompromiß zwischen Tiefenreichweite und Auflösungsvermögen dar und muß entsprechend den jeweiligen Standortbedingungen und Fragestellungen gewählt werden.

Bodenradarmessungen liefern fast immer eine große Zahl von anomalen Reflexionen, die auf kleinräumige Struktur- und Texturveränderung des Bodens hinweisen, jedoch nicht in jedem Falle auf Einlagerungen oder Schadstoffkonzentrationen in Altlasten zurückgehen. Bei der Auswertung und Beurteilung dieser Meßmethode ist deshalb besondere Sorgfalt und Vorsicht geboten.

Abb. 25 und 26 zeigen Anwendungsbeispiele des Bodenradars an den Modellstandorten.

Die Anwendung des Bodenradars auf eine Industriebrache am Modellstandort Geislingen (Gaswerksgelände) umfaßte die Vermessung entlang von Profilen im Abstand von 0,5 m mit einer Sende- und Empfangsfrequenz von 300 MHz (Abb. 25).

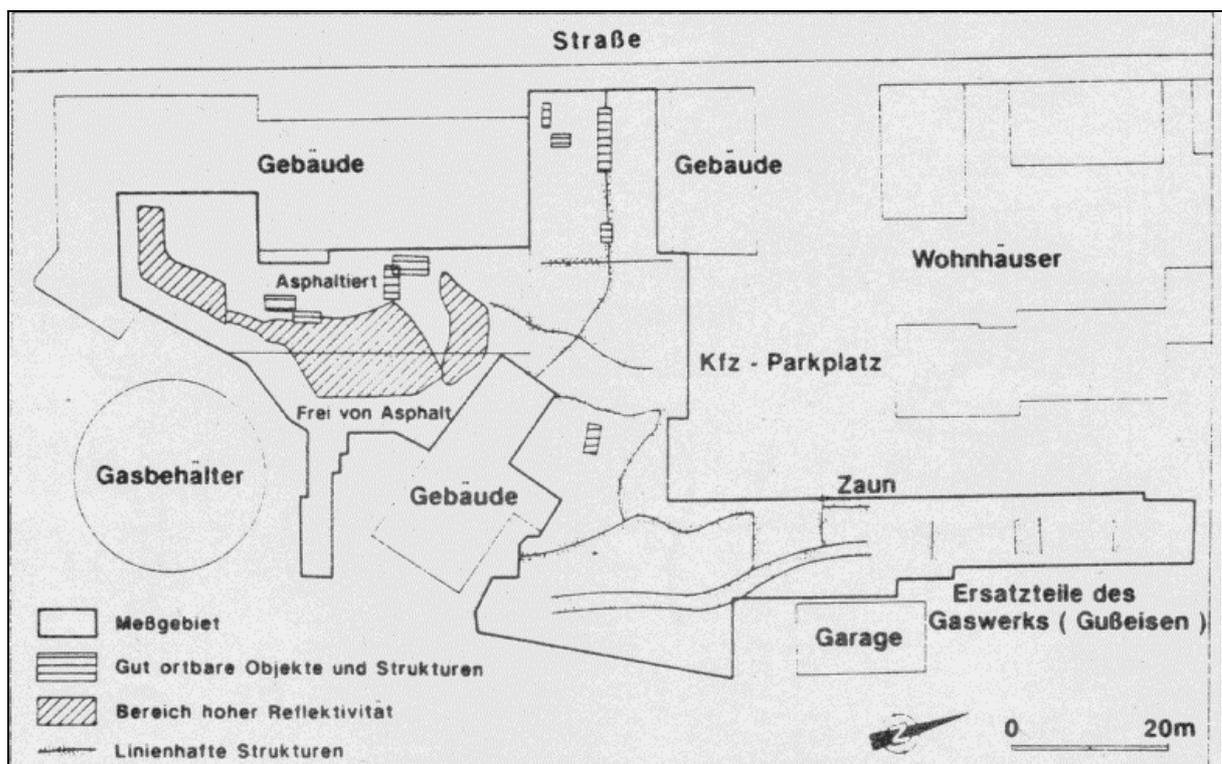


Abb. 25: Ergebnisse des Bodenradars zur Erkundung eines ehemaligen Gaswerksgeländes am Modellstandort Geislingen (Untersuchungen: Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen, Karlsruhe; Koordination: INST. DR. JUNGBAUER PARTNER, 1988/89)

Trotz eng stehender Bebauung und industriellen Installationen hat diese Methode Resultate erzielt:

Es ließen sich eine Anzahl von Einzelobjekten orten, deren Kenntnis, z.B. im Falle von schadstoffverdächtigen Tanks, von Wichtigkeit sein würde. Auch der Nachweis von linienhaften Strukturen, d.h. von Leitungen, Abwasserkanälen etc., ist in diesem Industriegelände gelungen.

Abb. 26 gibt die Ergebnisse des Bodenradars am Modellstandort Osterhofen in Form eines Profilschnittes wieder. Er enthält Indikationen für verschiedene Materialien und ihre Kompaktheit nahe der Erdoberfläche. Weitere Aussagen über den Deponiekörper lassen sich nicht ableiten. Hier gilt, daß noch weiter erkundet werden muß, welche Einlagerungen sich im Radarogramm abzeichnen und welche keine Radarreflexionen erzeugen.

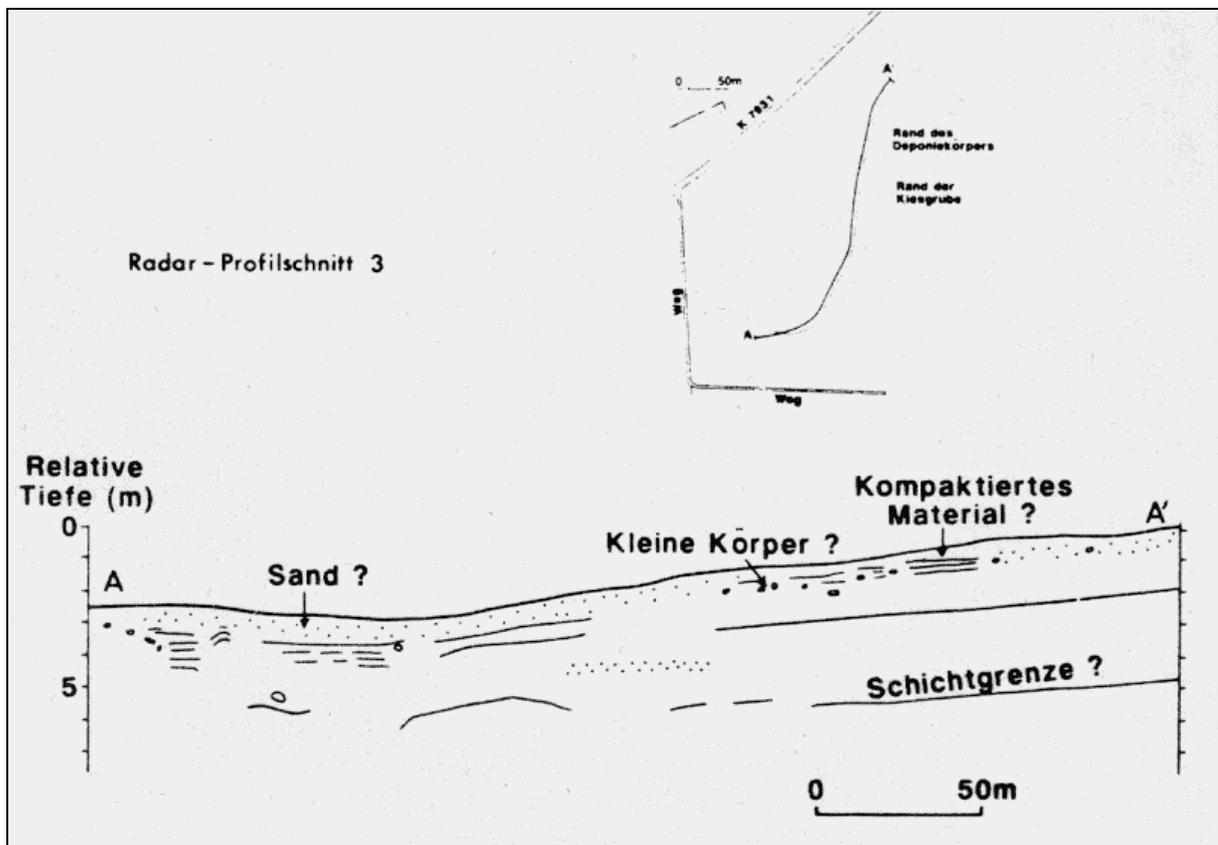


Abb. 26: Bodenradar-Profileschnitt am Modellstandort Osterhofen (Untersuchungen: R. Buchholz Büro für Ingenieurgeophysik, Heiligenberg; Koordination: TGU, 1988/89)

2.3 Seismik

2.3.1 Allgemeines

Die seismischen Verfahren beruhen darauf, daß sich die Gesteine der oberen Erdkruste in ihren elastischen Eigenschaften unterscheiden. Eine an der Erdoberfläche künstlich durch Hammer Schlag, Fallgewicht, Vibratoren oder Sprengung erzeugte seismische Welle breitet sich im Untergrund aus und wird an den elastischen Inhomogenitäten gebeugt, gebrochen und reflektiert. Auf diese Weise gelangen Anteile der ausgesandten Welle nach verschiedenen langen Laufwegen an die Erdoberfläche zurück, wo sie durch eine Schar von Empfängern, sog. Geophonen, registriert werden, welche entlang einer Profillinie angeordnet sind. Aus der Laufzeit der Wellen

vom Anregungspunkt zu den Geophonen kann ggf. die seismische Geschwindigkeit und die Tiefenlage der seismisch wirksamen Grenzflächen abgeleitet werden. Die Seismik liefert somit Kenntnisse über den geologisch-tektonischen Aufbau des Untergrunds und kann zur Klärung hydrogeologischer Probleme beitragen.

Die Ausbreitung seismischer Wellen im Untergrund erfolgt nach den Gesetzen der geometrischen Optik. Die Brechung von seismischen Wellen an Schichtgrenzen mit höheren seismischen Geschwindigkeiten im Liegenden wird bei dem im nachfolgenden Abschnitt 2.3.2 beschriebenen refraktionsseismischen Verfahren für die Erkundung der Lagerungsverhältnisse im Untergrund ausgenutzt. Im Gegensatz dazu werden beim reflexionsseismischen Verfahren (Abschn. 2.3.3) die nach den Reflexionsgesetzen an Schichtgrenzen reflektierten Wellen ausgenutzt.

Beim Erzeugen einer seismischen Welle wird das Gestein einer Vielzahl von unterschiedlich wirksamen Kräften ausgesetzt, die das Material auf Druck, Dehnung und Schub beanspruchen. Dadurch entstehen unterschiedliche Typen elastischer Wellen, die sich mit verschiedenen Geschwindigkeiten ausbreiten. Die zwei wichtigsten davon sind Raumwellen, deren Wellenfronten sich vom Anregungszentrum aus gleichmäßig nach allen Seiten im Gestein fortpflanzen. Es handelt sich um eine Longitudinal- oder Kompressionswelle und eine Transversal- oder Scherwelle. Die Kompressionswelle, die sich mit größerer Geschwindigkeit fortpflanzt als die Scherwelle und die daher ein Ziel zuerst erreicht, wird als Primärwelle (P-Welle) bezeichnet. Demzufolge spricht man von der Scherwelle auch als Sekundärwelle (S-Welle). S-Wellen zeichnen sich durch ihre geringere Wellengeschwindigkeit aus, so daß sie eine höhere Auflösung von Strukturen ermöglichen. Allerdings können sich S-Wellen im Lockergestein nur sehr schwach bzw. in Flüssigkeiten gar nicht ausbilden, so daß zur Anregung und Registrierung dieses Wellentyps ein erhöhter meßtechnischer Aufwand notwendig ist. Neben den Raumwellen gibt es weitere Wellen, die sich an der Erdoberfläche ausbreiten und daher als Oberflächenwellen oder direkte Wellen bezeichnet werden. Diese wirken bei flachgründigen Untersuchungen störend.

Beim Abschätzen seismischer Geschwindigkeiten kann man sich im allgemeinen nach folgenden Regeln richten:

1. In einer Schicht nimmt die Geschwindigkeit mit wachsender Tiefe allmählich zu. Dies ist bei oberflächennahen Schichten besonders ausgeprägt, da in ihnen die Verfestigung mit wachsender Tiefe deutlich größer wird.
2. Normalerweise ist die Geschwindigkeit in einer tiefer liegenden Schicht größer als in der überlagernden Schicht.
3. Die Geschwindigkeiten hängen in typischer Weise vom geologischen Alter der Schichten ab. Die Geschwindigkeiten sind um so größer, je älter die Schichten sind. Dies gilt jedoch vielfach nicht in der Nähe der Erdoberfläche, da die Gesteine hier durch Druckentlastung bzw. Verwitterung stärkere Auflockerungen aufweisen und dementsprechend abweichende geringere Geschwindigkeiten besitzen.

2.3.2 Refraktionsseismik

Dieses Verfahren beruht auf der Auswertung von refraktierten Wellen, die an den Grenzflächen zweier Gesteinsschichten entlanglaufen und dabei ständig Energie auch nach oben abstrahlen. Voraussetzung für ihr Zustandekommen ist, daß die Wellen unter einem kritischen Winkel auf die Grenzfläche einfallen und daß die seismische Geschwindigkeit in der tiefer liegenden Schicht größer ist als in der überlagernden Schicht.

Das Prinzip der Refraktionsseismik wird in Abb. 27 veranschaulicht. Das untere Diagramm beschreibt die Laufwege der refraktierten und direkten Wellen, im oberen Diagramm sind die sog. Laufzeitkurven dargestellt, in der die Beobachtungsdaten zusammengefaßt werden. Dabei wird auf der horizontalen Achse der Abstand Anregungspunkt-Beobachtungspunkt aufgetragen und auf der vertikalen Achse die Zeit, die die seismische Welle benötigt, um vom Anregungspunkt zum Beobachtungspunkt zu gelangen.

An der Erdoberfläche registrieren die Geophone sowohl die refraktierte als auch die direkte Welle, die innerhalb der oberen Schicht entlangläuft. Da die refraktierte Welle sich mit der größeren Geschwindigkeit der unteren Schicht ausbreitet, wird ab einer bestimmten kritischen Entfernung x_c von der Anregungsquelle diese vor der direkten Welle registriert. Aus dieser Entfernung können die Tiefenlage der Grenzfläche und die Werte für die seismischen Geschwindigkeiten beider Schichten abgeleitet werden.

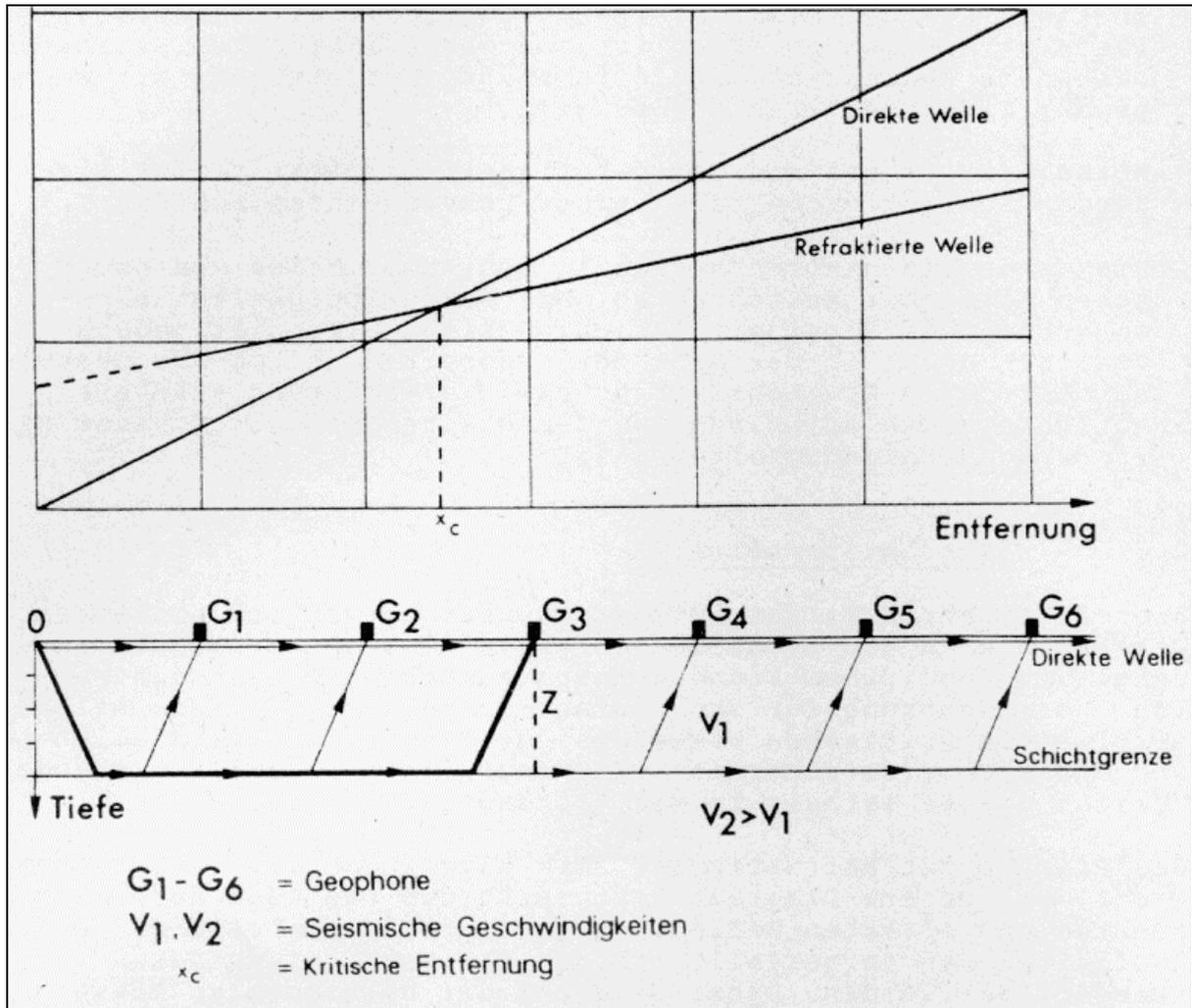


Abb. 27: Meßprinzip des refraktionsseismischen Verfahrens

Die Erkundungstiefe der Untersuchung bestimmt die Wahl der Gesamtlänge der Geophonauslage und der Abstände zwischen den einzelnen Geophonen. In der Regel sollte die Länge der Geophonauslage mindestens das 5-fache der Erkundungstiefe betragen. Wenn die Erkundungstiefe gering ist, sollte der Geophonabstand bei ca. 1-2 m liegen, für größere Erkundungstiefen werden 2-5 m empfohlen.

Von besonderer Bedeutung ist die Refraktionsseismik für die Untersuchung der Lagerungsverhältnisse in geringen Tiefen, da bei diesen Fragestellungen die Reflexionsseismik noch nicht angewendet werden kann (vgl. Abschn. 2.3.3). Die Methode ermöglicht die Untersuchung des Untergrunds im Umfeld einer Altlast zur Klärung allgemeiner geologischer bzw. hydrogeologischer Fragestellungen, speziell zur Bestimmung der Mächtigkeit von Lockersedimenten oder der Verwitterungsdecke über Festgestein. Es besteht auch die Möglichkeit, die Grundwasseroberfläche in sandig-kiesigen Lockersedimenten zu ermitteln.

Weiterhin liefert die Refraktionsseismik Aussagen über Deponieabgrenzungen zur Tiefe hin, falls genügend große Kontraste zwischen den Geschwindigkeiten der Deponie und dem Nebengestein bestehen. Speziell in Fällen, in denen im Liegenden einer Altlast Festgestein ansteht, läßt sich die Mächtigkeit der Altlast ermitteln. Auf diese Weise können ggf. bevorzugte Ausbreitungsrichtungen der Deponiesickerwässer verfolgt werden. Dagegen ist eine Unterscheidung Altlast - Lockergestein bzw. Verwitterungsdecke wegen ähnlicher seismischer Geschwindigkeiten oft nicht möglich.

Abb. 28 und 29 zeigen Ergebnisse von refraktionsseismischen Messungen an den Modellstandorten.

Refraktionsseismische Messungen auf 5 Meßprofilen am Modellstandort Leonberg lieferten detaillierte Informationen über das Relief der Oberfläche des Refraktors. Abb. 28a zeigt ein typisches Schichtprofil. Das Relief der abgedeckten Schilfsandsteinoberfläche im Raumbild Abb. 28b liefert anschauliche Hinweise auf bevorzugte Wasserfließrichtungen in den Senken des Untergrundes. In diesem Fall traf die Refraktionsseismik auf günstige Bedingungen, denn die seismischen Geschwindigkeiten der lockeren Verwitterungsdecke (510-835 m/s) und des Schilfsandsteins (1 500-2 100 m/s) unterscheiden sich erheblich.

Es bestehen indessen nur geringe Kontraste zwischen den seismischen Geschwindigkeiten des Deponiematerials (ca. 800 m/s) und der Verwitterungsdecke. Die Lage der Deponie läßt sich deshalb refraktionsseismisch nicht erkunden.

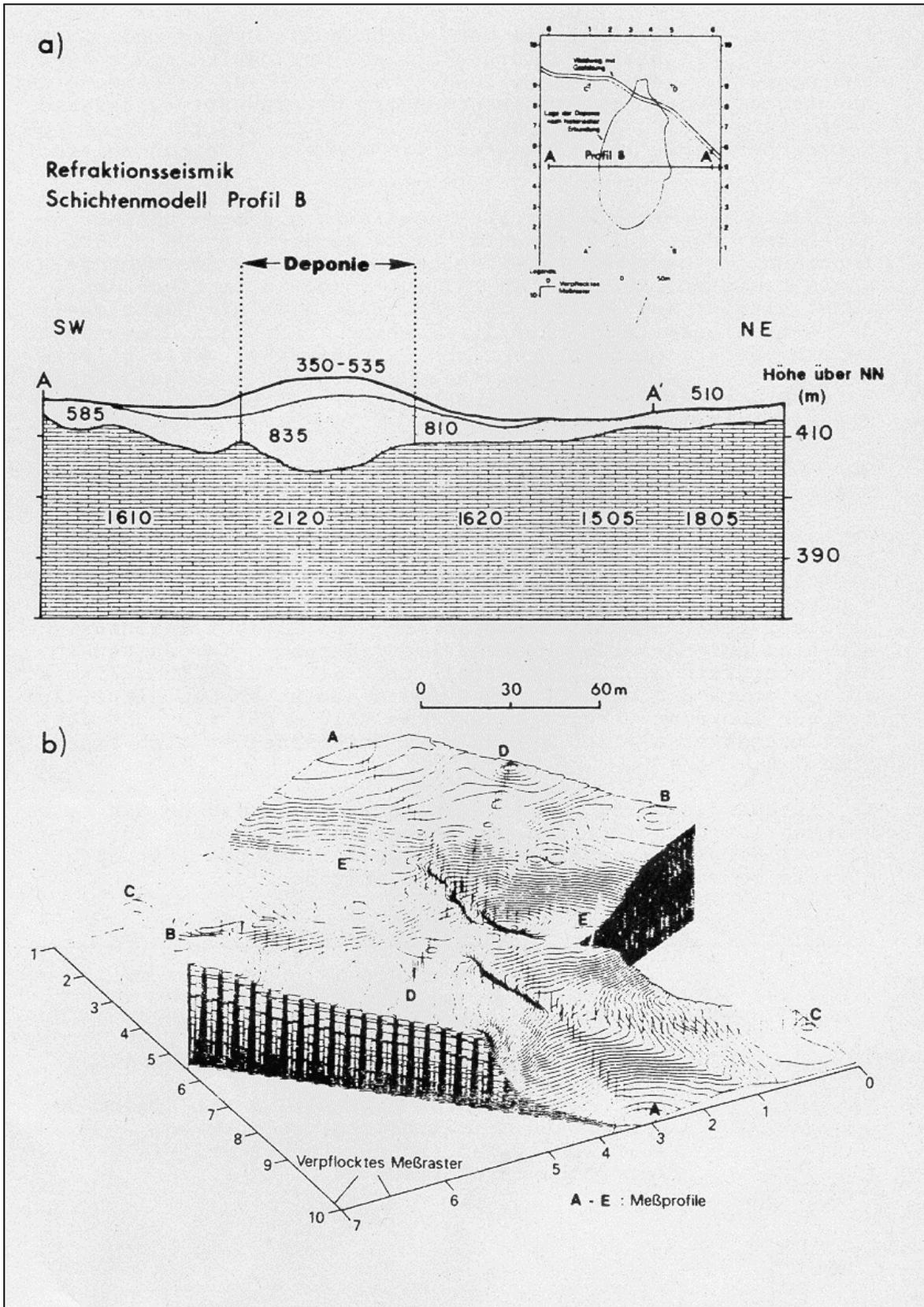


Abb. 28: Ergebnisse refraktionsseismischer Messungen am Modellstandort Leonberg (Untersuchungen: THOR Geophysikalische Prospektion GmbH, Kiel; Koordination: LURGI/OBERMEYER, 1988/89)

- a) Schichtenmodell für Meßprofil B mit Angabe der seismischen Geschwindigkeiten in m/s
- b) Raumbild mit Isolinienkarte des Reliefs der Oberfläche des Refraktors

Refraktionsseismische Messungen am Modellstandort Mühlacker wurden mit 2 verschiedenen Geophonabständen (2,5 und 10 m) durchgeführt. Die Deponieränder und die Deponiesohle konnten aufgrund zu geringer Wellengeschwindigkeitskontraste zum Nebengestein nicht nachgewiesen werden (Abb. 29).

3 Schichten wurden ausgeschieden:

Schicht 1 - Verwitterungsdecke (530-800 m/s)

Schicht 2 - Verwittertes Festgestein (Gipskeuper 900-2 200 m/s)

Schicht 3 - Festgestein (Gipsspiegel 1 560-4 150 m/s)

In den Profilen mit 10 m Geophonabstand (Abb. 29b) sind die Geschwindigkeiten durchweg höher und der tiefere Refraktor, der in einer Tiefe von ca. 50-70 m liegt, ist deutlich geneigt. Er wird als Verlauf des "Gipsspiegels" innerhalb des Gipskeupers gedeutet, d.h. dem Übergang von ausgelaugtem zu massivem Gips.

In diesem Beispiel zeigt sich, daß Veränderungen der horizontalen Lagerung, die hier durch Auslaugung oder "Subrusion" des Gipses vom Liegenden her entstanden sein könnten, die Deutung der Refraktionsergebnisse erschweren.

2.3.3 Reflexionsseismik

In der **Reflexionsseismik** werden von einer seismischen Quelle an der Erdoberfläche abgestrahlte seismische Wellen an Diskontinuitäten im Untergrund, d.h. an Flächen, wo Änderungen der seismischen Impedanz auftreten, reflektiert. Unter der seismischen Impedanz I versteht man das Produkt aus der Dichte ρ des betreffenden Materials und der Geschwindigkeit v einer sich darin ausbreitenden seismischen Welle:

$$I = \rho \cdot v$$

Die reflektierten Wellen werden beim Wiederauftreffen auf die Erdoberfläche entlang einer Profillinie von Geophonen registriert. Das Prinzip des Verfahrens wird in Abb. 30 veranschaulicht.

Aus den empfangenen Signalen werden mittels Auswerteverfahren per Hand oder DV-Programmen Laufzeiten abgeleitet. Für die Angabe von Tiefen der Reflexionshorizonte müssen die seismischen Geschwindigkeiten der Schichten bekannt sein. Im Gegensatz zur Refraktionsseismik wird keine Zunahme der Wellengeschwindigkeit an einer Schichtgrenze vorausgesetzt. Außerdem werden kleinere Geophonauslagen benötigt, d.h. die Geophone befinden sich im Vergleich zur Erkundungstiefe näher an der Signalquelle.

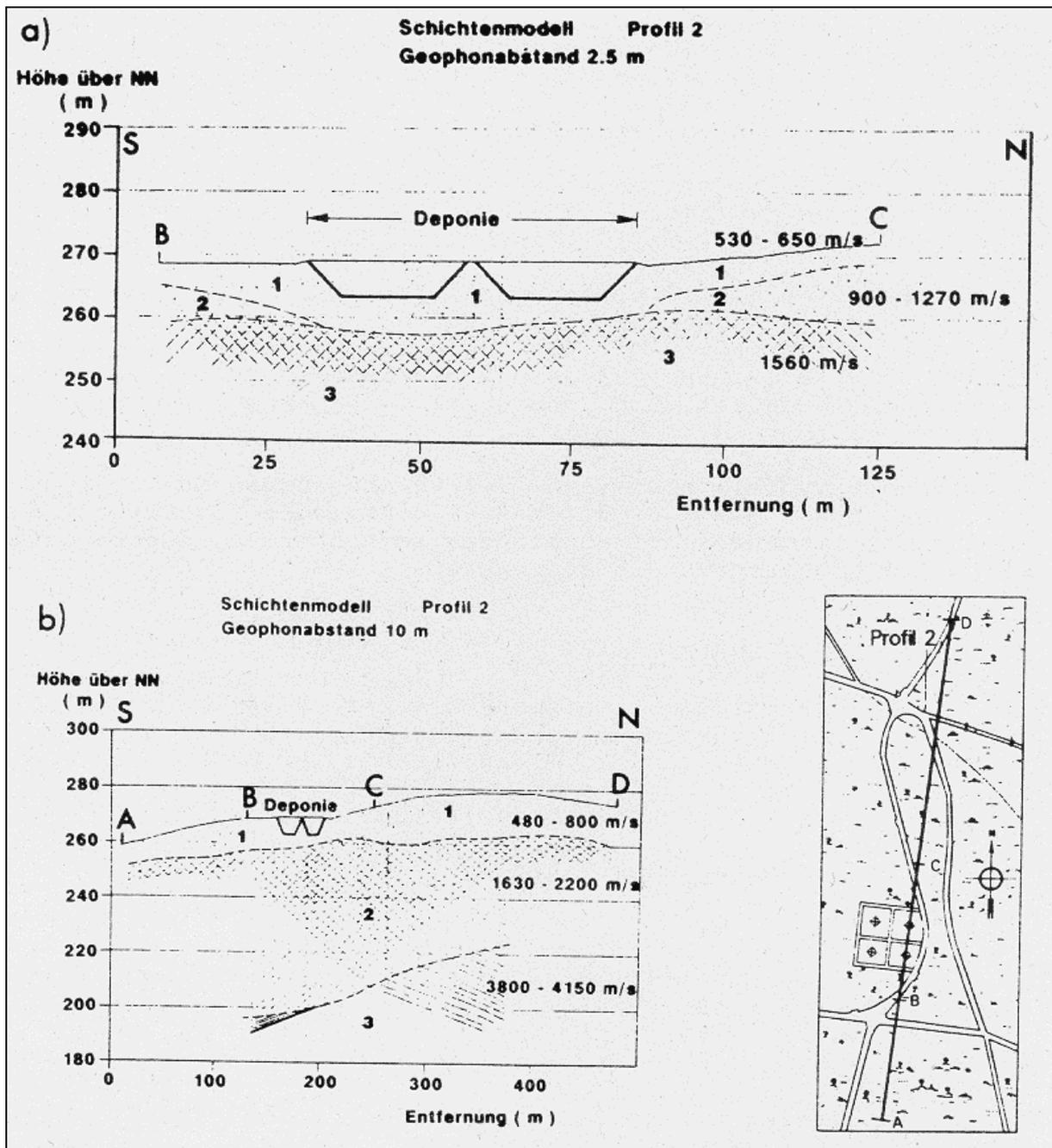


Abb. 29: Ergebnisse refraktionsseismischer Messungen am Modellstandort Mühlacker (Untersuchungen: Gesellschaft für Baugologie und -meßtechnik mbH, Rheinstetten; Koordination: WEBER / IFU / TAUW, 1988/89), a) Schichtenmodell für ein Meßprofil mit Geophonabständen von 2,5 m, b) Schichtenmodell für ein Meßprofil mit Geophonabständen von 10 m

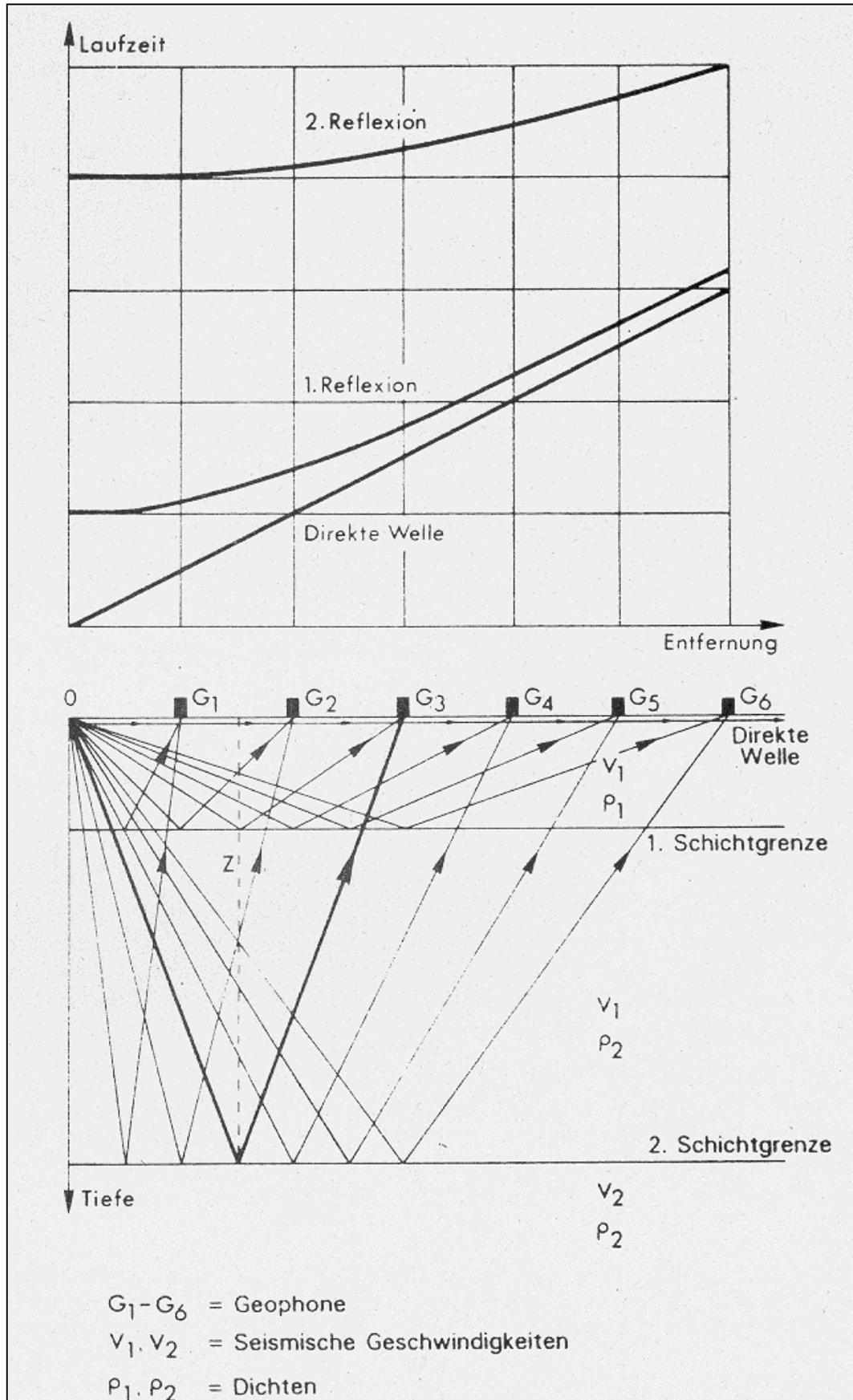


Abb. 30: Meßprinzip des reflexionsseismischen Verfahrens

Das Verfahren wurde bisher vorrangig in der Erdölprospektion zur Erkundung des tieferen geologischen Untergrundaufbaus ab ca. 100 m eingesetzt und besitzt eine weit fortgeschrittene Meß- und Auswertetechnik.

Die Anwendung dieser hochentwickelten Reflexionsseismik auf so oberflächennahe Objekte wie z.B. Altlasten befindet sich dagegen noch in der Erprobungsphase. Die Schwierigkeit besteht darin, daß Reflexionssignale aus geringen Tiefen so schnell zur Erdoberfläche zurückkommen, daß die Oberflächenwelle mit ihren sehr großen Amplituden noch nicht weit genug abgeklungen ist, um Reflexionssignale erkennen zu lassen. Um Reflexionen aus geringen Tiefen sichtbar zu machen, sind besondere meßtechnische Maßnahmen erforderlich. So werden erst seit Kurzem seismische Empfänger mit extrem hohen "Sampling-Raten" und hochfrequente Anregungsverfahren entwickelt, die Aussagen über Tiefen bis zu 10 m erlauben sollen.

Aus diesem Grund ist die Anwendung dieser Methode bei der Altlastenerkundung z.Zt. auf die Erkundung des tieferen geologischen Untergrunds ab ca. 50 m Tiefe beschränkt, speziell zum Nachweis von Störungs- und Verwerfungszonen im Festgestein.

Anwendungsbeispiele der Reflexionsseismik an den Modellstandorten zeigen Abb. 31 und 32.

Die Reflexionsseismik am Modellstandort Mühlacker wurde mit Geophonabständen von 10 m durchgeführt. In Abb. 31 sind keine Hinweise auf die Deponie enthalten. Die Aussagen beginnen erst ca. 20 m unterhalb der Deponie.

Im Seismogramm (Abb. 31b) zeichnet sich im nördlichen Teil vermutlich der "Gipsspiegel" als einheitlicher, nach S geneigter Reflektor ab. Nach S hin folgt ein reflexionsloser Bereich, dann ein uneinheitlicher, teilweise durch Versätze gekennzeichnete Verlauf des Reflektors. Hieraus wird auf eine Verwerfung der Schichtgrenze Gipskeuper - Muschelkalk geschlossen (Abb. 31a).

Auf dieser, nur von der Seismik angezeigten, Verwerfung wurde eine Bohrung bis in den Muschelkalk (110 m Endtiefe) niedergebracht. Bei Pumpversuchen wurden höhere Schüttungen als in anderen Gipskeuperbohrungen erzielt, woraus auf stärkere bruchtektonische Zerrüttung des Gebirges geschlossen werden kann.

In Mühlacker hat die Reflexionsseismik, obwohl sie keine Hinweise auf die Deponie enthielt, eine hydraulisch wichtige Zerrüttungszone im tieferen Untergrund am N-Rand der Deponie angezeigt, die durch eine Bohrung bestätigt werden konnte. Das Beispiel zeigt, daß auch dieses Verfahren, das also nur Informationen aus größerer Tiefe liefert, sinnvoll in der Altlastenerkundung eingesetzt werden kann.

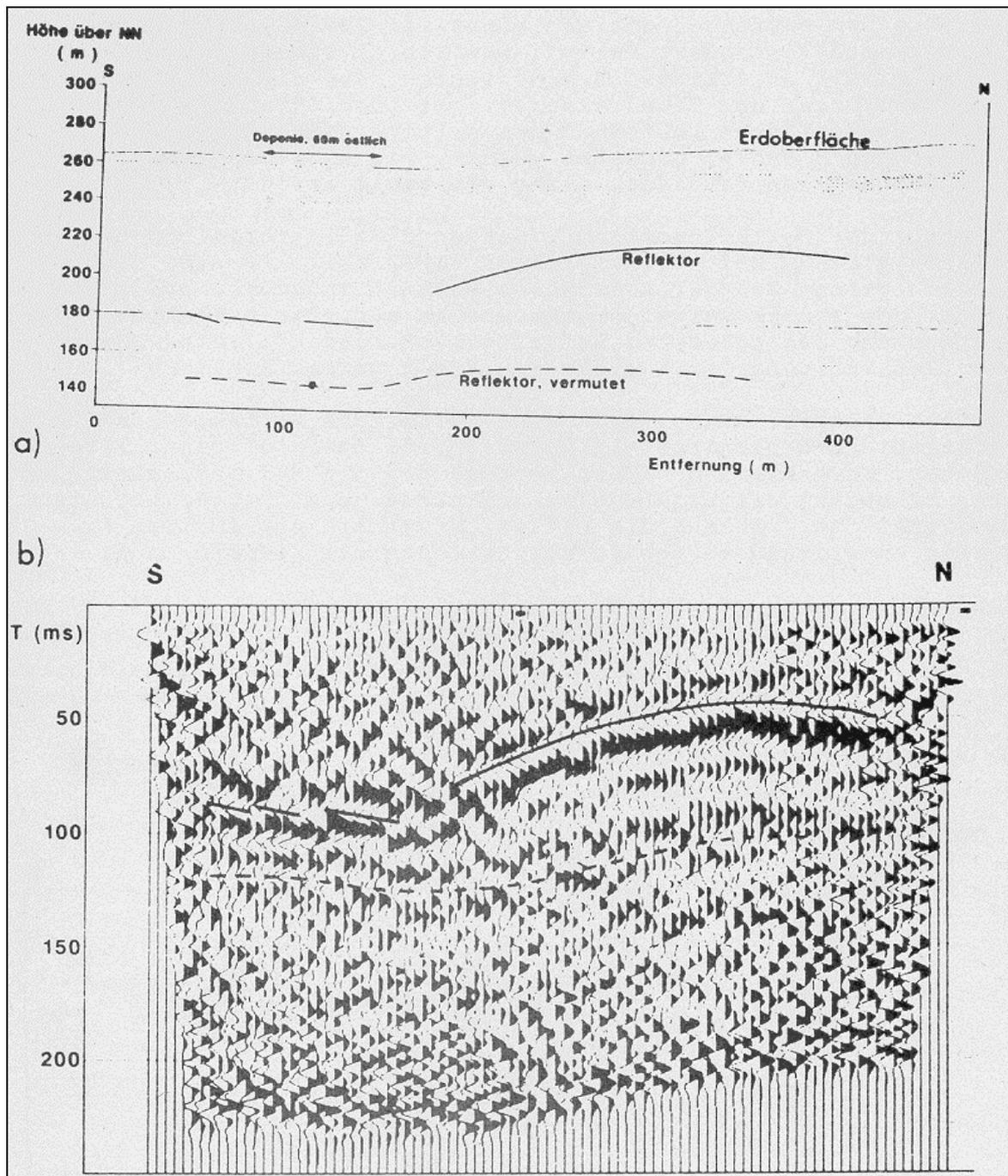


Abb. 31: Ergebnisse reflexionsseismischer Messungen am Modellstandort Mühlacker (Untersuchungen: Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH, Rheinstetten; Koordination: WEBER/IFU/TAUW, 1988/89), a) Profilschnitt, b) Seismogramm

Abb. 32 zeigt die Ergebnisse von refraktions- und reflexionsseismischen Messungen entlang eines ca. 700 m langen Meßprofils am Modellstandort Herten. Das Schichtenmodell der Refraktionsseismik unterscheidet 4 Schichten, die als Lockermaterial über und unter dem Grundwasserspiegel (Schichten 1 und 2) sowie verschiedene Schichten des mittleren Muschelkalkes (Schichten 3 und 4) gedeutet werden. Die Lage und Mächtigkeit der Deponie konnte jedoch nicht ermittelt werden.

Mittels der Reflexionsseismik wurden 3 Reflektoren identifiziert (R1, R2, R3). Der Reflektor R1/R2 fällt in etwa mit der Schichtgrenze 2/3 der Refraktionsseismik zusammen, weist aber nicht das starke Relief dieser Grenze auf. Der Reflektor R2/R3 entspricht dem untersten Reflektor, während Reflektor R3 mit der Refraktionsseismik nicht ermittelt werden konnte.

Dieses Beispiel zeigt, daß beide seismische Verfahren unterschiedliche Ergebnisse mit unterschiedlicher Auflösung liefern können. Es geht auch daraus hervor, daß die Refraktionsseismik zur Erkundung der Lagerungsverhältnisse um und unter Deponien geeignet ist, während die Reflexionsseismik nur für den tieferen Untergrund weitgehendere Erkenntnisse liefern kann.

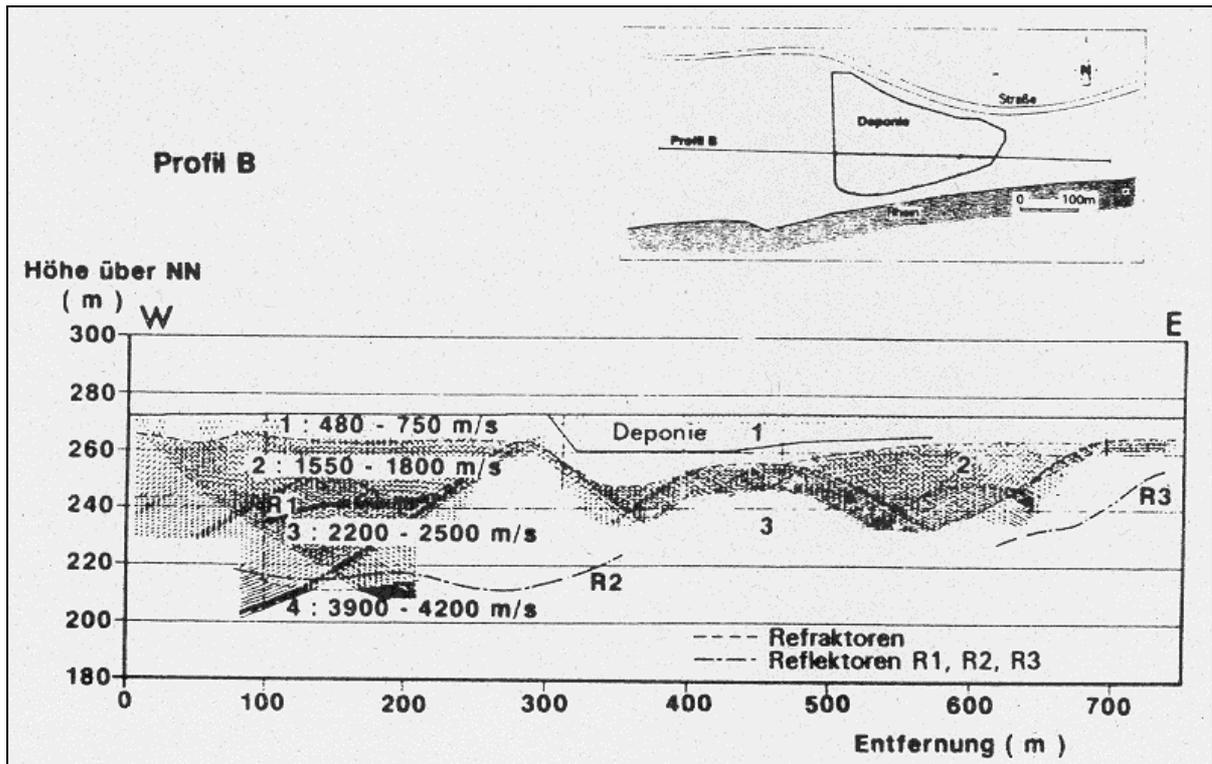


Abb. 32: Ergebnisse von refraktions- und reflexionsseismischen Messungen am Modellstandort Herten (Untersuchungen: Gesellschaft für Baugelogie und -meßtechnik mbH, Rheinstetten; Koordination: SCHLEGEL & PARTNER, 1988/89)

2.4 Gravimetrie

Gravimetrische Vermessungen nutzen die Veränderungen des Schwerfeldes der Erde aufgrund von Dichteinhomogenitäten im Untergrund befindlicher Strukturen aus. Zur Erfassung von Dichteanomalien müssen von den registrierten relativen Schwerewerten bekannte orts- und zeitabhängige Referenzwerte abgezogen werden, z.B. Gezeitenwirkung, Höhe des Meßpunktes zum Bezugsniveau (Freiluftkorrektur), Geländere relief in der Umgebung (topographische Korrektur), Gesteinsschicht zwischen Meß- und Bezugsniveau (Bouguer-Korrektur) sowie bekannte geologische Strukturen.

Diese Korrekturen können größer sein als die Schwereanomalien einer Altlast. Bei einer fehlerhaften Korrektur kann es geschehen, daß die Schwerewirkung der Altlast völlig unterdrückt wird.

Das Meßprinzip wird in Abb. 33 veranschaulicht. Die Schweremessungen werden mit Gravimetern ausgeführt, die im Prinzip hochempfindliche Federwaagen darstellen. Die Änderungen der Federlängen stehen in direktem Zusammenhang mit Schwereänderungen.

Anwendungsgebiete bei der Altlastenerkundung sind die Erfassung der randlichen Begrenzung der Deponie und die Abschätzung der Dichte des Deponiekörpers. Voraussetzungen für ausreichend sichere gravimetrische Ergebnisse sind genügend große Dichteunterschiede des Deponiekörpers gegen das Nebengestein und eine ausreichende Mächtigkeit.

Die Methode ist insgesamt sehr aufwendig; z.B. müssen wegen des starken Einflusses der Meßhöhe die Gravimeterpunkte exakt nivelliert werden. Zudem gibt es sehr viele Möglichkeiten der Verursachung kleiner gravimetrischer Anomalien und damit Vieldeutigkeiten. Z.B. lohnt es nicht, mit Schweremessungen kleinere Hohlräume in inhomogener Umgebung suchen zu wollen.

In Abb. 34 ist das Ergebnis einer gravimetrischen Vermessung am Modellstandort Mühlacker entlang eines 200 m langen Meßprofils mit Meßpunktabständen von 10 m auf der Deponie und 20 m in der Umgebung dargestellt. Die Auswertung der gravimetrischen Meßwerte umfaßte nur die Freiluft- und topographische Korrektur. In ihr ist die Deponie vorläufig als negative Schwereanomalie erkennbar. Diese Anomalie könnte jedoch verschwinden, wenn die Bouguer-Korrektur, welche unbedingt erforderlich ist und welche die Schwerewirkung der Umgebung berücksichtigt, durchgeführt worden ist.

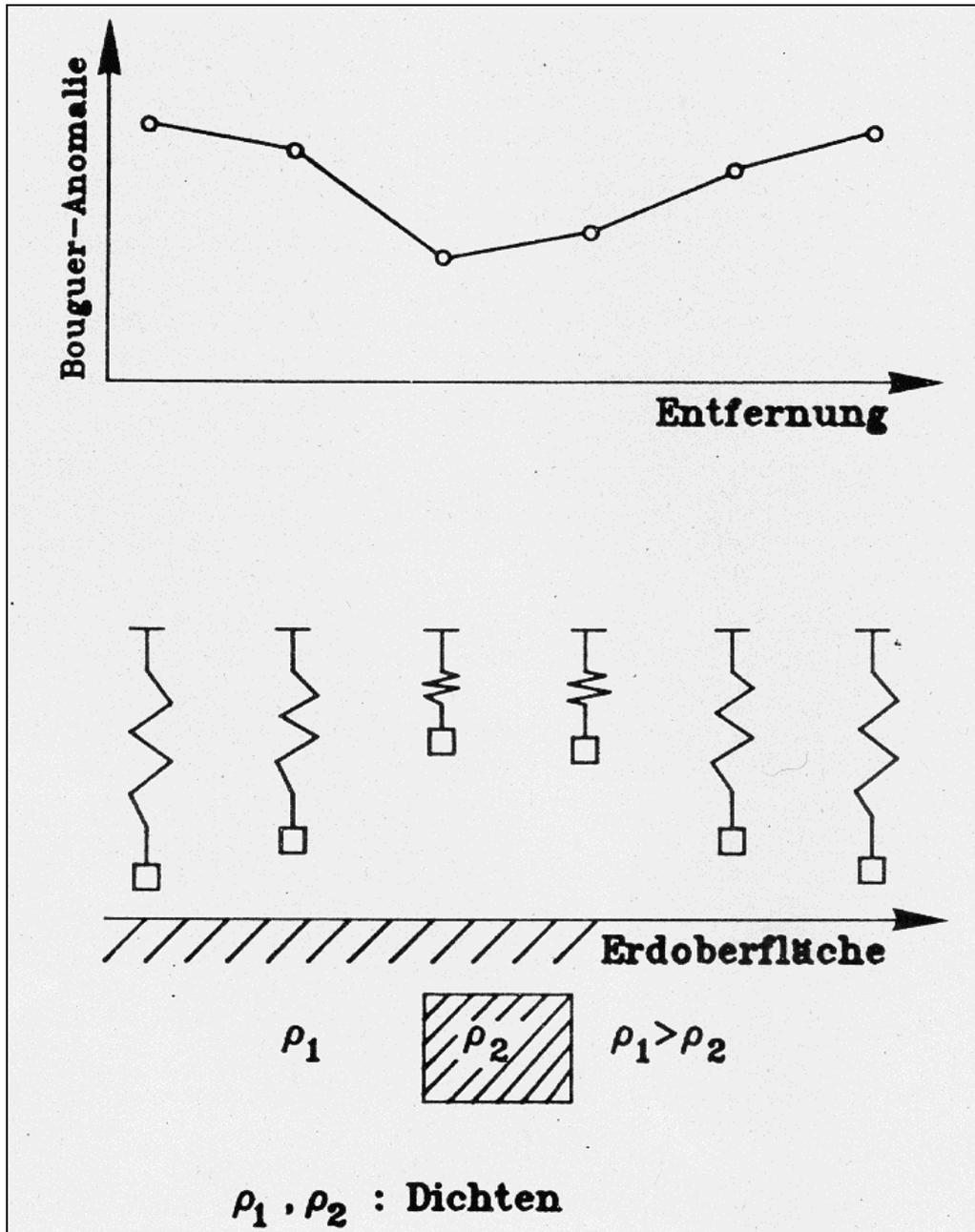


Abb. 33 : Meßprinzip einer gravimetrischen Vermessung

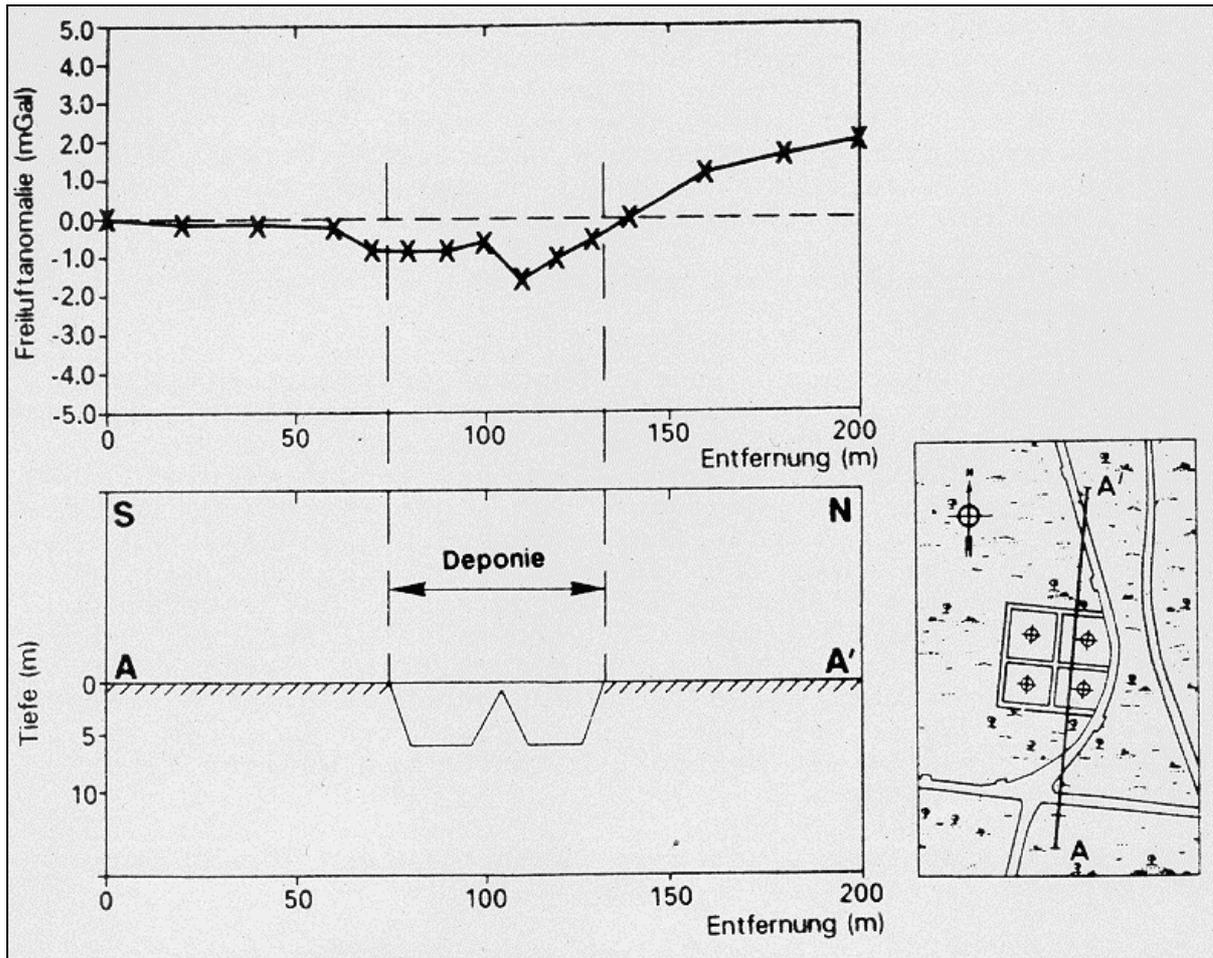


Abb. 34: Ergebnis einer gravimetrischen Vermessung am Modellstandort Mühlacker nach Durchführung einer Freiluft- und topographischen Korrektur (Untersuchungen: Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen, Karlsruhe; Koordination: WEBER / IFU / TAUW, 1988/89)

2.5 Geothermik

Die geothermische Oberflächenerkundung umfaßt oberflächennahe Temperaturmessungen zur Erkundung geothermischer Anomalien im Untergrund. Sie wird unterteilt in

5. Temperaturmessungen in Flachbohrungen (Dezimeter bis wenige Meter Tiefe) und
6. Infrarot(IR)-Oberflächenerkundung.

Bei der IR-Erkundung wird die Erdbodentemperatur als Strahlungstemperatur berührungslos mit IR-Detektoren aufgenommen, welche in Thermalscannern und Wärmebildkameras meist vom Flugzeug aus angewendet werden. Diese Methode ist wegen ihrer hohen Kosten, ihrer Anfälligkeit gegenüber den Witterungsverhältnissen und ihrer schwierigen Interpretierbarkeit für die Zwecke der Altlastenerkundung nur in Ausnahmefällen geeignet. Bei Einsätzen an den Modellstandorten zeichneten sich selbst hausmüllreiche Deponien, an denen durch mikrobielle Abbauprozesse eine gegenüber der Umgebung erhöhte Temperatur zu erwarten gewesen wäre, nicht ab.

Die Temperaturmessungen in Flachbohrungen werden mit Widerstandsthermometern durchgeführt, die mit speziellen Ramm- oder Nadelsonden, in deren Spitze sie eingelassen sind, in den Boden eingebracht werden. Die Wärmeübertragung erfolgt durch Wärmeleitung. Bei den Messungen ist sicherzustellen, daß die durch das Bohren bedingte Temperaturstörung abgeklungen ist, was in der Regel nach etwa zehnfacher Bohrzeit gegeben ist. Weiterhin müssen Einflüsse der Topographie, der Vegetation sowie von Vernässungszonen u.ä. vermieden werden. Bei Meßtiefen bis ca. 0,5 m muß die evtl. noch wirkende Tagesvariation der Temperatur über periodische Messungen an einem Basispunkt berücksichtigt werden. Die Messungen sollten in einem regelmäßigen Meßraster mit Meßpunktabständen von wenigen Metern durchgeführt werden.

Mit den Temperaturmessungen in Flachbohrungen können ggf. Sickerwege in Altlasten erkundet werden.

Abb. 35 zeigt das Ergebnis einer geothermischen Messung am Modellstandort Bitz. Die Vermessung mit einem Temperaturmeßfühler, der in Bohrlöcher von ca. 50 cm Tiefe eingebracht wurde, erbrachte eine weitgehend homogene Temperaturverteilung im Deponiebereich. Es gibt zwei Ausnahmen: eine positive Anomalie "C" im Bereich der Tennisplätze und eine negative Anomalie "D" im Osten am Steilhang des Deponiekörpers. "C" wird vermutlich vom dort lagerndem Rotkrant zum Bau der Tennisplätze hervorgerufen. "D" korreliert ungefähr mit der Eigenpotentialanomalie (siehe Abb. 19) und kann auf Sickerwasser hindeuten.

Beide geothermische Anomalien beruhen mit großer Sicherheit auf Oberflächeneffekten. Es lassen sich offensichtlich keine Hinweise auf mögliche Wärmeproduktion durch im Deponiekörper stattfindende Gärungs- oder Oxydationsprozesse ableiten. Dies gilt auch für eine Thermalscannerbefliegung dieser Deponie: Ihre Temperaturkarte der Deponieoberfläche und der Umgebung weist ähnliche Anomalien auf wie die hier in 50 cm Tiefe.

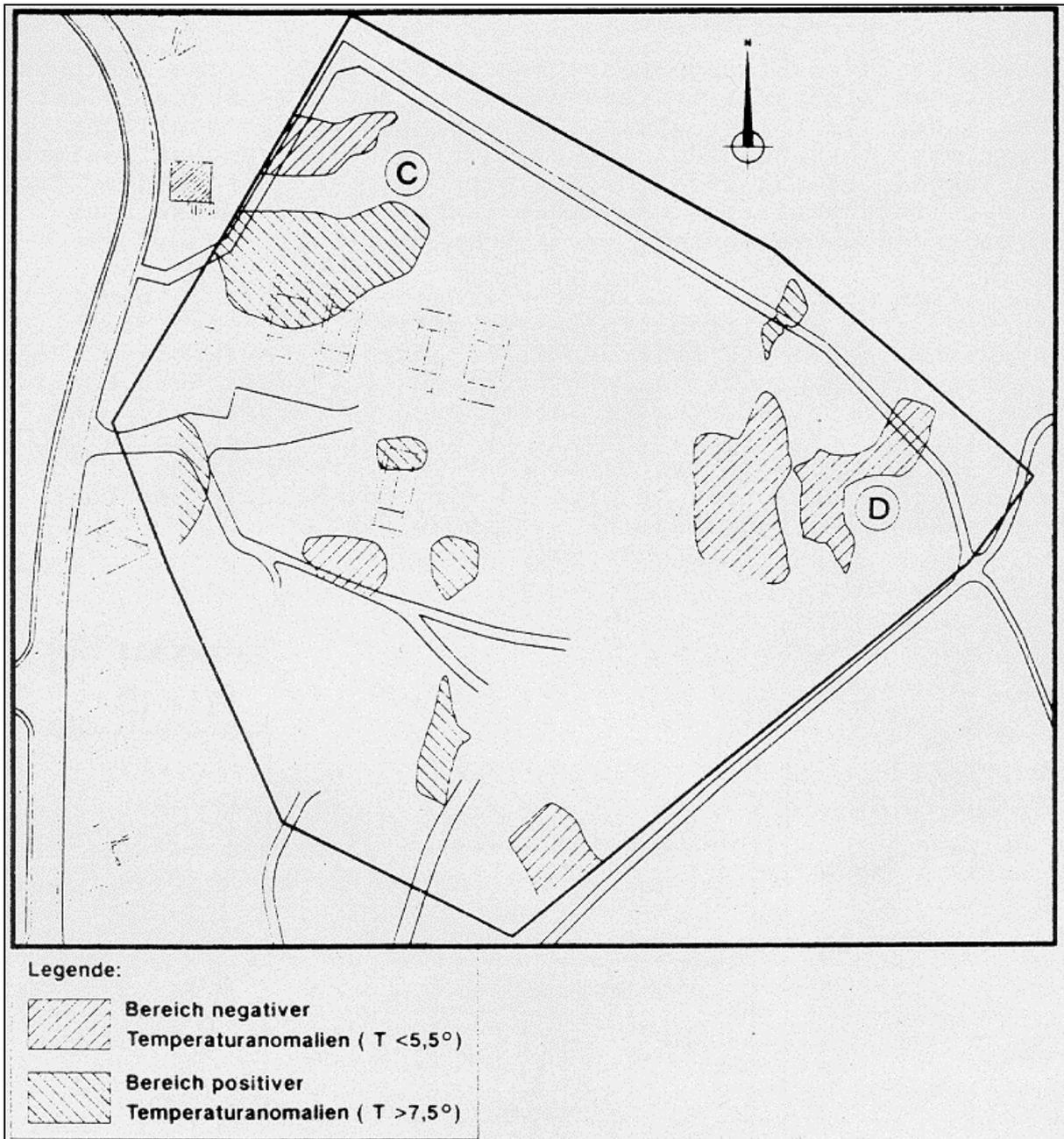


Abb. 35: Gebiete mit geothermischen Anomalien am Modellstandort Bitz (Untersuchungen: Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen, Karlsruhe Koordination: VEDEWA, 1988/89)

Drei Übersichtstabellen nach REPSOLD u. SCHNEIDER (1988) dienen zur Orientierung bei der Auswahl der Verfahren:

- Tab. 3 zeigt die Einsatzmöglichkeiten der Verfahren in offenen und verrohrten Bohrlöchern in Locker- und Festgesteinen.
- Tab. 4 führt für jedes Verfahren unmittelbare und korrigierte Meßgröße und Untersuchungsziel auf.
- Tab. 5 gliedert die Verfahren nach Zielbereichen.

2.6.2 Gamma-Ray Messung (GR)

Die mit der Gammasonde gemessene natürliche Gammastrahlung rührt von Isotop ^{40}K und von den Isotopen der Uran- und Thorium-Reihen her. Die Gammamessung gestattet, Ton- und Sandschichten zu unterscheiden und bei mehr oder weniger tonigen Sedimenten den Tongehalt abzuschätzen. Sie kann auch zur Kontrolle eingebrachter Tonsperren herangezogen werden.

Die natürliche Gammastrahlung wird mit einem Szintillationszähler gemessen.

Die Schichtauflösung ist von der Fahrgeschwindigkeit und der Zählrate abhängig, die meist so aufeinander abgestimmt werden, daß eine Auflösung von 30 bis 50 cm erreicht wird.

Gamma-logs können auch in trockenen und verrohrten Bohrlöchern erfolgen.

2.6.3 Neutronenmessung (N)

Schnelle Neutronen werden von einer Neutronenquelle (meist Americium-Beryllium oder Plutonium-Beryllium) im Bohrloch kontinuierlich ausgesandt und regen das umgebende Material zu einer Strahlung an. Diese wird gemessen und erlaubt Rückschlüsse auf Gesteinsfluide und Porositäten.

Diese Messung wird wegen der stark strahlenden Quelle und den damit verbundenen Sicherheitsvorschriften nur selten durchgeführt.

Bohrlochmeßverfahren	Trockenes Loch		Unverrohrtes (offenes) Loch mit Spülung oder Wasser gefüllt		Stahlverrohrtes oder -verfiltertes Loch mit Spülung oder Wasser gefüllt		Kunststoffverrohrtes oder -verfiltertes bzw. mit nicht metallischem Material ausgebautes Loch mit Spülung oder Wasser gefüllt	
	im Locker-gestein	im Fest-gestein	im Locker-gestein	im Fest-gestein	im Locker-gestein	im Fest-gestein	im Locker-gestein	im Fest-gestein
Gamma Ray (GR)	+	+	+	+	*1	*1	*1	*1
Neutron (N) **	+	*2	+	+	-	-	-	*3
Sonic Log (SONIC)	+	+	+	+	-	-	-	-
Elektriklog (EL)	+	*4	+	+	-	-	*5	-
Eigenpotential (EP)	+	+	+	+	-	-	+	+
Fokusa Elektriklog	+	+	+	+	-	-	+	+
Laterolog (FEL LT)	+	+	+	+	-	-	-	-
Induktion (FEL IT)	+	+	+	+	-	-	+	+
Mikrolateralog (ML ML)	+	+	+	+	-	-	+	+
Mikrolateralog (ML ML)	+	+	+	+	-	-	+	+
Salinometer (SAL)	+	+	+	+	-	-	+	+
Temperatur (TEMP)	+	+	+	+	+	+	+	+
Kaliber (CAL)	+	-	+	+	+	+	+	+
Fluorimeter (FLOW)	-	-	-	-	-	-	-	-

Nur in
*) Ausnahmefällen anzuwenden
Messung ohne Einschränkung möglich
+ Einschränkung möglich
- Messung nicht möglich bzw. nicht sinnvoll
Messung mit Einschränkung möglich

Tabelle 3: Die wichtigsten Bohrlochmeßverfahren und deren Anwendungsmöglichkeiten (nach REPSOLD u. SCHNEIDER 1988)

Erläuterungen zu Tab. 3:

- *1) Unerwünschte Dämpfung durch Verrohrung, Ausbau und große Bohrlochdurchmesser, Kontrolle von Tonsperren jedoch möglich.
- *2) Nur für qualitative Korrelationszwecke, keine verlässliche Umrechnung in Porositätswerte.
- *3) In den Filterstrecken Aufnahme eines Widerstandsprofils möglich, jedoch keine quantitativ auswertbaren Widerstandswerte.
- *4) Voraussetzung für die quantitative Auswertung ist eine Ton-Sand-Wechselagerung; häufig Störungen durch nicht identifizierbare Basissprünge. In wassergefüllten Festgesteinsbohrungen meist keine deutbare EP-Kurve.
- *5) Wie *2), außerdem u.U. geeignet zur Kontrolle auf undichte Rohrverbindungen und Leckstellen.
- *6) Zweifelhaft bei hilfswise eingebauten "geschlitzten" Rohren: u.U. starke Teufen- bzw. Mengenverfälschung.
- *7) Mindestpumpraten (min. Förderstrom) sind zu beachten!

Tabelle 4: Wirkungsweise der Bohrlochmeßverfahren (nach REPSOLD u. SCHNEIDER 1988); Abkürzung der Verfahren siehe Tab. 3

Kurzbezeichnung	Unmittelbare Meßgröße	Korrigierte Meßgröße	Untersuchungsziel
GR	Impulsrate der einfallenden natürlichen Gammastrahlung	Natürliche Radioaktivität der Gesteinsschichten	Gebirgsaufbau insbesondere Tongehalte
N*)	Impulsrate der aufgrund künstl. Neutronenbeschusses anfallenden Sekundärgamma- bzw. thermischen Neutronenstrahlung (NG bzw. NN)	Porosität	Porosität
SONIC	Laufzeit von seismischen Wellen zwischen Geber und Empfänger der Sonde	Geschwindigkeit seismischer Wellen im Gestein	Porosität Kluftigkeit
EL	Scheinbarer spezifischer Widerstand	Wahrer spezifischer Gesteinswiderstand	Gebirgsaufbau Wasserführung
EP	Potentialdifferenz zwischen Bohrlochelektrode und Erdoberfläche	Potentialdifferenz zwischen Sanden und Tonen	Gebirgsaufbau Wasserführung

FEL.LL	Scheinbarer spezifischer Widerstand	Wahrer spezifischer Gesteinswiderstand	Gebirgsaufbau Wasserführung
IES	Scheinbarer spezifische Leitfähigkeit	Wahre spezifische Gesteinsleitfähigkeit, wahrer spezifischer Gesteinswiderstand	Gebirgsaufbau Wasserführung
ML.MLL	Scheinbarer spezifischer Widerstand	Wahrer spezifischer Widerstand im Bohrlochwandbereich	Auflösung von Feinschichtungen
SAL	Spezifischer Widerstand der Bohrlochflüssigkeit		Lösungsinhalt (Versalzung) der Bohrlochflüssigkeit
TEMP	Temperatur der Bohrlochflüssigkeit		Geothermischer Gradient
CAL	Bohrlochdurchmesser		Korrekturgröße für andere Verfahren
FLOW	Drehzahl eines Meßflügels (Impellers)	Vertikale Fließgeschwindigkeit im Bohrloch	Ermittlung von Wasserzutritten und -abflüssen

*) Nur in Ausnahmefällen anzuwenden

Tabelle 5: Gliederung der Bohrlochmeßverfahren nach Zielbereichen (nach REPSOLD u. SCHNEIDER 1988) ; Abkürzung der Verfahren siehe Tab. 3

Methoden in nicht ausgebauten Versuchs- und Aufschlußbohrungen				Methoden zur Kontrolle von Ausbauten und zur Feststellung von Betriebsdaten		
Lockergestein		Festgestein		Locker- und Festgestein		
Gebirgsaufbau	Wasserqualität	Gebirgsaufbau Klüftigkeit Grundwasserzuflüsse	Wasserqualität	Ausbau	Grundwasserzuflüsse	Wasserqualität
GR N *) SONIC EL FEL IES	EL EP FEL IES	SONIC EL FEL IES ML/MLL SAL TEMP CAL FLOW	SAL TEMP	GR EL FEL CAL	FEL SAL TEMP FLOW	SAL TEMP

*) Nur in Ausnahmefällen anzuwenden

2.6.4 Messung der Schallgeschwindigkeit im Gestein (SONIC)

Mit dem **Sonic Log (Akustiklog)** wird die Laufzeit des Schalls (Longitudinalwelle) aufgezeichnet. Die Anregung erfolgt über eine Schallquelle in der Sonde.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls in Sedimentgesteinen, und damit die gemessene Laufzeit, hängt von der Lithologie und von der Porosität ab.

Die Ergebnisse sind wichtig für die Kalibration refraktions- und reflexionsseismischer Messungen an der Erdoberfläche sowie für die Bestimmung der Porosität.

2.6.5 Elektriklog (EL)

Dieses Verfahren dient der Messung des Gesteinswiderstandes. Die gemessenen Widerstände sind scheinbare Widerstände (Mischwiderstände), weil die Messungen stets in einem mit Spülung oder Wasser gefüllten Bohrloch stattfinden.

Standardmäßig wird mit zwei verschiedenen Elektrodenentfernungen gemessen:

Die 40 cm-Normale hat eine geringe seitliche Erfassungstiefe und besitzt dafür eine gute Schichtenauflösung bis etwa 0,5 m Mächtigkeit. Die 160 cm-Normale hat eine größere seitliche Aufschlußtiefe. Die Schichtenauflösung ist jedoch merklich geringer als bei der 40 cm-Normalen und erreicht nur etwa 2 m.

2.6.6 Eigenpotentialmessung (EP)

Das Eigenpotential besteht aus elektrochemischen und kinetischen Potentialen (vgl. Abschn. 2.2.1.4).

Grundsätzlich gilt, daß eine Anzeige der Kurve zum Positiven auf ein Ansteigen der Porenwassersalinität, also auf salzigeres Wasser, eine Anzeige zum Negativen auf süßeres Wasser hinweist, wenn sich der Tongehalt gleichzeitig nicht oder nur unwesentlich ändert.

Aus der EP-Kurve sind außerdem Rückschlüsse auf den Tongehalt der Schichten und deren Wasserdurchlässigkeit möglich, vor allem in Kombination mit Elektrik-, Gamma-Ray- und IP-Logs.

Voraussetzung für eine quantitative Interpretation der EP-Kurve ist eine deutliche Ton-Sand-Wechselagerung und ein merklicher Salinitätsunterschied zwischen Spülungsfiltrat und Porenwasser.

2.6.7 Fokussiertes Elektriklog (FEL), Laterolog (LL)

Diese Widerstandsmessungen in fokussierter, gerichteter Anordnung unterscheiden sich von den Elektriklogs (Abschn. 2.6.5) dadurch, daß das von einer einzelnen Bohrlochelektrode ausgehende Stromfeld fokussiert wird. Auf diese Weise erhöht sich die vertikale Auflösung und die seitliche Aufschlußtiefe.

Bei einer fokussierten Sonde mit einer Meßelektrodenlänge von 10 cm und einer Gesamtlänge von etwa 2 m bei 35 mm Durchmesser beträgt die maximale Schichtenauflösung etwa 20 cm, die seitliche Aufschlußtiefe entspricht der einer 160 cm-Normalen.

FEL-Logs sind auch für die Kluftdetektion in Festgesteinen geeignet. Allerdings lassen sich nicht so hohe Widerstände messen wie bei der 40 cm- und 160 cm-Anordnung.

2.6.8 Induktionsmessung (IES)

Induktionsmessungen im Bohrloch zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit des Materials erfolgen nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kartierungen (Abschnitt 2.2.2.1). Von einer auf der Meßsonde angebrachten Sendespule werden elektromagnetische Wellen, meist mit einer Frequenz um 20 kHz, in das umgebende Material abgestrahlt. Je nach Leitfähigkeit des Materials bilden sich in diesem Wirbelströme aus, deren magnetische Felder in einer Empfangsspule, die auch auf der Meßsonde angebracht ist, Spannungen induzieren. Daraus ergibt sich die elektrische Leitfähigkeit des Materials.

Die Induktionssonde ist speziell für luftgefüllte Bohrungen oder Bohrungen mit schlecht leitender Spülung (z.B. Ölspülung), bei denen die anderen elektrischen Bohrlochverfahren nicht anwendbar sind, entwickelt worden. Sie eignet sich nicht für Material mit geringer Leitfähigkeit ($\leq 10^{-2}$ S/m).

2.6.9 Salinometermessung (SAL)

Die **Salinometersonde** mißt den spezifischen Widerstand der Bohrlochflüssigkeit. Sie hat kleine Elektrodenabstände. Die Elektrodenanordnung ist in einem innen isolierten metallischen Rohr angebracht, durch das die Bohrlochflüssigkeit hindurchströmen kann. Dadurch können die Gesteinswiderstände die Messung nicht beeinflussen.

Salinometermessungen dienen hauptsächlich für Korrekturen zur Ermittlung des wahren spezifischen Gesteinswiderstandes aus dem Elektriklog oder dem FEL-Log. In ausgebauten Grundwassermeßstellen oder Festgesteinsbohrungen können u.U. auch Wasserzuflüsse oder -abflüsse erkannt werden.

2.6.10 Temperaturmessung (TEMP)

Es wird ein elektrisches Widerstandsthermometer verwendet, das die Temperatur im Bohrloch fortlaufend in Abhängigkeit von der Tiefe registriert. Soll die Temperatur in möglichst ungestörten Verhältnissen gemessen werden, müssen die durch den Bohrvorgang hervorgerufenen Temperaturstörungen abgeklungen sein.

Wegen des Jahrestemperaturganges kann der natürliche Temperaturanstieg mit der Tiefe (geothermischer Gradient: im Mittel $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) erst ab ca. 20 m Tiefe beobachtet werden. Abweichungen vom normalen Temperaturverlauf können auf vertikale Wasserbewegungen im Bohrloch oder im umgebenden Gestein hindeuten. An Wasserein- und Wasseraustrittsstellen zeigt die Temperaturkurve häufig mehr oder weniger scharfe Unstetigkeiten (Knicke). Speziell bei Altablagerungen ergeben sich Hinweise auf chemische Zersetzungsprozesse oder biologische Abbauprozesse, die häufig unter Wärmeentwicklung ablaufen.

2.6.11 Flowmetermessung (FLOW)

Bevor eine Grundwasser-Meßstelle in Betrieb genommen wird, sollte geprüft werden, aus welchen der durchteuften Schichten das Wasser der Bohrung zuströmt. Hierzu bedient man sich des Flowmeters (Durchflußmessers), das während des Pumpens mit konstanter Geschwindigkeit in die Bohrung eingefahren wird und fortlaufend die vertikale Fließgeschwindigkeit des Wassers im Bohrloch registriert.

Wenn das Flowmeter an einer Wasseraustrittsstelle vorbei abwärts fährt, geht die Umdrehungszahl des Meßflügels zurück, weil die zusätzlich zufließende Wassermenge unterhalb der Austrittsstelle fehlt.

Aus der um die Fahrgeschwindigkeit reduzierten Flowmeter-Anzeige ergibt sich der Anteil jeder einzelnen fördernden Schicht an der Gesamtförderung. Hierbei kann es sich, vor allem bei Festgesteinsbohrungen und Kluftwasserleitern, auch um eine "negative" Förderung, d.h. einen Abfluß aus der Bohrung ins Gebirge, handeln.

Im unverrohrten Bohrloch im Festgestein muß zusätzlich ein Kaliber-Log gefahren werden, da sonst das Flowmeterdiagramm nicht interpretierbar ist.

Wichtige Voraussetzungen für eine erfolgreiche Anwendung der Flowmetermessung sind nicht zu große und möglichst konstante Bohrlochdurchmesser sowie nicht zu kleine Strömungsgeschwindigkeiten.

2.6.12 Kalibermessung (CAL)

Die kontinuierliche Aufzeichnung des Bohrlochdurchmessers gibt Auskunft über Auskesselungen, die auf Lockermaterial oder Nachfallzonen in klüftigem Festgestein hindeuten, und Bohrlochverengungen. Diese beobachtet man an quellenden Tönen.

Üblicherweise benutzt man Kalibergeräte mit vier Federarmen, die je nach Durchmesser der Bohrung eine entsprechende Spreizung erfahren.

Kaliber-Logs sollten bei Zementations- und Verfüllungsarbeiten sowie beim Absetzen von Verrohrungen vorgenommen werden. Ferner dienen sie zu Korrekturzwecken bei der Auswertung anderer Bohrlochmessungen.

2.7 Weitere Verfahren

Außer den unter 2.1 bis 2.6 aufgeführten Methoden können noch weitere geophysikalische Verfahren zur Altlastenerkundung eingesetzt werden.

Als Beispiel dient die **isotopenhydrologische Altersbestimmung**. Hierbei können in der Nähe von Altlasten in den Böden gespeicherte Nitrate, Sulfate und Pestizide in Grundwasservorkommen durch Altersbestimmungen auf ihren Gefährdungsgrad untersucht werden.

Grundwasser bewegt sich wesentlich schneller als adsorptiv gebundene Spurenstoffe. Mit Hilfe einmaliger **Tritiumbestimmungen** kann nachgewiesen werden, ob Grundwasser vorhanden ist, das nach 1964, als die Atomtestserie beendet wurde, neu gebildet worden ist. Falls das Grundwasser älter ist, braucht für die nächsten Jahrzehnte nicht mit dem Auftreten der o.g. Schadstoffe gerechnet zu werden. Falls Tritium nachzuweisen ist, kann eine zeitliche Eingrenzung auf Monate bis maximal drei Jahre mit Hilfe monatlicher Analysen der Sauerstoffisotopenzusammensetzung an 15 ml großen Proben erreicht werden. Um bei alten Grundwasservorkommen festzustellen, ob die Entnahmen zu einer Übernutzung führen, können im zweijährigen Abstand durchgeführte Radiokohlenstoffmessungen (Proben, die aus 5-60 l Wasser vor Ort chemisch extrahiert werden) dienen.

3 Auswertung

3.1 Anwendungsbereiche

Geophysikalische Messungen an Altlasten können zur Lösung folgender Probleme angewendet werden:

Erkundung der Geologie des Umfeldes: Mit Hilfe der Geophysik können geologisch/hydrogeologische Fragestellungen im Umfeld einer Altlast geklärt werden. Hierzu zählen die Erkundung des geologischen Schichtenaufbaus, der tektonischen und der hydraulischen Strukturen, welche die Grund- und Sickerwasserbewegungen beeinflussen. Dieser geophysikalische Nachweis von Verwerfungen, Spalten oder Kluftzonen, z.B. in Karstgebieten, sowie die Ermittlung des Verlaufs und der Tiefe von Grundwasser-Horizonten sollte in der Umgebung von Altlasten erfolgen.

Erkundung der Altlast: Hierbei lassen sich zwei wesentliche Anwendungsbereiche unterscheiden:

- **Lokalisierung**: Bei flächendeckenden Erhebungen und Untersuchungen von Einzelflächen kann die Geophysik feststellen, wo problematische Flächen liegen, unter denen überdeckte Altlasten zu vermuten sind.
- **Identifizierung**: Für die Abschätzung des Gefahrenpotentials ist die Kenntnis der Verteilung bestimmter Schadstoffe innerhalb von Altlasten, z.B. galvanische Schlämme, erforderlich. Je nach anzutreffender Situation kann die Geophysik dabei Angaben über die räumliche und flächige Anordnung des gesuchten Materials machen, während Bohrungen nur punktbezogene Informationen liefern.

Außerdem können bei physikalisch homogenem Aufbau die Mächtigkeit einer Altlast und ggf. die Mächtigkeiten der abdichtenden Schichten geophysikalisch bestimmt werden.

Erkundung der Schadstoffausbreitung: Schadstoffe im Umfeld von Deponien können durch geophysikalische Messungen aufgespürt werden, wenn die physikalischen Eigenschaften des Untergrundes meßbar verändert worden sind. Dies gilt insbesondere für salinar gekennzeichnete Schadstoffe, die sich im Abstrom des Grundwassers ausgebreitet haben.

Der wesentliche Vorteil von geophysikalischen Messungen an Altlasten liegt in der zerstörungsfreien Untersuchung. Während bei Bohrungen und Schürfarbeiten abdichtende Schichten perforiert und Deponie-Inhalte umgelagert werden müssen, wird bei geophysikalischen Messungen weder der Aufbau einer Deponie noch ihre Abdichtung beeinträchtigt. Arbeitsschutzmaßnahmen sind daher nur bei Altlasten mit toxischen Emissionen notwendig.

Tab. 6 gibt, soweit dies möglich ist, einen Überblick, für welchen Anwendungsbereich die einzelnen geophysikalischen Verfahren geeignet, eingeschränkt geeignet bzw. ungeeignet sind. Nähere Details sind in den Abschn. 3.2 und 3.4 zu finden.

3.2 Übertragbarkeit

Die erfolgreiche Anwendung geophysikalischer Methoden in der Altlastenerkundung hängt wesentlich von der Art des eingelagerten Materials und von den hydrogeologischen Standortverhältnissen ab. Allgemein gilt, daß die Anwendbarkeit geophysikalischer Verfahren an die Existenz hinreichend großer Unterschiede in den petrophysikalischen Eigenschaften des Untergrunds geknüpft ist (z.B. im spezifischen elektrischen Widerstand oder in der Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen). Voraussetzung jeder geophysikalischen Untersuchung ist, daß keine störenden Einflüsse technischer Art (z.B. im Boden verlegte metallische Leitungen, Induktionen von Hochspannungsleitungen oder Verkehrsanlagen) in unmittelbarer Nähe des Meßgebietes vorhanden sind.

In diesem Abschnitt wird beschrieben, an welchen Altlastentypen (Abschn. 3.2.1) und hydrogeologischen Standorttypen (Abschn. 3.2.2) der Einsatz der einzelnen geophysikalischen Verfahren möglich ist. Die Ergebnisse sind in Tab. 7 zusammengefaßt. Für jeden Typ wird dort die Anwendbarkeit der Verfahren angegeben. Es werden nur die Verfahren der Oberflächengeophysik behandelt. Eine entsprechende Zusammenstellung für die verschiedenen Verfahren der Bohrlochgeophysik ist im Abschn. 2.6.1 (Tab. 3, 4 und 5) zu finden.

Die Anwendungsgrenzen der Verfahren werden im Abschn. 3.2.3 beschrieben.

3.2.1 Altlastentypen

3.2.1.1 Allgemeines

Es werden folgende Typen von Altlasten unterschieden:

- Hausmülldeponie
- Industriemülldeponie (Monodeponie)
- Sondermülldeponie
- Bauschuttdeponie
- Erddeponie
- Sonstige Deponien
- Industriebrache, z.B. Gaswerksgelände.

In Tab. 7 sind nur die Altlastentypen aufgeführt, die im Modellstandortprogramm untersucht worden sind.

Tabelle 6 : Anwendungsmöglichkeiten der geophysikalischen Verfahren bei der Altlastenerkundung

Anwendungsbereich	Erkundung der Geologie des Umfeldes	Erkundung der Altlast	Erkundung der Schadstoffausbreitung	Bemerkung
Verfahren				
Geomagnetik	(+) (in Ausnahmefällen)	(+) (bei magnetischem Inhalt)	-	entfällt bei Häufung von ferromagnetischen Installationen
Geoelektrische Kartierung	+ (nicht in allen Fällen geeignet)	+	(+) (Forschungsbedarf)	entfällt bei Häufung von metall. Leitungen und Installationen
Widerstandssondierung	+	(+) (Bei homogenem Aufbau)	dto.	dto.
Induzierte Polarisation	(+) (in Ausnahmefällen)	(+) (Forschungsbedarf)	(+) (Forschungsbedarf)	dto.
Eigenpotentialmessung	(+) (in Ausnahmefällen)	(+) (Forschungsbedarf)	-	dto.
Elektromagnetische Kartierung	+ (Erkundungen von Verwerfungen. u.ä.)	+	+	dto.
VLF	(+)	+	(+) (Forschungsbedarf)	begrenzte Eindringtiefe
Bodenradar	(+) (nur in trockenem Substrat, geringe Tiefe)	(+) (nur zur Lokalisierung)	-	bedarf noch der Verifizierung
Refraktionsseismik	+ (nicht in allen Fällen geeignet)	(+) (nur zur Lokalisierung)	-	ziemlich aufwendig, Störungen durch Bodenunruhe
Reflexionsseismik	(+) (für manche Fragestellungen geeignet)	-	-	sehr aufwendig, Störungen durch Bodenunruhe
Gravimetrie	-	(+) (nur zur Lokalisierung)	-	aufwendig, nur bei ruhiger Topographie
Geothermik	-	(+) (Forschungsbedarf)	-	
Bohrlochgeophysik	grundsätzlich in allen Bohrungen anzuwenden			

- + Einsatz möglich
- (+) Einsatz mit Einschränkungen möglich
- Einsatz nicht möglich

Standort- typen	Altlasten- Typ			Hydrogeologie-Typ				Bemerkungen
	Hausmülldeponie	Industriemüll- deponie	Industriebrache	Kluft- bzw. Karst- Grundwasserleiter (Festgestein); Typen 8,9,14	Grundwassergeringlei- ter(fest- oder Locker- gestein),GW – Stand hoch; Typen 1,4,5,7	Grundwassergeringlei- ter(fest- oder Locker- gestein),GW – Stand tief; Typen 2,3,6	Porengrundwasserleiter (Lockergestein); Typen 10,11,12,13,15	
Verfahren								
Geomagnetik	1)	2)	*	-	-	-	-	1) nur zur Lokalisierung 2) Ortung von Einzelobjekten
Geoelektrische Kartierung	+	+	+	*	+	+	+	
Widerstandssondierung	+	+	-	*	+	+	+	
Induzierte Polarisation	*	*	*	*	+	*	*	Forschungsbedarf
Eigenpotentialmessung	*	*	*	*	*	*	*	Forschungsbedarf
Elektromagnetische Kartierung	+	+	*	+	+	+	+	
VLF	+	+	*	+	+	+	+	
Bodenradar	*	*	+	-	-	*	*	sehr geringe Erkundungstiefe
Refraktionsseismik	*	+	+	+	+	+	-	
Reflexionsseismik	-	-	-	*	*	*	-	Erkundungstiefe >50m
Gravimetrie	*	*	-	-	-	-	-	
Geothermik	*	*	*	-	-	-	-	Forschungsbedarf

+ Einsatz möglich
* Einsatz mit
Einschränkung möglich
- Einsatz nicht möglich

Tabelle 7: Einsatzmöglichkeiten der geophysikalischen Verfahren an verschiedenen Altlastentypen und hydrogeologischen Standorttypen

3.2.1.2 Einschränkungen

Für einige der in Tab. 7 aufgeführten Verfahren gelten folgende **eingeschränkte Einsatzmöglichkeiten** an verschiedenen Altlastentypen:

Die Geomagnetik ist im allgemeinen zur Kartierung der Umgrenzung von Hausmülldeponien geeignet. An anderen Deponien kann sie nur eingesetzt werden, wenn ferromagnetisches Material eingelagert wurde. Bei gleichmäßiger Verteilung kann die Umgrenzung ermittelt werden, bei oberflächennaher Einlagerung einzelner magnetischer Objekte, z.B. von Metallfässern, kann unter bestimmten Voraussetzungen deren Lage bestimmt werden (siehe Abschn. 2.1). Selbst wenn keine Eisenanteile vorhanden sind, kann ggf. abgelagertes Material z.B. bei Erddeponien vom ungestörten Nebengestein magnetisch abgegrenzt werden.

Für die geoelektrischen Verfahren bestehen Einschränkungen, wenn Bebauung, Stromleitungen und metallische Leitungen im Untersuchungsgebiet vorhanden sind. Außerdem ist Forschungsbedarf für die Interpretation von Messungen der Induzierten Polarisation und des Eigenpotentials vorhanden (siehe Abschn. 4.2).

Refraktionsseismische Messungen können Deponieablagerungen und Nebengestein nur dann trennen, wenn sich die seismischen Geschwindigkeiten deutlich unterscheiden. Z.B. sind die Geschwindigkeiten in Altlasten und im Festgestein meist unterschiedlich. Dagegen wird z.B. der Rand einer Hausmülldeponie, die in eine Kiesgrube eingebettet ist, im allgemeinen nur unklar deutlich erfaßt.

Die gravimetrischen Anomalien von Altlasten sind im allgemeinen sehr gering. Es besteht die Gefahr, daß sie unter dem Korrekturniveau liegen und nicht dargestellt werden können. Da außerdem hohe Untersuchungskosten entstehen, kann die Gravimetrie nur in Sonderfällen eingesetzt werden.

3.2.2 Hydrogeologische Standorttypen

Die Einsatzmöglichkeit geophysikalischer Verfahren richtet sich ebenfalls nach den **hydrogeologischen Standortverhältnissen**. Es können 15 verschiedene Standorttypen unterschieden werden, die in Abb. 37 (nach Altlastenhandbuch Baden-Württemberg Teil II, 1987) aufgeführt sind.

Die in Tab. 7, Abschn. 3.2, aufgelisteten Einsatzmöglichkeiten für die Standorttypen beziehen sich auf die Anwendungsbereiche Erkundung der Geologie des Umfeldes und Erkundung der Schadstoffausbreitung. Für vier Gruppen von Typen wird die Anwendbarkeit der geophysikalischen Methoden angegeben.

3.2.3 Anwendungsgrenzen

Wie oben erwähnt, gilt allgemein, daß die Anwendbarkeit geophysikalischer Verfahren an die Existenz hinreichend großer Unterschiede in den petrophysikalischen Eigenschaften des Untergrunds geknüpft ist. Darüber hinaus gelten für die einzelnen Verfahren folgende weitere **Anwendungsgrenzen**:

Geomagnetik:

- hohe Störanfälligkeit bei starken ferromagnetischen Störungen, z.B. durch metallische Leitungen im Untergrund, Zäune, Eisenpfosten, Pegel, Nähe zur Bebauung etc. (bei der Interpretation zu berücksichtigen)
- Erkundungstiefe ist stark vom Objektvolumen abhängig

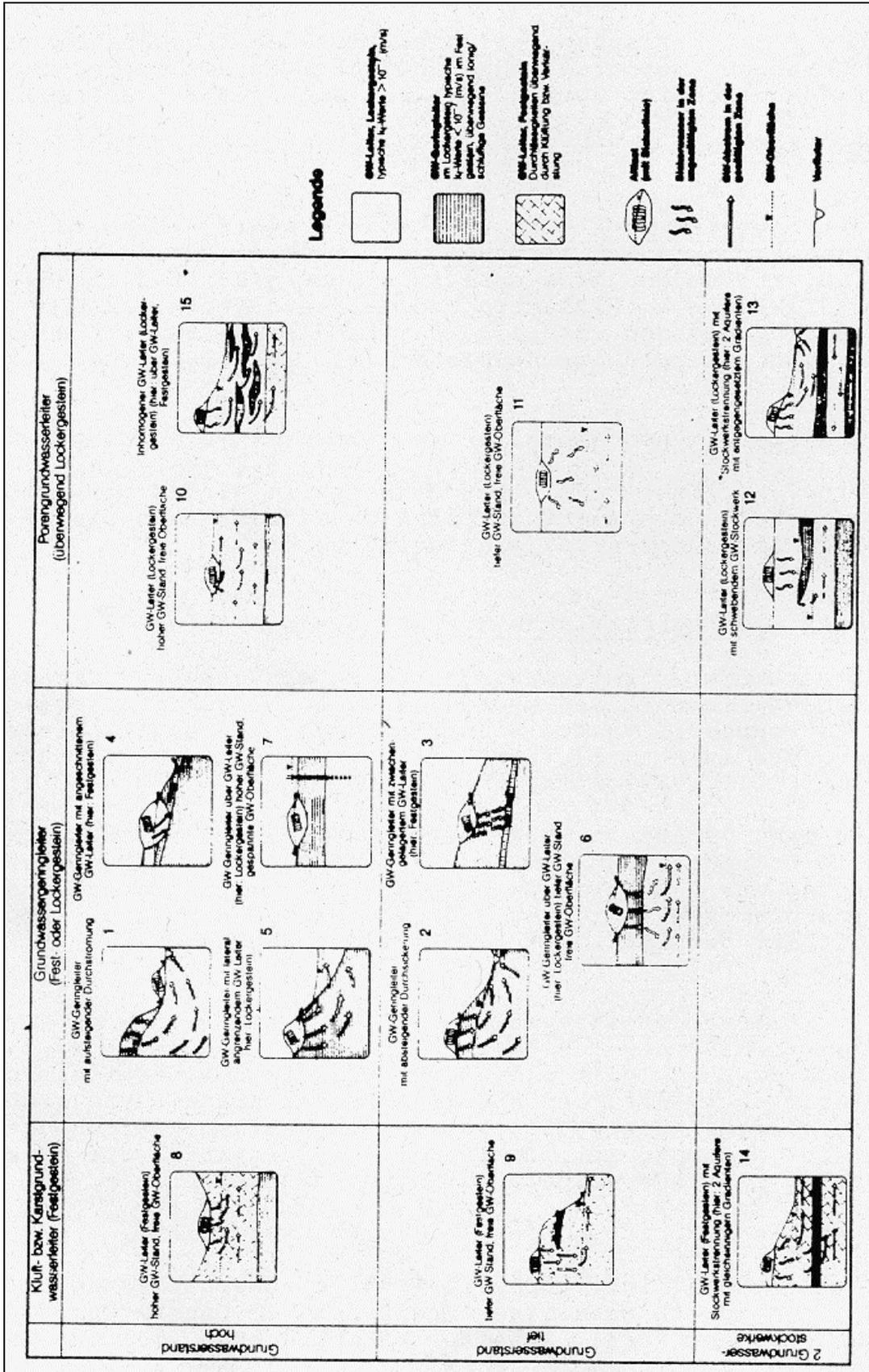


Abb. 37: Übersicht über hydrogeologische Standorttypen (nach Altlastenhandbuch Baden-Württemberg Teil II, 1987)

- Auflösung von einzelnen ferromagnetischen Objekten innerhalb eines Körpers mit insgesamt hohem Eisenanteil ist nicht möglich (z.B. Faß in Hausmüllablagerung)
- allenfalls nur qualitative Aussagen über Form, Größe und Tiefenlage einzelner Objekte im Untergrund möglich

Geoelektrische Kartierung, Widerstandssondierung:

- gering empfindlich gegen metallische Leitungen im Untergrund, Bahnlinien, Leitplanken etc.
- einfach einsetzbar bei Asphalt- und Betonböden, evtl. nicht bei Oberflächenabdichtungen von Deponien
- gut leitende Schichten (z.B. Tone und Mergel) vermindern die Eindringtiefe
- Meßwerte integrieren über einen großen Tiefenbereich
- besonders bei der Kartierung großer Meßgebiete zeitaufwendig, da jeweils die Elektroden geerdet werden müssen
- Voraussetzung für Widerstandssondierung ist eine mehr oder weniger horizontale Schichtung des Untergrunds
- bei Widerstandssondierungen sind dünne Schichten schwer zu erkennen (Prinzip der Schichtunterdrückung) und es sind meist mehrere äquivalente Lösungen möglich (Äquivalenzprinzip), vgl. Abschn. 2.2.1.3

Induzierte Polarisation:

- schwierige Interpretation der Meßergebnisse, da bisher wenig Erfahrungen bei der Altlastenerkundung
- empfindlich gegen metallische Installationen
- u.U. nicht einsetzbar bei Oberflächenabdichtungen von Deponien

Eigenpotentialmessung:

- sehr schwierige Interpretation der Meßergebnisse, da Überlagerung der Redox- und Fließpotentiale
- empfindlich gegen metallische Installationen
- empfindlich gegen Temperatur und Bodenfeuchtigkeit

Elektromagnetische Kartierung, VLF/VLF-R-Methode:

- empfindlich gegen metallische Installationen
- Tiefenlage von eingelagerten Objekten schwer zu bestimmen
- begrenzte Eindringtiefe bei der VLF- und VLF-R-Methode (bis ca. 20 m)
- das Meßprofil bei der VLF- und VLF-R-Methode muß senkrecht zur Verbindungslinie zwischen Sender und zu untersuchendem Objekt stehen

Bodenradar:

- geringe Erkundungstiefe (wenige Dezimeter bis Meter)
- empfindlich gegen Feuchtigkeit, nicht anwendbar bei stark durchfeuchteten Böden oder Untergrund
- Messungen eingeschränkt bei stärkerem Bewuchs

- große Datenmengen müssen bearbeitet werden
- hoher Informationsgehalt verbunden mit nicht ausreichender Erfahrung kann zu Fehlinterpretationen führen

Refraktionsseismik:

- aufwendig und kostenintensiv
- Störungen durch Bodenunruhe (z.B. Straßenverkehr)
- Voraussetzung ist eine Zunahme der Wellengeschwindigkeit einzelner Schichten mit der Tiefe
- geringe Schichtauflösung, dünne Schichten werden oft nicht erkannt

Reflexionsseismik:

- sehr aufwendig und kostenintensiv
- Störungen durch Bodenunruhe (z.B. Straßenverkehr)
- Erkundungstiefe z.Zt. > 50 m, da oberhalb die Messungen durch Oberflächenwellen gestört werden
- dünne Schichten werden oft nicht erkannt

Gravimetrie:

- aufwendig
- nur bei ruhiger Topographie anwendbar, d.h. in ebenem Gelände
- umfangreiche Auswertung und Interpretation
- Fehlinterpretation aufgrund geringer Schwereanomalien möglich

Geothermik:

- nur beschränkt einsetzbar, da genügende Wärmeproduktion und Wärmetransport vorausgesetzt wird
- Messungen nur bei geeigneter Witterung und Tageszeit (am besten nachts)
- komplexe Störeinflüsse durch Mikroklima

3.3 Kostenrahmen

3.3.1 Kosten Geophysik an Altlasten

Die Tab. 8 und 9 geben einen Überblick über die im Rahmen des Modellstandortprogramms ermittelten **Kosten** für die verschiedenen geophysikalischen Verfahren.

Die angegebenen Preise umfassen die Meß- und Auswertekosten ohne Fahrt-, Berichts- und anderer Nebenkosten.

Preisschwankungen können zusätzlich zu den in den Tabellen angegebenen Ursachen hervorgerufen werden durch:

1. Gesamtumfang der Messungen: Einzelmessungen werden preisgünstiger, wenn das Gesamtmeßprogramm umfangreicher wird.
2. Unterschiede in der Geländebeschaffenheit.
3. Umfang der erforderlichen Auswertarbeiten.

Tabelle 8 : Kosten pro Meßtag der geophysikalischen Verfahren im Modellstandortprogramm

Methode	Kosten pro Meßtag [DM]
Geomagnetik	800,- bis 1 200,-
Elektromagnetische Kartierung	800,- bis 1 500,-
Geoelektrische Kartierung	1 000,- bis 2 500,-
Widerstandssondierung	1 400,- bis 2 000,-
Induzierte Polarisation	ca. 1 850,-
Eigenpotentialmessung	1 500,- bis 3 000,-
Bodenradar	2 000 bis 3 000,-
Refraktionsseismik	2 500,- bis 5 000,-
Reflexionsseismik	5 000,- bis 7 000,-

Tabelle 9: Kosten pro 1 m Profil und pro Meßpunkt der geophysikalischen Verfahren im Modellstandortprogramm

Methode	Kosten/ 1 m Profil [DM]	Kosten/ Meß- punkt [DM]	Ursachen für Preisdifferenzen
Geomagnetik	0,25 - 2,00	0,75 - 3,70	2 Meßniveaus
Elektromagnetische Kartierung	0,50 - 2,50	3,90 - 12,00	versch. Meßgeräte, Meßanordnungen
Bodenradar	1,00 - 5,00	- - -	versch. Meßgeräte
Geoelektrische Kartierung	1,00 - 2,50	1,00 - 35,00	versch. Meßanordnungen
Widerstandssondierung	- - -	100,00 - 300,00	versch. Auslagen
Induzierte Polarisation*)	3,00 - 7,00	35,00 - 80,00	versch. Meßanordnungen
Eigenpotentialmessung	2,00 - 12,00	20,00 - 50,00	
Refraktionsseismik	5,00 - 30,00	60,00 - 400,00	versch. Anregung, Meßanordnungen
Reflexionsseismik	12,00 - 20,00	30,00 - 200,00	versch. Anregung, Meßanordnungen

Bemerkung:

*) Das Verfahren der Induzierten Polarisation beinhaltet Widerstandsmessungen ohne zusätzlichen Zeit- und Preisaufwand

3.3.2 Kostenvergleich Geophysik / Bohrungen

Ein Bohrmeter kostet ca. DM 200,-. In Tab. 10 ist aufgelistet, welche geophysikalische Arbeiten für diesen Betrag ausgeführt werden können. Abb. 38 zeigt einen graphischen **Vergleich** zwischen den Bohrkosten und den Kosten der Geophysik.

Man erkennt, daß der Kostenvergleich stark zu Gunsten der Geophysik ausfällt. Mit ihrem Einsatz können somit die Gesamtkosten zur Erkundung von Altlasten gesenkt werden. Geophysikalische Messungen können jedoch Bohrungen nicht ersetzen, sondern stellen eine sinnvolle Ergänzung im Vorfeld dar. Einerseits sind geophysikalische Ergebnisse sicherer zu interpretieren, wenn Bohrlochdaten zur Verfügung stehen, andererseits können die durch Bohrungen gelieferten punktuellen Informationen durch die Anwendung der Geophysik auf die Fläche zwischen verstreut liegenden Bohrpunkten ausgedehnt werden. Außerdem können die geophysikalischen Ergebnisse dazu benutzt werden, Ansatzpunkte für Bohr- oder Schürfarbeiten an geeigneten Lokationen gezielt festzulegen.

In jedem Einzelfall sollte in einer Kosten-Nutzen-Betrachtung abgewogen werden, welche Erkundungsmethoden eingesetzt werden. Der in Tab. 10 und Abb. 38 dargestellte Kostenvergleich soll hierfür Anhaltspunkte liefern.

Tabelle 10: Geophysikalische Arbeiten, die für die Kosten eines Bohrmeters (DM 200,-) ausgeführt werden können

Methoden	Anzahl der Meßpunkte	Vermessene Profil-Meter*) [m]	Vermessene Fläche*) [m ²]
Geomagnetik	60 - 250	100 - 800	200 - 1000
Elektromagnetische Kartierung	15 - 50	80 - 400	1000 - 3600
Goelektrische Kartierung	6 - 20	80 - 200	250 - 1200
Widerstandssondierung	1 - 2	- - -	- - -
Induzierte Polarisation*)	3 - 6	30 - 70	100 - 650
Bodenradar	- - -	40 - 200	- - -
Eigenpotentialmessung	4 - 10	20 - 100	200 - 1000
Refraktionsseismik	1 - 3	6 - 40	- - -
Reflexionsseismik	1 - 7	10 - 20	- - -

Bemerkungen:

Zu den Ursachen der o.a. Bandbreiten siehe Abschn. 3.3.1.

*) Die Werte wurden abgeleitet unter der Annahme der bei der Altlastenerkundung üblicherweise verwendeten Meßraster (vgl. Tab. 11)

Tabelle 11: Geeignete Meßpunktabstände für geophysikalische Untersuchungen im Rahmen der Altlastenerkundung

Verfahren	Meßpunktabstände	Bemerkungen
Geomagnetik	1 - 5 m	quadratisches Meßnetz
Geoelektrische Kartierung	2 - 15 m	dto
Elektromagnetische Kartierung	2 - 15 m	dto
Induzierte Polarisation*)	10 - 20 m	
Eigenpotentialmessung	5 - 20 m	
Bodenradar	-	kontinuierliche Registrierung
VLF	2 - 10 m	
Refraktionsseismik	1 - 10 m	Geophonabstände
Reflexionsseismik	5 - 20 m	dto
Gravimetrie	2 - 10 m	

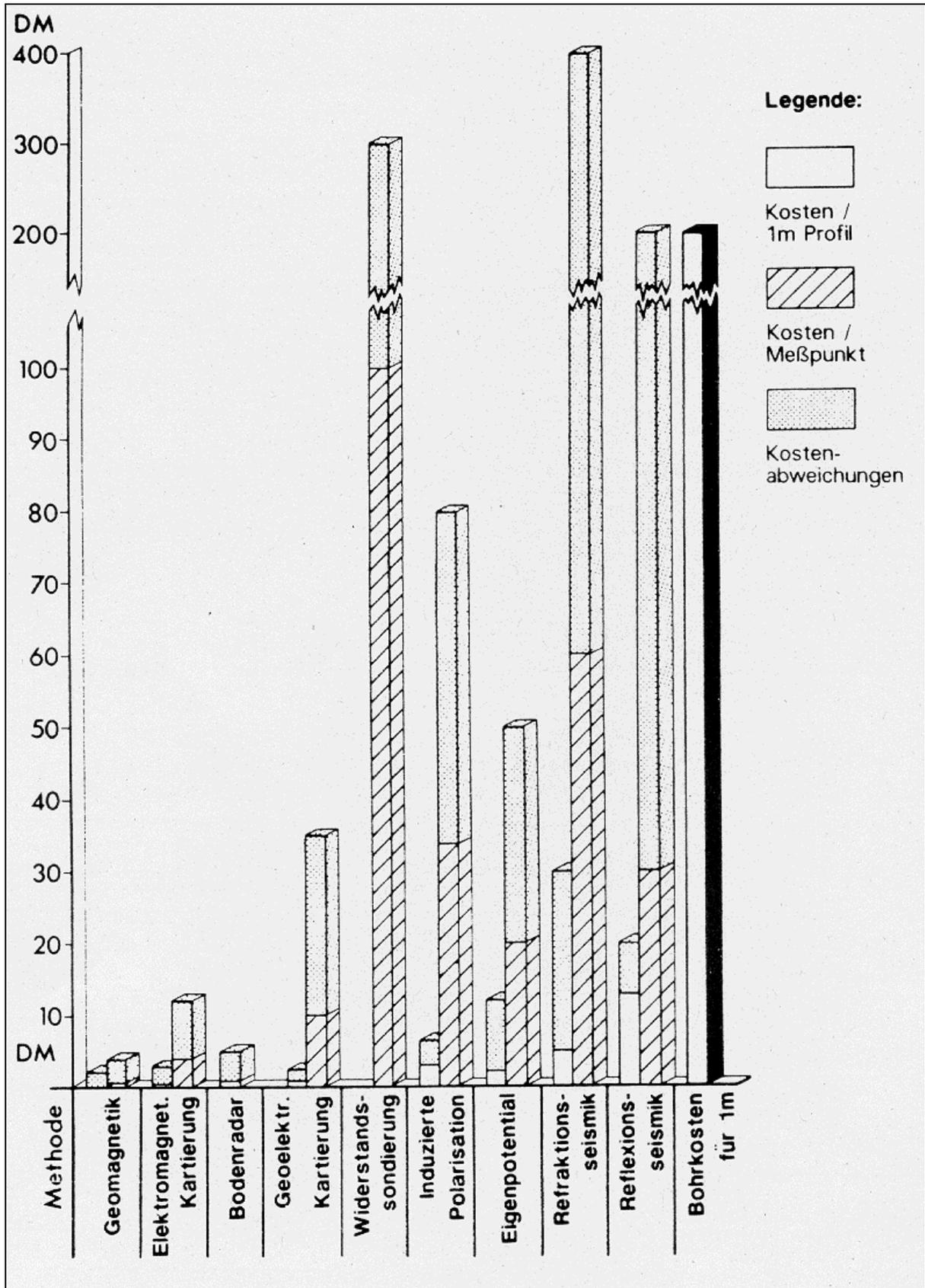


Abb. 38: Vergleich von Bohrkosten mit den Kosten für geophysikalische Verfahren im Modellstandortprogramm

3.4 Entscheidungsmatrix

In Tab. 12 werden in einer Entscheidungsmatrix für die Methodenauswahl 9 häufig an Altlasten auftretenden Fragestellungen 12 geophysikalische Untersuchungsverfahren gegenübergestellt. Die Eignung der einzelnen Methoden wird in einer Skala von "geeignet" bis "nicht geeignet" bewertet. Die Bohrlochgeophysik sollte in allen Bohrungen bei allen Fragestellungen durchgeführt werden (vgl. Abschn. 2.6.1).

Es ist zu beachten, daß diese Matrix eine starke Vereinfachung darstellt. Sie soll hauptsächlich dazu dienen, auch dem geophysikalischen Laien Anhaltspunkte zu geben, welche Verfahren bei bestimmten Problemen sinnvoll angewendet werden können, wobei die in Tab. 7 (Abschn. 3.2.1) aufgeführten Anwendungsmöglichkeiten an den verschiedenen Altlastentypen und hydrogeologischen Standorttypen sowie die in Abschn. 3.2.3 aufgelisteten Anwendungsgrenzen berücksichtigt werden sollten.

Die Entscheidungsmatrix soll die Fachberatung durch einen Geophysiker nicht ersetzen, sondern anregen.

Verfahren	Geomagnetik	Geoelektrische Kartierung	Widerstands-sondierung	Induzierte Polarisation	Eigenpotential-messung	Elektromagnetische Kartierung	VLF	Bodenradar	Refraktions-seismik	Reflexions-seismik	Gravimetrie	Geothermik
Fragestellungen												
Lokalisierung : Ausdehnung	+	+	-	(+)	-	+	(+)	(+)	(+)	-	(-)	-
Abdeckung : Durchlässigkeit	-	+	(-)	+	+	+	(+)	+	-	-	-	(-)
Abdeckung : Mächtigkeit	-	-	+	(+)	-	-	-	(+)	-	-	-	-
Mächtigkeit der Altlast	-	-	+	-	-	-	-	(+)	+	-	-	-
Ortung von Einzelobjekten 1)	(+)	+	-	(+)	(+)	+	+	+	-	-	-	-
Sickerwege in der Altlast	-	+	-	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	-	-	-	+
Sickerwege im Umfeld/Untergrund 2)	-	(+)	-	+	(+)	+	(+)	-	+	(+)	-	(-)
Sohlabdichtung : Einbau	-	-	+	-	(-)	-	-	-	-	-	-	-
Sohlabdichtung : Natürlich	-	-	+	-	-	(-)	-	-	(+)	(+)	-	-

1) auch Schadstoffkonzentrationen
2) auch Erkundung von Verwerfungs- und Karstsystemen

+ Geeignet
(+) Nicht in allen Fällen geeignet
(-) In Ausnahmefällen geeignet
- Nicht geeignet

Tabelle 12: Entscheidungsmatrix Methodenauswahl

3.5 Durchführung

3.5.1 Allgemeines

Geophysikalische Erkundungen dürfen in der Regel nicht schematisch vorgenommen werden. Die Untersuchungen sind nach Art, Umfang, räumlicher Anordnung und zeitlichem Ablauf den geologischen Eigenarten und spezifischen Standortverhältnissen sowie den Erkenntnissen aus vorhergehenden Erkundungen anzupassen. Die Ermittlung und Bewertung der geophysikalischen Daten muß durch ausgebildete Geophysiker in enger Zusammenarbeit mit anderen Ingenieuren (u.a. Geologen, Hydrogeologen) erfolgen. Die Interpretation der Meßwerte erfordert neben einer guten Ortskenntnis auch eine große Erfahrung.

Auch zur Auswahl der jeweils geeigneten Untersuchungsmethoden gehören umfangreicher Sachverstand und Erfahrung. Lediglich für einfachere Fragestellungen, wie z.B. der Lokalisierung und Erfassung der randlichen Begrenzung einer Hausmülldeponie, kann eine standardisierte Vorgehensweise vorgegeben werden. Dagegen ist zur Erkundung der Geologie des Umfeldes und der Schadstoffverbreitung in der Regel die Berücksichtigung von vorhandenen geologisch/hydrogeologischen Informationen und die enge Zusammenarbeit mit entsprechenden Fachleuten notwendig, um ein geeignetes Untersuchungsprogramm aufzustellen. Es gilt:

je weniger Vorinformationen vorhanden sind, desto komplexer und damit auch teurer sind Messungen und Auswertungen.

Die der Geophysik bei der Altlastenerkundung gestellten Aufgaben können nur in seltenen Fällen durch den Einsatz einzelner Verfahren befriedigend bearbeitet werden. Es sollte möglichst eine Kombination von verschiedenen Verfahren eingesetzt werden. Angaben darüber, welche Verfahren sich ergänzen und möglichst kombiniert angewendet werden sollten, sind dem Abschn. 3.6 zu entnehmen. Da geophysikalische Ergebnisse auch mehrdeutig sein können, sollten die Daten verschiedener Methoden abgeglichen und den Resultaten anderer Disziplinen, z.B. der Geologie, der Hydrogeologie oder von Bohrungen und Schürfarbeiten, gegenübergestellt werden. Aus dem Vergleich der Ergebnisse können Aussagen abgeleitet werden, die sich im Resultat der Einzelmessung oftmals nicht widerspiegeln.

3.5.2 Vorarbeiten, Methodenauswahl

Der erste Schritt in der Planung eines geophysikalischen Untersuchungsprogramms durch das mit der Untersuchung bzw. mit der Planung der Untersuchung einer Altlast beauftragte Ingenieurbüro besteht in der Festlegung des Untersuchungsziels bzw. der Fragestellungen. Dabei ist eine genaue Definition des zu untersuchenden Objekts und der Aufgabenstellung unerlässlich.

Für die Erarbeitung eines Meßprogramms und die Einschätzung der Aussagekraft eines Verfahrens in Bezug auf die Fragestellung sind insbesondere die örtlichen Verhältnisse von Bedeutung. Hierzu zählen die Befahr- bzw. Begehbarkeit des zu untersuchenden Objektes, Nähe zur Bebauung oder von Verkehrsanlagen, die Geländeform sowie Hindernisse, wie z.B. Hochspannungsleitungen, Leitungen für Wasser oder Gas im Untergrund. Vorabinformationen über die hydrogeologischen Verhältnisse spielen bei der Erkundung der Geologie des Umfeldes und der Schadstoffverbreitung eine wichtige Rolle, während dies für einfachere Fragestellungen, wie der Lokalisierung, d.h. der Erfassung der randlichen Begrenzung, einer Altlast nicht unbedingt der Fall sein muß.

Hilfsmittel, die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt werden sollten, sind z.B. Lagepläne, eingemessene Punkte und Höhen, sowie bereits vorliegende Erkenntnisse aus vorangehenden Erkundungen, wie z.B. Historische Erkundung, Bohrungen auf dem Gelände und seiner Nachbarschaft.

Geowissenschaftliche Informationen über den Untergrund im Bereich einer Altlast können auch von den Geologischen Landesämtern bezogen werden. Diese verfügen über die geologischen Karten der Landesaufnahmen und über zusätzliche Spezialkarten zur Hydrogeologie, Bodenkunde, Ingenieurgeologie sowie Lagerstättenkunde. Die Geologischen Landesämter und die Bergämter unterhalten außerdem Bohrarchive/-datenbanken, aus denen abgefragt werden kann, ob bereits Aufschlußdaten über den Untergrund im Nahbereich einer Altlast vorhanden sind.

Auf der Grundlage dieser Informationen läßt sich dann ein geeignetes Meßprogramm aufstellen. Anhaltspunkte darüber, welche geophysikalische Verfahren für bestimmte Fragestellungen geeignet sind oder nicht, ist der Entscheidungsmatrix Methodenauswahl in Abschn. 3.4, Tab. 12 zu entnehmen. Tab. 7 (Abschn. 3.2) gibt an, an welchen Altlastentypen und hydrogeologischen Standorttypen die Verfahren eingesetzt werden können. Es sollte jedoch stets ein Geophysiker zu Rate gezogen werden.

Im Folgenden werden Beispiele für die Methodenauswahl gegeben:

- Für einfachere Fragestellungen, wie die Lokalisierung bzw. Ausdehnung einer Altlast oder zur Ortung von Einzelobjekten bzw. der Ermittlung der Schadstoffkonzentration innerhalb einer Altlast, sollten zunächst die einfachen und schnell durchzuführenden Verfahren herangezogen werden. Mit der Geomagnetik kann z.B. die Begrenzung einer Hausmülldeponie mit einer flächenhaften Vermessung rasch ermittelt werden. Beim Einsatz an einer Industriemülldeponie ist dagegen ein Überblick über Anhäufungen von Eisenteilen oder anderen metallischen Körpern möglich.
- Eine elektromagnetische oder geoelektrische Kartierung kann eingesetzt werden, wenn die Geomagnetik keinen Erfolg verspricht, z.B. zur Lokalisierung von Deponien ohne größeren Eisenanteil, zur Erkundung der Schadstoffkonzentration in Altlasten oder zur Ermittlung von Sickerwegen in der Altlast bzw. in deren Umfeld.
- Die Mächtigkeit einer Altlast läßt sich entweder mit einer Widerstandssondierung, insbesondere in Lockergesteinsumgebung, oder mit der Refraktionsseismik, insbesondere wenn im Liegenden der Altlast Festgestein ansteht, ermitteln.

- Wenn bestimmte hydrogeologische Fragestellungen zu klären sind, verspricht die geoelektrische Kartierung in Kombination mit Widerstandssondierungen guten Erfolg zur Erkundung der Beschaffenheit und Mächtigkeit von Deckschichten sowie der Geometrie der Aquiferstrukturen, z.B. von Grundwasserleitern und -stauern. Mit elektromagnetischen Kartierungen können Sickerwege speziell in klüftigem Festgestein ermittelt werden. Die Ermittlung der Mächtigkeit von Lockersedimenten und der Verwitterungsdecke über Festgestein und somit der Morphologie der Felsoberfläche ist dagegen eher eine Aufgabe der Refraktionsseismik.

Es muß abgewogen werden, ob es günstiger ist, verschiedene Methoden gleichzeitig anzuwenden oder diese stufenweise nacheinander durchzuführen. Eine mögliche Vorgehensweise ist, die Messungen in zwei Phasen zu unterteilen:

- eine **Vorerkundung (orientierende Erkundung E_{1,2})** zur übersichtshaften Vermessung für einfachere Fragestellungen, wobei die schnellen und billigeren Methoden der Geomagnetik, Gleichstromgeoelektrik und elektromagnetischen Kartierung eingesetzt werden sollten,
- und eine **Haupterkundung (nähere Erkundung E_{2,3})** zur Verdichtung der Messungen in ausgewählten Meßgebieten mit den bereits in der ersten Phase zur Anwendung gekommenen Verfahren. In dieser zweiten Phase können zur Klärung von Spezialproblemen auch die aufwendigeren Verfahren zum Einsatz kommen, z.B. Induzierte Polarisation, VLF/VLF-R und Refraktionsseismik. In solchen Fällen sollte eine Auswahl unter verschiedenen Methoden, auch anderer Disziplinen, in einer Kosten-Nutzen-Betrachtung erfolgen, wobei die Tab. 8, 9 und 10 (Abschn. 3.3) als Anhaltspunkte dienen können.

In Tab. 13 sind die in diesem Abschnitt beschriebenen Punkte, die bei den Vorarbeiten beachtet werden sollten, in Form einer Checkliste zusammengestellt.

Tabelle 13 : Checkliste für die Vorarbeiten eines geophysikalischen Untersuchungsprogramms

-
- Definition des zu untersuchenden Objekts und der Zielsetzung.
 - Beurteilung der Geländeverhältnisse in Bezug auf:
 - Anwendbarkeit des Verfahrens,
 - Befahr- und Begehbarkeit,
 - die Messungen beeinflussende Installationen wie Hindernisse, Hochspannungsleitungen, Leitungen für Gas oder Wasser im Untergrund, Nähe von Bebauung und von Verkehrsanlagen.
 - Einholen von Hilfsmitteln vom Auftraggeber oder, wenn dort nicht vorhanden, von den Geologischen Landesämtern bzw. den Vermessungs- oder Bergämtern: Lagepläne, eingemessene Punkte und Höhen, vorliegende Erkenntnisse aus Bohrungen auf dem Gelände und in der Umgebung, Informationen über die hydrogeologischen Standortverhältnisse.
 - Einschätzung der Aussagekraft des Verfahrens in Bezug auf die Fragestellung..
 - Ausarbeitung eines Meßprogramms mit der Festlegung der Meßprofile bzw. eines flächigen Rasters mit geeigneten Profil- und Meßpunktabständen entsprechend der geforderten Erkundungstiefe und Meßgenauigkeit.

3.5.3 Ausschreibung, Vergabe

Nachdem die Methodenauswahl erfolgt ist, kann eine sachgemäße Anfrage bzw. **Ausschreibung** erfolgen..

Diese sollte flexibel formuliert sein. Es sollten für die Ausführung der Messungen Einzelheiten nur insoweit vorgeschrieben werden, als dies für das Erreichen des Zwecks unbedingt erforderlich ist. So sind z.B. Vorgaben für die geforderte Erkundungstiefe und Meßgenauigkeit zu stellen, bei manchen Verfahren auch für die Verwendung von Standardmeßgeräten (z.B. Protonenmagnetometer bei der Geomagnetik). Der Auftragnehmer sollte jedoch durch Vorgaben nicht allzusehr eingeeengt werden, sondern die Möglichkeit haben, eigene Vorstellungen einzubringen. Deshalb müssen ausreichend Eventualpositionen vorgehalten werden, die während des laufenden Meßprogramms eine Änderung der Vorgehensweise erlauben. Dies gilt insbesondere auch für die Auswertung und Interpretation der Meßdaten, weil sich in vielen Fällen erst nach Kenntnis des Datenmaterials ermitteln läßt, welche Art von Auswertung durchzuführen ist.

Da geophysikalische Meßwerte meist keine direkt verwertbaren Größen sind und immer einer Interpretation bedürfen, bedeuten Auswertung und Interpretation oft einen erheblichen Aufwand, der den der Meßwerterfassung durchaus übersteigen kann. Es ist deshalb zu empfehlen, die Preise für die Messung und die Interpretation getrennt zu ermitteln.

Ebenso wichtig wie die Festlegung des Leistungsumfanges für die Durchführung der Messungen ist die Definition für die Aufbereitung der Ergebnisse und deren Darstellung. Es ist gerade für die Interpretation der Ergebnisse verschiedener Verfahren wichtig, daß diese vergleichbar sind. Sie sollten daher in Kartenmaterial mit einem festgelegten einheitlichen Maßstab übertragen werden können.

Allgemein gilt, daß eine verbindliche Ausschreibung mit dem Zwang zum billigsten Anbieter wenig sinnvoll ist. Es sollte vielmehr eine Anfrage durchgeführt werden, wobei der Preis nur ein Auswahlkriterium neben einschlägigen Erfahrungen (Referenzen) oder Zuverlässigkeit der Firma etc. darstellt.

Im Anhang 1 sind beispielhafte Ausschreibetexte für einige bei der Altlastenerkundung häufig anzuwendenden geophysikalischen Verfahren aufgeführt.

Tab. 14 enthält eine Checkliste der in diesem Abschnitt angesprochenen Punkte.

Tabelle 14: Checkliste für die Ausschreibung und Vergabe eines geophysikalischen Untersuchungsprogramms

- Erstellen einer sachgemäßen, aber flexibel formulierten Ausschreibung für das Untersuchungsvorhaben mit einer genauen Programmkonzeption und Anforderungen an die Meßdurchführung, die Auswertung und Interpretation sowie die Ergebnisdarstellung.
- Einholen einer Anfrage mit Auszeichnung der Preise für Arbeitsvorbereitung, Gerätekosten, Fahrtkosten, Geländearbeiten, Auswertung und Interpretation, Erstellung eines Ergebnisberichtes, Besprechungstermine etc.
- Vergabe des Untersuchungsprogramms an einen Anbieter unter Berücksichtigung der Kosten sowie den Referenzen und der Zuverlässigkeit des Anbieters.

3.5.4 Geländearbeiten

Vor dem Beginn der Messungen sind einige organisatorische Vorbereitungen zu tätigen. So müssen das Personal und die Meßgeräte bereitgestellt, die zuständigen Aufsichtsbehörden, Gemeinden und Eigentümer benachrichtigt sowie die Genehmigung für die Untersuchungen und für das rechtmäßige Betreten des Meßortes eingeholt werden, falls dies vom Auftraggeber nicht gewährleistet ist.

Bei der Durchführung der Messungen ist es wichtig, daß die zu vermessenen Meßprofile an vorhandene topographische Unterlagen, wie Karten und Meßnetze, angeschlossen werden können. Alle geophysikalischen Untersuchungen sollten sich an einer Grundkarte orientieren, um eine eindeutige Zuordnung und Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. Außerdem können auf diese Weise bei einem späteren ergänzenden Meßprogramm die neuen Meßpunkte leicht eingehängt werden.

Die Meßprofile und Meßpunkte sind im Gelände so zu kennzeichnen, daß sie jederzeit wieder aufzufinden sind und daß nachfolgende Messungen an ihnen ausgerichtet werden können. Dies kann z.B. durch einbetonierte Markierungen geschehen.

Besonders bei den kartierenden Verfahren, wie Geomagnetik, elektromagnetische und geoelektrische Kartierung, ist die Gestaltung des Meßnetzes wichtig, weil durch unsachgemäße Profilrichtungen sowie Meßpunkt- und Profilstände das gesuchte Objekt übersehen oder der Aufwand erhöht werden könnte. Die Abstände der Meßpunkte und Profile richten sich nach der Aufgabenstellung, den geologisch/hydrogeologischen Verhältnissen am Standort, der geforderten Erkundungstiefe sowie dem gewünschten Auflösungsvermögen. Anhaltspunkte über geeignete Meßpunktstände sind dem Kapitel 2 sowie Tab. 11 (Abschn. 3.3.2) zu entnehmen.

Bei den geoelektrischen Verfahren, die besonders empfindlich auf metallische Installationen reagieren, ist zu empfehlen, daß vor dem Beginn der Meßphase das Meßgebiet mit induktiven Kabelsuchgeräten auf Vorhandensein unbekannter Leitungen im Untergrund abgesucht werden sollte.

Für alle Verfahren gilt, daß die Messungen, die die Erkundung der Altlast zur Zielsetzung haben, stets auf die ungestörte Umgebung der Altlast ausgedehnt werden sollten, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Nach Möglichkeit sollte bereits im Gelände eine Vorauswertung durchgeführt werden. Damit kann die Reproduzierbarkeit und Verlässlichkeit der Meßwerte eventuell erkannt werden.

Wenn die Vorauswertung zeigt, daß die Messungen durch unvorhergesehene Einflüsse (z.B. unbekannte Hindernisse oder Installationen) gestört werden, oder daß die Meßpunkt- und Profilabstände nicht den Standortverhältnissen bzw. der Fragestellung angepaßt gewählt wurde (z.B. wenn die geforderte Erkundungstiefe nicht erreicht wird), müssen die Geländearbeiten in Rücksprache mit dem Auftraggeber den veränderten Bedingungen angepaßt werden, um die Erfüllung der Zielsetzung zu gewährleisten.

Tab. 15 listet die für die Geländearbeiten wichtigen Punkte auf.

Tabelle 15: Checkliste für die Geländearbeiten eines geophysikalischen Untersuchungsprogramms

- Organisatorische Vorbereitungen, wie Bereitstellung von Personal und Meßgeräten, Benachrichtigung von Aufsichtsbehörden, Gemeinden und Eigentümer, Einholen der Genehmigung zum Betreten des Meßortes.
- Anschließen der Meßprofile an topographische Unterlagen, wie Karten oder Meßnetze.
- Kennzeichnung der Meßlinien und Meßpunkte im Gelände, z.B. durch einbetonierte Markierungen.
- Sachgemäße Gestaltung des Meßnetzes, d.h. Wahl der Orientierung der Meßprofile und der Meßpunkt- und Profilabstände.
- Absuchen des Meßgebietes auf Vorhandensein unbekannter Leitungen im Untergrund bei den geoelektrischen Verfahren.
- Ausdehnen der Messungen zur Erkundung einer Altlast in die ungestörte Umgebung.
- Ggf. digitale Aufzeichnung der Meßwerte.
- Soweit möglich, Durchführung einer Vorauswertung im Gelände.
- Anpassen der Geländearbeiten an unvorhergesehene Bedingungen, z.B. Verändern von Profil- oder Meßpunktabständen.

3.5.5 Auswertung und Interpretation

Wie schon im Abschn. 3.5.3 erwähnt, kommt der **Auswertung und Interpretation** geophysikalischer Meßwerte eine besondere Bedeutung zu.

Die Auswertung sollte unter Anwendung von anerkannten DV-Programmen erfolgen. Die Ergebnisse der Messungen sind in einer geeigneten, auch für Nichtfachleute verständlichen Weise darzustellen, z.B. in Isolinien- oder Profildarstellungen. Um die Ergebnisse verschiedener Verfahren vergleichen zu können, sollten diese in Kartenmaterial mit einem festgelegten einheitlichen Maßstab übertragen werden.

Es ist eine kritische Überprüfung der Ergebnisse anhand der Erfahrungen des Geophysikers und hinsichtlich der Übereinstimmungen mit den bekannten Daten der Altlast und dem geologisch - hydrogeologisch - tektonischen Aufbau des Nebengesteins durchzuführen. Rein formale Auswertungen, denen dieser interdisziplinäre Abgleich fehlt, sind abzulehnen.

Eine Checkliste für die Auswertung und Interpretation geophysikalischer Messungen ist in Tab. 16 aufgeführt.

Tabelle 16: Checkliste für die Auswertung und Interpretation geophysikalischer Untersuchungen

-
- Anwendung anerkannter DV-Programme.
 - Geeignete, klare Darstellung, die auch für Nichtfachleute verwertbar ist, z.B. in Form von farbigen Profil-, Isoliniendarstellungen und Raumbildern.
 - Übertragen der Ergebnisse verschiedener Verfahren in Kartenmaterial mit festgelegtem, einheitlichem Maßstab.
 - Kritische Überprüfung der Ergebnisse und Vergleich zwischen verschiedenen geophysikalischen Methoden.
 - Interdisziplinärer Abgleich der Ergebnisse mit Daten der Altlast und dem geologisch - hydrogeologisch - tektonischen Aufbau des Nebengesteins.

3.5.6 Nachfolgearbeiten

Nachdem die Meßergebnisse ausgewertet, interpretiert und mit den Ergebnissen anderer, auch nicht geophysikalischer, Untersuchungsmethoden verglichen worden sind, kann es notwendig sein, ergänzende Messungen durchzuführen. So sollten in Gebieten mit festgestellten Anomalien die Messungen ggf. mit verdichtetem Meßraster ergänzt werden. Bei Anomalien, deren Ursache unbekannt ist, wird eine Verifizierung anhand Bohr- oder Schürfarbeiten empfohlen.

Tab. 17 enthält eine Checkliste für die Nachfolgearbeiten geophysikalischer Messungen.

Tabelle 17: Checkliste für die Nachfolgearbeiten geophysikalischer Untersuchungen

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Durchführung eines ergänzenden Untersuchungsprogramms, z.B. zur Verdichtung der Messungen in Gebieten mit festgestellten Anomalien.• Verifizierung der geophysikalischen Ergebnisse anhand von Bohr- oder Schürfarbeiten. |
|--|

3.6 Methodenkombinationen

Jedes geophysikalische Verfahren liefert Erkenntnisse über spezielle physikalische Eigenschaften der Gesteine oder des Materials im Untergrund. Durch eine kombinierte Anwendung verschiedener Verfahren besteht die Möglichkeit einer gegenseitigen Kontrolle, falls die Verfahren auf die gleichen Materialeigenschaften reagieren, oder es können Kenntnisse über verschiedene Eigenschaften ermittelt und diese miteinander verglichen werden. Somit können die Einzelergebnisse bestätigt und erweitert werden. Welche Art von **Kombination** am sinnvollsten ist, hängt weitgehend von den Standortverhältnissen und der speziellen Zielsetzung ab, so daß allgemeingültige Methodenkombinationen nicht angegeben werden können.

Bei der Durchführung einer Vorerkundung $E_{1,2}$ (siehe Abschn. 3.5.2) empfiehlt sich eine Kombination der Methoden Geomagnetik, geoelektrische und elektromagnetische Kartierung. Mit ihnen läßt sich im allgemeinen ein schneller Überblick über die Ausdehnung einer Altlast, die Durchlässigkeit der Abdeckung, das Vorhandensein und die ungefähre Lage einzelner Objekte innerhalb der Altlast sowie ggf. über Sickerwege in der Altlast und in ihrem Umfeld gewinnen.

Für die nähere Erkundung $E_{2,3}$ können dann aufwendigere Verfahren zur Ergänzung der oben genannten Methoden herangezogen werden. Beispiele hierfür sind:

- Die Reflexionsseismik wird z.Zt. bei der Erkundung des geologisch - hydrogeologisch - tektonischen Aufbaus im tieferen Untergrund eingesetzt. Das Verfahren kann somit refraktionsseismische Ergebnisse zur Tiefe hin ergänzen.
- Das Bodenradar kann, wie die Geomagnetik, Hinweise auf flachliegende Fundamente mit Stahllarmierungen oder Leitungen, z.B. im Untergrund von Industriebrachen, geben.
- Widerstandssondierungen und refraktionsseismische Messungen können sich zur Erkundung der hydrogeologischen Verhältnisse ergänzen. Außerdem können beide Verfahren ggf. dazu verwendet werden, die Mächtigkeit einer Altlast zu ermitteln.
- Die Anwendung einer elektromagnetischen Kartierung und ggf. des VLF-Verfahrens mit verdichtetem Meßraster kann weitergehende Kenntnisse über salinare Schadstoffkonzentrationen innerhalb der Altlast bzw. über Fließwege von Deponiesickerwässern liefern. Diese Fragestellungen können ggf. zusätzlich durch den Einsatz der Induzierten Polarisation oder von Eigenpotentialmessungen untersucht werden.

Wenn im Bereich einer Altlast oder ihrer Umgebung Bohrlöcher niedergebracht worden sind, sollten an diesen zur Ergänzung der geophysikalischen Messungen an der Erdoberfläche grundsätzlich Bohrlochmessungen durchgeführt werden. Man erhält mit ihnen zusätzliche Informationen über die Materialeigenschaften des Untergrunds bzw. über Grund- und Sickerwässer, so daß die Oberflächenmessungen sicherer interpretiert werden können.

Tabelle 18 : Mögliche Methodenkombinationen bei der Vor- und Haupterkundung von Altlasten

Vorerkundung E₁₋₂	Haupterkundung E₂₋₃
Geomagnetik	Geomagnet. Detailvermessung Bodenradar
Geoelektrische Kartierung	Geoelekt. Detailkartierung Widerstandssondierung Induzierte Polarisierung Eigenpotentialmessung Geothermik
Widerstandssondierung	Refraktionsseismik Reflexionsseismik Gravimetrie
Elektromagnetische Kartierung	Elektromagn. Detailkartierung VLF-Methode
Bohrlochgeophysik	Bohrlochgeophysik

4 Ausblick

4.1 Vorschläge für weitere Untersuchungen an den Modellstandorten

4.1.1 Allgemeines

Nach Auswertung der bisher durchgeführten geophysikalischen Arbeiten an den Modellstandorten können folgende Vorschläge für weitergehende Untersuchungen formuliert werden:

4.1.2 Leonberg

4.1.2.1 Elektromagnetische Kartierung

Die bisherigen EM-Messungen sind nur im Zentrum der Deponie erfolgt. Sie sollten auf den gesamten Deponiekörper mit insgesamt 100 x 200 m Grundfläche ausgedehnt werden. Insbesondere wäre zu untersuchen, ob die bei den Magnetik- und IP-Messungen am NE-Rand festgestellten anomalen Bereiche sich auch elektromagnetisch nachweisen lassen.

Außerdem wird die EM-Vermessung des Umfelds der Deponie empfohlen. Speziell interessiert die Fragestellung, ob die im bisherigen Meßgebiet entdeckte Störzone am W-Rand der Deponie weiter verfolgt werden kann. Weiterhin sollten am S-Rand der Deponie ggf. vorhandene grundwasserbeeinflussende Strukturen im Zustrom der Deponie untersucht werden.

Für diese Aufgaben müßte das Untersuchungsgebiet um ca. 30 000 m² vergrößert werden und ca. 1500 zusätzliche EM-Messungen im 5 x 5 m Raster sind erforderlich.

4.1.2.2 Refraktionsseismik

Die bisherigen refraktionsseismischen Messungen am S-Rand der Deponie im Zustrombereich sollten verdichtet werden, um den strukturellen Aufbau der Aquifer-Basis in diesem Bereich genauer zu ermitteln und den Ansatzpunkt einer geplanten oberstromigen Bohrung festzulegen.

Hierfür ist eine Vermessung von zusätzlichen Meßprofilen in einer Gesamtlänge von ca. 600-800 m erforderlich.

4.1.2.3 Eigenpotentialmessungen (EP)

Diese sollten über das gesamte Deponiegelände und sein Umfeld ausgedehnt werden. Es wäre u.a. zu untersuchen, inwieweit die IP-Anomalien innerhalb des Deponiekörpers auch durch EP-Messungen nachgewiesen werden können, um die Ergebnisse von IP und EP zu vergleichen. Außerdem sollten die Messungen im Bereich der nördlich der Deponie festgestellten EP-Anomalien verdichtet werden.

Hierfür sind zusätzliche Meßprofile in einer Gesamtlänge von ca. 1 000 m mit ca. 100 EP-Messungen durchzuführen.

4.1.3 Mühlacker

4.1.3.1 Ergänzende Arbeiten

An diesem Modellstandort kamen zahlreiche geophysikalische Verfahren zum Einsatz. Dabei wurden oftmals nur exemplarische Messungen entlang weniger, typischer Profile durchgeführt. Dies hatte zur Folge, daß gewisse standortspezifische Fragestellungen nur ansatzweise beantwortet werden konnten. Hierfür wären ggf. flächendeckende Vermessungen oder die Anwendung zusätzlicher Auswerteverfahren, z.B. der Geomagnetik und Gravimetrie, notwendig.

Daraus ergibt sich der Vorschlag, einige der eingesetzten Verfahren ergänzend mit verdichtetem Meßraster durchzuführen. Z.T ist dies bereits bei der Ergänzung des Meßprogramms im Jahre 1989 realisiert worden. Hierbei wurden zusätzliche Widerstandssondierungen und seismische Messungen vorgenommen.

4.1.3.2 Geoelektrische Verfahren

Bei den Messungen des scheinbaren spezifischen Widerstandes p_s , der bei Messungen der induzierten Polarisation (IP) in Dipol-Dipol-Anordnung mitregistriert wurde, konnte über dem Deponiekörper Folgendes festgestellt werden:

1. Die Abdeckfolie der Deponie, die als Isolator einen sehr hohen Widerstand besitzt, tritt in den p_s -Meßwerten nicht, wie erwartet, als starke Erhöhung hervor, sondern über der Deponie wurden verminderte Widerstände gemessen.
2. Auf der Abdeckfolie wurde ca. 30 cm sandig-toniges Lockermaterial aufgeschüttet. In diesem Material ist es möglich Elektroden vorsichtig zu erden, ohne daß die Folie perforiert wird.

Es wird vorgeschlagen das Problem "Geoelektrische Wirksamkeit einer Abdeckfolie" mit einer zusätzlichen Widerstandskartierung und ggf. einigen Widerstandssondierungen weiter zu erkunden.

Darüber hinaus wird eine zusätzliche elektromagnetische Kartierung empfohlen. Insbesondere interessiert die aufgrund der reflexionsseismischen Messungen am N-Rand der Deponie vermutete Störungszone.

Für diese Aufgaben würden im Deponiegelände von 3600 m² Größe zusätzlich ca. 150 geoelektrische Kartiermessungen und ca. 36 Tiefensondierungen benötigt.

Für die EM-Kartierung am N-Rand der Deponie sind Messungen entlang von vier N-S gerichteten Profilen von jeweils ca. 400 m Länge und einer Auslagenlänge von 100 m notwendig.

4.1.3.3 Gravimetrie

Für die Gravimetrie sollte die Auswertung, die bisher nur die Freiluftkorrektur berücksichtigt, durch die Bouguer-Korrektur verbessert werden. Dies ist zur Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten und -grenzen dieses Verfahrens besonders wichtig, da die Gravimetrie nur am Modellstandort Mühlacker eingesetzt wurde.

4.1.4 Osterhofen

Die Messungen der Induzierten Polarisation (IP) sollten auf das nähere Umfeld der Deponie, außerhalb der Kiesgrube, ausgedehnt werden, um den Übergang Nebengestein-Deponiekörper genauer zu erkunden und um zu versuchen, die im Grundwasser durch Pegel nachgewiesene saline Kontaminationsfahne zu erfassen.

Diese Aufgabe würde ca. 200 zusätzliche IP-Messungen erfordern; das zu untersuchende Gebiet hat eine Größe von ca. 50 000 m².

Dieser Vorschlag hat nachrangige Priorität.

4.1.5 Bitz

4.1.5.1 Elektromagnetische Kartierung

Die bisher durchgeführten EM-Messungen konzentrierten sich auf die Feststellung von Anomalienbereichen innerhalb des Deponiekörpers. Die Methode eignet sich darüber hinaus zur Kartierung lateraler Inhomogenitäten, wie z.B. Verwerfungen, Spalten- und Klüftzügen, die im Umfeld der Deponie Sicker- und Oberflächenwasser in den Untergrund ein- und ableiten können. Diese zusätzlichen EM-Messungen sind im Falle des Modellstandortes Bitz von besonderer Bedeutung, da es sich um ein stark verkarstetes Gebiet handelt.

Es sollten daher Messungen im weiteren Deponieumfeld durchgeführt werden mit einer Meßapparatur, die mit verschiedenen Frequenzen und Auslagenlängen (d.h. Abständen zwischen EM-Sender und -Empfänger) arbeitet und größere Eindringtiefen erreicht.

Der Umfang dieser EM-Messungen würde auf einer Fläche von ca. 2,25 km² bei einem Meßraster mit 25 m Punktabstand und 100 m Profilabstand ca. 1 000 Meßpunkte betragen.

Dieser Vorschlag hat nachrangige Priorität.

4.1.5.2 Widerstandssondierung

Die gemessenen Sondierungskurven sind z.T. überinterpretiert (z.B. 6-Schicht-Modell bei maximaler Auslagenlänge von 25 m) und sollten neu ausgewertet werden. Hierbei sollte ein erprobtes DV-Auswerteprogramm (z.B. INGESO) angewendet werden.

4.1.6 Herten

Die seismischen Arbeiten lieferten sehr unterschiedliche Resultate für die Messungen innerhalb und außerhalb des Deponiekörpers. So konnte mit der Refraktionsseismik eine Schichtgrenze im Deponieumfeld als Grundwasserspiegel interpretiert werden, während dieser Horizont im Deponiebereich nicht erkennbar ist.

Auch bei der Reflexionsseismik traten die im Umfeld festgestellten Reflektoren nicht mehr unterhalb der Deponie auf.

Vermutlich sind die seismischen Signale durch das lockere Deponiematerial so stark abgeschwächt worden, daß sie keine Reflexionen hervorrufen konnten. Dieser Dämpfungseffekt sollte weiter untersucht werden: Es wäre zu klären, ob durch die Verwendung anderer Geophone, anderer Meßanordnungen, den Einsatz höherer Frequenzen und höherer Sampling-Raten und durch veränderte Frequenzfilterung bessere Ergebnisse erzielt werden können. Außerdem sollten alle Bohrerergebnisse verwendet werden, um die seismische Interpretation zu stützen.

Diese zusätzlichen Testmessungen sollten in Herten sowohl die Refraktion als auch die Reflexion umfassen. Sie sollten auf dem für diese Dämpfung charakteristischen Profil "B" auf ca. 750 m Länge vorgenommen werden. Hierfür würden ca. 40 Schlagpunkte der Refraktionsseismik und ca. 190 Schlagpunkte der Reflexionsseismik benötigt.

4.1.7 Mannheim

Ziel der geophysikalischen Untersuchung war die Zuordnung bestimmter Deponie-Einlagerungen zu geophysikalischen Anomalien. Dieses Ziel wurde indessen nur teilweise erreicht. Der größte Teil der Anomalien konnte nicht mit bestimmten Einlagerungen in Zusammenhang gebracht werden.

Diese Diskrepanz führte zur Durchführung eines Schürfprogrammes, das die Ursachen der geophysikalischen Anomalien in bestimmten Testfeldern ergründen sollte. Die Resultate dieses Schürfprogrammes liegen noch nicht vor. Da ihre Kenntnis jedoch erforderlich ist, um die Wirksamkeit der eingesetzten geophysikalischen Methoden beurteilen zu können, können z.Zt. weder eine abschließende Beurteilung dieses Modellstandortes noch Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen gegeben werden.

Trotz der unvollständigen Unterlagen kann schon jetzt empfohlen werden, diese Ergebnisse, unter Einsatz detaillierter Modellrechnungen, eingehender zu interpretieren.

4.1.8 Geislingen

Dieser Modellstandort ist ein ehemaliges Gaswerksgelände, das z.T. noch als Kleingewerbegebiet, als Parkplatz und als asphaltierte Lagerfläche genutzt wird. Diese Nutzung und die dort befindlichen Gebäude und Installationen störten den Einsatz der geophysikalischen Methoden: elektromagnetische und geoelektrische Kartierung, Geomagnetik und Eigenpotential empfindlich. Es sind nur wenig aussagekräftige Ergebnisse, z.T. erst nach aufwendigen Sonderauswertungen, zustande gekommen. Dagegen vermochte die Refraktionsseismik und - mit Abstrichen - auch das Bodenradar, selbst unter diesen schwierigen Bedingungen, verwertbare Ergebnisse zu liefern.

Der eigentliche Zweck der Geophysik-Untersuchungen an diesem Modellstandort, nämlich die Eignung der einzelnen Verfahren für die Erkundung von Gaswerksstandorten zu testen, konnte mit dem bisher durchgeführten Programm erfüllt werden. Weitergehende Untersuchungen sind demnach nicht vorzusehen.

4.2 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

4.2.1 Bedarf

Im Modellstandortprogramm hat die intensive Anwendung verschiedener geophysikalischer Verfahren auf die Erkundung von Altlasten ergeben, daß z.T. dringender F & E-Bedarf für die Weiterentwicklung einiger Methoden besteht, um die Geophysik an Altlasten besser anwendbar und interpretierbar zu machen:

4.2.2 Reflexionsseismik

Das Verfahren wurde bisher vorrangig in der Prospektion auf Lagerstätten der Kohlenwasserstoffe Erdöl und Erdgas zur Erkundung des tieferen geologischen Untergrundaufbaus ab ca. 100 m eingesetzt. Die Anwendung dieses Verfahrens auf oberflächennahe Objekte, wie z.B. Altlasten, befindet sich dagegen noch in der Erprobungsphase.

Es müssen z.B. neue, hochfrequente Anregungsquellen entwickelt werden; seismische Aufnahmeapparaturen sollten mit verbesserten Signal-Rausch-Verhältnis, verlängerten Registrierzeiten und hohen Sampling-Raten ausgerüstet werden. Die bestehenden, umfangreichen DV-Programme sind an die Anforderungen der ultraflachen Reflexionsseismik anzupassen.

4.2.3 Eigenpotentialmessungen

Dieses Verfahren kann z.Zt. nur qualitative Übersichtskennnisse vermitteln, da der Interpretation der Meßergebnisse, hinsichtlich dem Nachweis von Potentialquellen, enge Grenzen gesetzt sind. Diese Situation entsteht durch die Vermischung von Potentialen, die bei Oxydations- und Reduktionsvorgängen entstehen und die sich nicht unterscheiden lassen von den Potentialen, die sich bei der Filtration bzw. Durchströmung von Flüssigkeiten aufbauen.

Es wäre zu klären, ob und wie diese verschiedenen Potentiale getrennt werden können.

4.2.4 Induzierte Polarisation (IP)

IP-Messungen geben Hinweise auf polarisierbare Einlagerungen im Untergrund. Als solche kommen in Altlasten z.B. galvanische Schlämme, Kunststoffe mit glänzendem Metallüberzug oder Ansammlungen von Konservendosen in Frage.

Neben dieser Anwendung der "metallischen Polarisation" im Altlastenbereich sollte die Anwendung der "Grenzschichtpolarisation" zur Unterscheidung von Tonen und Salzwasser, z.B. in der Umgebung von Deponien mit salinaren Sickerwässern, dienen. Tone besitzen sehr niedrige scheinbare spezifische Widerstände; die gleichen geringen Widerstände finden sich indes auch in salzwasserführenden Sanden und Kiesen. Eine geophysikalische Unterscheidung ist vermutlich nur mit Hilfe der IP-Methode möglich, da Salzwasser andere Abklingkurven erzeugt als Tone.

Ziel eines entsprechenden F & E-Vorhabens wäre es, die IP-Methode so zu verbessern, daß das Ton-Salzwasser Verhältnis mit höherer Genauigkeit als bisher angegeben werden kann.

5. Literaturverzeichnis

Min. f. Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten Baden-Württemberg (1987):
Altlastenhandbuch Teil II, Untersuchungsgrundlagen. Wasserwirtschaftsverwaltung Heft 19,
Stuttgart.

REPSOLD, H., u. SCHNEIDER, E. (1988):
Bohrlochmessungen bei der Wassererschließung. - In SCHNEIDER, H.: Die Wassererschlie-
ßung: 305-324.3., Neubearb. Aufl., Vulkan-Verlag, Essen.

Zwischenberichte zur Erkundung der Modellstandorte:

INST. DR. JUNGBAUER PARTNER (1988/89):
Modellstandort Geislingen - Technische Erkundung. Stuttgart.

LURGI/OBERMEYER (1988/89):
Modellstandort Leonberg - Erkundung E₁₋₃. Frankfurt/Main.

RÖVER + PARTNER / TAUW (1988/89):
Modellstandort Mannheim Friesenheimer Insel - Technische Erkundung. Bensheim.

SCHLEGEL & PARTNER (1988/89):
Modellstandort Deponie Herten - 1./2. Technische Erkundung. Stuttgart.

TGU (1988/89):
Modellstandort Osterhofen. Koblenz.

VEDEWA (1988/89) :
Erkundung des Modellstandortes Bitz. Stuttgart.

WEBER/ IFU / TAUW (1988/89) :
Modellerkundung Mühlacker. Pforzheim.

Anhang

A.1: Verfahrens-Musterbeschreibungen/Ausschreibetexte

Allgemeines

Die im Folgenden wiedergegebenen Verfahrens-Musterbeschreibungen und Ausschreibetexte beziehen sich auf die am häufigsten mit Erfolg angewendeten Methoden. Für seltener eingesetzte Verfahren, wie z.B. Gravimetrie und Reflexionsseismik, wird analoges Vorgehen empfohlen.

Die Verfahrens-Musterbeschreibungen gliedern sich in die drei Teile Vorarbeiten, Geländearbeiten sowie Auswertung und Interpretation.

Es sind jeweils nur die verfahrensspezifischen Punkte aufgelistet. Die unabhängig vom Meßverfahren durchzuführenden Arbeiten sind dem Abschn. 3.5 und den Tab. 13 bis 17 zu entnehmen.

Die Listen für die Geländearbeiten sowie für die Auswertung und Interpretation enthalten mehrere mögliche Teilschritte, die im Einzelfall ggf. nur teilweise durchzuführen sind. Hier ist eine Kosten-Nutzen-Betrachtung notwendig, welche Schritte erforderlich sind.

Die Musterbeschreibungen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Der anschließende Ausschreibetext ist nur als Beispiel für die Ausschreibung geophysikalischer Untersuchungen anzusehen. Dem Auftragnehmer sollte die Möglichkeit eingeräumt werden, technisch-wissenschaftlich begründete Änderungsvorschläge zu machen.

Verfahrens-Musterbeschreibung Geomagnetik

Vorarbeiten

- Auswahl des Meßgerätes mit Festlegung der zu registrierenden Komponente des erdmagnetischen Feldes und der Meßhöhen über Grund.
- Festlegung des Meßrasters mit geeigneten Meßpunktabständen in Abhängigkeit von der geforderten Erkundungstiefe und Auflösung.

Geländearbeiten

- Messung in einer oder mehreren vorher festgelegten Höhen über der Erdoberfläche.
- Beurteilung der registrierten Werte auf ihre Reproduzierbarkeit und Fehlerbreite.
- Registrierung der tageszeitlichen Schwankungen des erdmagnetischen Feldes an einem Basispunkt.
- Vermeidung von Messungen bei starken Schwankungen des Erdmagnetfeldes.

Auswertung und Interpretation

- Beurteilung der Meßgenauigkeit und der Datenqualität.
- Bezug der Meßwerte auf ein mittleres Meßniveau z.B. durch Abziehen des Mittelwertes aller Messungen oder des in ungestörter Umgebung gemessenen Magnetfeldes.
- Korrektur der Tagesvariationen.
- Topographische Korrektur.
- Berechnung des Vertikalgradienten der Totalintensität aus den Meßergebnissen in zwei verschiedenen Höhen.
- Graphische Darstellung der Anomalien in Profilen oder in Isolinienkarten bzw. in Raumbildern mit festgelegtem Maßstab bei flächiger Vermessung.
- Qualitative Bewertung der Anomalien, z.B. nach Art sowie ungefähre Größe und Tiefenlage einer Einlagerung.
- Durchführung von Modellrechnungen zur Ermittlung der genauen Lokation und Form eines magnetischen Körpers.
- Vergleich der Ergebnisse mit denen anderer Erkundungsmethoden.
- Falls notwendig, Durchführung von Ergänzungsmessungen, z.B. zur Verdichtung des Meßrasters in festgestellten Anomalienbereichen.

Ausschreibetext Geomagnetik

- Zielsetzung
- Abgrenzung und Größe des Meßgebiets
- Geländezugänglichkeit
- Vorhandensein und Art von Hindernissen oder Installationen
- Kantenlänge des Meßrasters oder Meßpunktabstand
- Gesamtanzahl der Meßpunkte oder Gesamtlänge der Profile

- Aufzunehmende Feldkomponente/Meßgerät
- Meßgenauigkeit/Auflösung
- Meßhöhen
- Art der Auswertung, z.B.
 - Bezug der Meßwerte auf ein mittleres Meßniveau
 - Berücksichtigen der Tagesvariationen
 - Weitere Leistungen
- Art der Darstellung, z.B.
 - Eintragung in Lageplänen mit festgelegtem Maßstab
 - Profil-Darstellung
 - Isolinienkarten
 - Raumbilder
- Art der Interpretation, z.B.
 - Qualitative Bewertung von Anomalienbereichen
 - Qualitative Bewertung von Einzelanomalien
 - Quantitative Bewertung mittels Modellrechnungen
 - Weitere Leistungen

Verfahrens-Musterbeschreibung Geoelektrische Kartierung

Vorarbeiten

- Auswahl der Sonden- und Elektrodenanordnung und Festlegung des Meßrasters mit geeigneten Profil- und Meßpunktabständen in Abhängigkeit von der geforderten Erkundungstiefe.

Geländearbeiten

- Absuchen des Meßgebiets auf Vorhandensein unbekannter Leitungen im Untergrund mit einem induktiven Kabelsuchgerät.
- Messung mit geeigneter geoelektrischer Aufnahmeapparatur in unterschiedlichen Auslagerichtungen.
- u.U. Registrierung und Korrektur von Gleichstrompotentialen und von Störungen durch Wechselströme mittels Dauerbeobachtung des elektrischen Feldes.
- Beurteilung der registrierten Werte auf ihre Reproduzierbarkeit und Fehlerbreite.

Auswertung und Interpretation

- Berechnung des scheinbaren spezifischen Widerstandes unter Berücksichtigung der Meßgeometrie.
- Darstellung der entlang einer Linie aufgenommenen Werte in einem Widerstandsprofil bzw. der flächig aufgenommenen Werte in einer Isolinienkarte.
- Ermittlung der Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) aus unterschiedlichen Auslagerichtungen.
- Kartierung geoelektrisch unterscheidbarer Bereiche und ihrer Grenzen.
- Vergleich der Ergebnisse mit denen anderer Erkundungsmethoden.
- Falls notwendig, Durchführung von Ergänzungsmessungen, z.B. zur Verdichtung des Meßrasters in festgestellten Anomalienbereichen.

Ausschreibetext Geoelektrische Kartierung

- Zielsetzung
- Abgrenzung und Größe des Meßgebiets
- Geländezugänglichkeit
- Vorhandensein und Art von Hindernissen und Installationen
- Kantenlänge des Meßrasters oder Meßpunktabstand
- Gesamtanzahl der Meßpunkte oder Gesamtlänge der Profile
- Sonden- und Elektrodenanordnung
- Sonden- und Elektrodenabstände bzw. Eindringtiefenbereich
- Meßgenauigkeit/Auflösung

- Art der Darstellung, z.B.
 - Eintragung in Lageplänen mit festgelegtem Maßstab
 - Profil-Darstellung
 - Isolinienkarten
 - Raumbilder
- Art der Interpretation, z.B.
 - Qualitative Bewertung von Anomalienbereichen
 - Qualitative Bewertung von Einzelanomalien
 - Ermittlung der Richtungsabhängigkeit
 - Quantitative Bewertung (Modellrechnung)
 - Weitere Leistungen

Verfahrens-Musterbeschreibung Widerstandssondierung

Vorarbeiten

- Auswahl der Sonden- und Elektrodenanordnung (z.B. Schlumberger- oder Hummelanordnung) sowie der maximalen Auslage.
- Festlegung der Tiefensondierungspunkte.

Geländearbeiten

- Absuchen des Meßgebiets auf Vorhandensein unbekannter Leitungen im Untergrund mit einem induktiven Kabelsuchgerät.
- Messung mit geeigneter geoelektrischer Aufnahmeapparatur ggf. in unterschiedlichen Auslagerichtungen.
- u.U. Registrierung und Korrektur von Gleichstrompotentialen und von Störungen durch Wechselströme.
- Beurteilung der registrierten Werte auf ihre Reproduzierbarkeit und Fehlerbreite.

Auswertung und Interpretation

- Berechnung des scheinbaren spezifischen Widerstandes unter Berücksichtigung der Meßgeometrie.
- Darstellung der Sondierungskurven in einem doppeltlogarithmischen Diagramm, d.h. spezifischer Widerstand aufgetragen gegen $L/2$ (im allgemeinen Abstand Sondierungspunkt - Elektrode).
- Interpretation der Ergebnisse anhand von Umkehr- oder Vorwärtsverfahren, d.h. Bestimmung von Schichtmächtigkeiten und -widerständen sowie deren graphische Darstellung in Säulendiagrammen.
- Bestimmung der Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) aus unterschiedlichen Auslagerichtungen.
- Vergleich der Ergebnisse mit denen anderer Erkundungsmethoden.
- Falls notwendig, Durchführung von Ergänzungsmessungen, z.B. zur Verdichtung der Sondierungspunkte.

Ausschreibetext Widerstandssondierung

- Zielsetzung
- Abgrenzung und Größe des Meßgebiets
- Geländezugänglichkeit
- Vorhandensein und Art von Hindernissen und Installationen
- Gesamtanzahl der Sondierungspunkte
- Sonden- und Elektrodenanordnung
- maximale Erkundungstiefe/Auslagenlänge

- Art der Darstellung, z.B.
 - Eintragung in Lageplänen mit festgelegtem Maßstab
 - Sondierungskurven
 - Säulendarstellung mit Schichtmächtigkeiten und -widerständen
 - Isolinienkarten (von Schichtgrenzen)
- Art der Interpretation, z.B.
 - Umkehr- und Vorwärtsrechnungen
 - Geologische Zuordnung der Schichtmodelle
 - Bestimmung der Richtungsabhängigkeit
 - Weitere Leistungen

Verfahrens-Musterbeschreibung Induzierte Polarisation

Vorarbeiten

- Auswahl der Meßanordnung, z.B. Dipol-Dipol- oder Gradientenanordnung, mit geeigneten Elektrodenabständen in Abhängigkeit von der geforderten Erkundungstiefe und Auflösung.
- Festlegung der Meßlinien mit geeigneten Meßpunktabständen.

Geländearbeiten

- Absuchen des Meßgebiets auf Vorhandensein unbekannter Leitungen im Untergrund mit einem induktiven Kabelsuchgerät.
- Messung mit geeigneten erprobten Apparaturen.
- Bestimmung des Störpegels im Meßgebiet. (Die eingespeisten Ströme müssen so stark sein, daß die gemessenen Abklingspannungen über dem Störpegel liegen.)
- Beurteilung der registrierten Werte auf ihre Reproduzierbarkeit und Fehlerbreite.

Auswertung und Interpretation

- Berechnung des scheinbaren spezifischen Widerstandes sowie der Meßgrößen der Induzierten Polarisation: Aufladefähigkeit und Abklingkoeffizient.
- Darstellung der aufgenommenen Werte, z.B. in Pseudoprofilen bei der Dipol-Dipol-Anordnung.
- Darstellung und Erklärung von Bereichen unterschiedlicher IP-Effekte.
- Vergleich der Ergebnisse mit denen anderer Erkundungsmethoden.
- Falls notwendig, Durchführung von Ergänzungsmessungen, z.B. zur Verdichtung.

Ausschreibetext Induzierte Polarisation

- Zielsetzung
- Abgrenzung und Größe des Meßgebiets
- Geländezugänglichkeit
- Vorhandensein und Art von Hindernissen und Installationen
- Meßpunktabstand
- Gesamtanzahl der Meßpunkte oder Gesamtlänge der Profile
- Meßanordnung
- Eindringtiefenbereich
- Meßgenauigkeit/Auflösung
- Art der Darstellung, z.B.
 - Eintragung in Lageplänen mit festgelegtem Maßstab
 - Pseudoprofil-Darstellung (Dipol-Dipol-Anordnung) oder Profil-Darstellung (Gradientenanordnung)
 - Isolinienkarten
 - Raumbilder

- Art der Interpretation, z.B.
 - Qualitative Bewertung von Anomalienbereichen
 - Qualitative Bewertung von Einzelanomalien
 - Geologische oder materialmäßige Zuordnung
 - Weitere Leistungen

Verfahrens-Musterbeschreibung Elektromagnetische Kartierung und VLF/VLF-R-Methode

Vorarbeiten

- Auswahl des Meßverfahrens, z.B. Slingram-Verfahren, und der Meßapparatur mit geeigneten Auslagenlängen und Meßfrequenzen in Abhängigkeit von der geforderten Erkundungstiefe.
- Festlegung der Meßlinien (u.a. Orientierung senkrecht zum vermuteten Streichen von Verwerfungssystemen) und des Meßpunktabstandes in Abhängigkeit von der geforderten Auflösung.

Geländearbeiten

- Absuchen des Meßgebiets auf Vorhandensein unbekannter Leitungen im Untergrund mit einem induktiven Kabelsuchgerät.
- Messung mit geeigneter Aufnahmeapparatur.
- Beurteilung der registrierten Werte auf ihre Reproduzierbarkeit und Fehlerbreite.
- Bestimmung der Hangneigung.

Auswertung und Interpretation

- Höhenkorrektur unter Verwendung der Hangneigungsdaten.
- Darstellung der aufgenommenen Werte in Profilkurven oder bei flächiger Aufnahme in Isoliniendarstellungen.
- Kartierung von Bereichen unterschiedlichen Widerstands.
- Interpretation der Meßkurven hinsichtlich gut leitender, steilstehender Strukturen oder "Lineare", d.h. von grundwasserbeeinflussenden Verwerfungen, Kluft- oder Spaltenzonen.
- Vergleich der Ergebnisse mit denen anderer Erkundungsmethoden.
- Falls notwendig, Durchführung von Ergänzungsmessungen, z.B. zur Verdichtung der Messungen in festgestellten Anomalienbereichen.

Ausschreibetext Elektromagnetische Kartierung und VLF/VLF-R-Methode

- Zielsetzung
- Abgrenzung und Größe des Meßgebiets
- Geländezugänglichkeit
- Vorhandensein und Art von Hindernissen und Installationen
- Kantenlänge des Meßrasters oder Profil- und Meßpunktabstand
- Gesamtanzahl der Meßpunkte oder Gesamtlänge der Profile
- Meßverfahren
- Eindringtiefenbereich
- evtl. Angabe des Meßgerätes mit Auslagenlänge und Meßfrequenzbereich
- Meßgenauigkeit/Auflösung

- Art der Darstellung, z.B.
 - Eintragung in Lageplänen mit festgelegtem Maßstab
 - Profil-Darstellung
 - Isoliniendarstellung
 - Raumbilder
- Art der Interpretation, z.B.
 - Qualitative Bewertung von Anomalienbereichen
 - Geologische oder materialmäßige Zuordnung
 - Quantitative Bewertung mittels Modellrechnungen (nur in Ausnahmefällen)
 - Weitere Leistungen

Verfahrens-Musterbeschreibung Bodenradar

Vorarbeiten

- Erarbeiten eines Meßprogramms mit Festlegung der Sende-Empfangs-Anordnung, der geeigneten Antenne sowie der Dominanzfrequenz (in Abhängigkeit von der geforderten Erkundungstiefe und Meßgenauigkeit).

Geländearbeiten

- Signalaufnahme mit geeigneter Aufnahmeapparatur.
- Beurteilung der registrierten Werte auf ihre Reproduzierbarkeit und Fehlerbreite.

Auswertung und Interpretation

- Darstellung der entlang einer Meßlinie aufgenommenen Werte in einem Entfernungslaufzeit-Diagramm (Radargramm).
- Verbesserung des Nutz-/Störsignal-Verhältnisses mittels DV-Korrekturprogrammen.
- Kennzeichnung der materialbezogenen Indikationen und deren übersichtliche Kartendarstellung.
- Zuordnung zu geologischen Strukturen oder besonderen Einlagerungen.
- Vergleich der Ergebnisse mit denen anderer Erkundungsmethoden.
- Falls notwendig, Durchführung von Ergänzungsmessungen, z.B. zur Verdichtung der Messungen in festgestellten Anomalienbereichen.

Ausschreibetext Bodenradar

- Zielsetzung
- Abgrenzung und Größe des Meßgebiets
- Geländezugänglichkeit
- Vorhandensein und Art von Hindernissen und Installationen
- Gesamtlänge der Profile
- Profilabstand
- Eindringtiefenbereich
- Sender/Empfängeranordnung
- Dominanzfrequenz
- Meßgenauigkeit/Auflösung
- Art der Darstellung, z.B.
 - Eintragung in Lageplänen mit festgelegtem Maßstab
 - Radargramme
 - Profil-Darstellung
 - Kartendarstellung der anomalen Bereiche

- Art der Auswertung und Interpretation, z.B.
 - Geschwindigkeitsbestimmung zur Umrechnung der Laufzeiten in Tiefen mittels DV-Programmen
 - Verbesserung des Nutz/Störsignal-Verhältnisses mittels DV-Korrekturprogrammen
 - Zuordnung zu geologischen Strukturen oder besondere Einlagerungen
 - Weitere Leistungen

Verfahrens-Musterbeschreibung Refraktionsseismik

Vorarbeiten

- Erarbeiten eines Meßprogramms mit Festlegung der Meßprofile mit geeigneten Geophonpunkt- und Schußpunktabständen (in Abhängigkeit von der geforderten Erkundungstiefe) sowie der Aufnahmeapparatur mit Angabe der Aufnahmeparameter, z.B. Registrierdauer, Abtastrate, analoge oder digitale Aufzeichnung etc.

Geländearbeiten

- Signalanregung mit geeigneter zerstörungsfreier seismischer Quelle, z.B. Hammer, Fallgewicht, Vibrator etc.
- Meßwertaufnahme mit geeigneter Aufnahmeapparatur.
- Signalverbesserung durch geeignete Maßnahmen (Filterung, Stapelung usw.).
- Beurteilung der registrierten Seismogramme auf ihre Güte und evtl. Wiederholung der Aufnahme.
- Registrierung nur bei geringer Bodenunruhe.
- u.U. Nivellement der Meßpunkte zur Erzielung eines einheitlichen Bezugsniveaus.

Auswertung und Interpretation

- Korrelation der Ersteinsätze und Phasen der seismischen Wellen sowie Ermittlung von Scheingeschwindigkeiten.
- Erstellen von Laufzeitdiagrammen.
- Überprüfung der Parallelität von benachbarten Ersteinsätzen, der Gegenlaufzeiten und Interceptzeiten.
- Bestimmen der wahren Wellengeschwindigkeiten aus Schuß und Gegenschuß an jedem Anregungspunkt.
- Berechnung der Module aus Kompressions- und Scherwellengeschwindigkeit unter Annahme einer plausiblen Dichte in unterschiedlichen Untergrundsbereichen.
- Berücksichtigung der Geländetopographie und evtl. Reduktion mit Hilfe des Bezugsniveaus.
- Ermittlung eines Schichtenmodells unter Zuordnung der Geschwindigkeiten zu bestimmten Schichten und Berechnung deren Tiefen sowie Neigungen.
- Beurteilung des Schichtenverlaufs zwischen den Schußpunkten.
- Bestimmung von Verwerfungen, Flexuren etc.
- Darstellung von Schichtgrenzen in Isolinienkarten.
- Vergleichende Computersimulationen zur Modellentwicklung und Überprüfung der Laufzeiten.
- Vergleich der Ergebnisse mit seismischen Bohrlochmessungen (Sonic Log) oder mit geologisch-petrographischen Bohrinformationen und Zuordnung der Refraktionshorizonte zu geologischen Schichtgrenzen.
- Falls notwendig, Durchführung von Ergänzungsmessungen, z.B. mit geänderten Schuß- und Geophonpunktabständen.

Ausschreibetext Refraktionsseismik

- Zielsetzung
- Abgrenzung und Größe des Meßgebiets
- Geländezugänglichkeit
- Vorhandensein und Art von Störungen
- Anzahl der Meßprofile
- Gesamtlänge der Profile
- Erkundungstiefe
- Schußpunktabstand
- Geophonpunktabstand
- Anzahl der Geophone/Auslagenlänge
- Wellentyp (P- und/oder S-Wellen)
- Art der Anregung
- Apparatur, z.B.
 - digitale/analoge Aufzeichnung
 - Genauigkeit
 - Anzahl Kanäle
 - Signal/Rauschverbesserung
- Art der Darstellung, z.B.
 - Eintragung in Lageplänen mit festgelegtem Maßstab
 - Laufzeitdiagramme
 - Profil-Darstellung
 - Schichtenmodelle
 - Isolinienkarten (Refraktionshorizonte)
- Art der Auswertung und Interpretation, z.B.
 - Geschwindigkeitsbestimmung
 - Tiefenbestimmung unter Schußpunkten
 - Beurteilung des Refraktorverlaufs
 - Ermittlung dynamischer Kennwerte
 - Seismische Modellierung
 - Weitere Leistungen

A.2: Leitlinien zur Geophysik an Altlasten

In diesem Anhang sind die Tabellen zusammengestellt, die die wichtigsten Aussagen zur Aufstellung und Durchführung eines geophysikalischen Erkundungsprogramms an Altlasten zusammenfassen:

- Tabelle A1 (Tabelle 6, Abschn. 3.1) gibt einen Überblick über die Anwendungsmöglichkeiten der geophysikalischen Verfahren bei der Altlastenerkundung,
- Tabelle A2 (Tabelle 7, Abschn. 3.2) gibt an, an welchen Altlastentypen und hydrogeologischen Standorttypen die verschiedenen Verfahren eingesetzt werden können,
- Tabelle A3 (Tabelle 12, Abschn. 3.4) enthält die Entscheidungsmatrix zur Methodenauswahl,
- Tabelle A4 (Tabelle 18, Abschn. 3.6) gibt einen Überblick über mögliche Methodenkombinationen,
- Tabelle A5 (Tabelle 3, Abschn. 2.6.1) stellt die wichtigsten Bohrlochmeßverfahren und deren Anwendungsmöglichkeit zusammen,
- Tabelle A6 (Tabelle 5, Abschn. 2.6.1) gliedert die Bohrlochmeßverfahren nach Zielbereichen,
- Tabelle A7 (Tabelle 10, Abschn. 3.3.2) vergleicht die Kosten der geophysikalischen Verfahren und von Bohrarbeiten,
- Tabelle A8 (Tabelle 11, Abschn. 3.3.2) listet geeignete Meßpunktabstände der verschiedenen Verfahren bei der Altlastenerkundung auf,
- Tabellen A9 bis A13 (Tabellen 13 bis 17, Abschn. 3.5) enthalten Checklisten zur Durchführung eines geophysikalischen Untersuchungsprogramms.

Diese Zusammenstellung dient lediglich einem schnellen Überblick. Weitergehende und erklärende Erläuterungen zu den Tabellen sind dem Text des Kapitels 3 zu entnehmen.

Tabelle A1: Anwendungsmöglichkeiten der geophysikalischen Verfahren bei der Altlastenerkundung

Anwendungsbereich	Erkundung der Geologie des Umfeldes	Erkundung der Altlast	Erkundung der Schadstoffausbreitung	Bemerkung
Verfahren				
Geomagnetik	(+) (in Ausnahmefällen)	(+) (bei magnetischem Inhalt)	-	entfällt bei Häufung von ferromagnetischen Installationen
Geoelektrische Kartierung	+ (nicht in allen Fällen geeignet)	+	(+) (Forschungsbedarf)	entfällt bei Häufung von metall. Leitungen und Installationen
Widerstandssondierung	+	(+) (Bei homogenem Aufbau)	dto.	dto.
Induzierte Polarisation	(+) (in Ausnahmefällen)	(+) (Forschungsbedarf)	(+) (Forschungsbedarf)	dto.
Eigenpotentialmessung	(+) (in Ausnahmefällen)	(+) (Forschungsbedarf)	-	dto.
Elektromagnetische Kartierung	+ (Erkundungen von Verwerfungen. u.ä.)	+	+	dto.
VLF	(+)	+	(+) (Forschungsbedarf)	begrenzte Eindringtiefe
Bodenradar	(+) (nur in trockenem Substrat, geringe Tiefe)	(+) (nur zur Lokalisierung)	-	bedarf noch der Verifizierung
Refraktionsseismik	+ (nicht in allen Fällen geeignet)	(+) (nur zur Lokalisierung)	-	ziemlich aufwendig, Störungen durch Bodenunruhe
Reflexionsseismik	(+) (für manche Fragestellungen geeignet)	-	-	sehr aufwendig, Störungen durch Bodenunruhe
Gravimetrie	-	(+) (nur zur Lokalisierung)	-	aufwendig, nur bei ruhiger Topographie
Geothermik	-	(+) (Forschungsbedarf)	-	
Bohrlochgeophysik	grundsätzlich in allen Bohrungen anzuwenden			

- + Einsatz möglich
 (+) Einsatz mit Einschränkungen möglich
 - Einsatz nicht möglich

Verfahren	Altlasten-Typ			Hydrogeologie-Typ				Bemerkungen
	Hausmülldeponie	Industriemülldeponie	Industriebrache	Kluft- bzw. Karst-Grundwasserleiter (Festgestein); Typen 8,9,14	Grundwasserleiter (Fest- oder Lockergestein); GW - Stand hoch; Typen 1,4,5,7	Grundwasserleiter (Fest- oder Lockergestein); GW - Stand tief; Typen 2,3,6	Porgrundwasserleiter (Lockergestein); Typen 10,11,12,13,15	
Geomagnetik	1)	2)	*	-	-	-	-	1) nur zur Lokalisierung 2) Ortung von Einzelobjekten
Geoelektrische Kartierung	+	+	+	*	+	+	+	
Widerstandssondierung	+	+	-	*	+	+	+	
Induzierte Polarisations	*	*	*	*	+	*	*	Forschungsbedarf
Eigenpotentialmessung	*	*	*	*	*	*	*	Forschungsbedarf
Elektromagnetische Kartierung	+	+	*	+	+	+	+	
VLF	+	+	*	+	+	+	+	
Bodenradar	*	*	+	-	-	*	*	sehr geringe Erkundungstiefe
Refraktionsseismik	*	+	+	+	+	+	-	
Reflexionsseismik	-	-	-	*	*	*	-	Erkundungstiefe >50m
Gravimetrie	*	*	-	-	-	-	-	
Geothermik	*	*	*	-	-	-	-	Forschungsbedarf

+ Einsatz möglich
 * Einsatz mit Einschränkung möglich
 - Einsatz nicht möglich

Tabelle A2 : Einsatzmöglichkeiten der geophysikalischen Verfahren an verschiedenen Altlastentypen und hydrogeologischen Standorttypen

Verfahren	Geomagnetik	Geelektrische Kartierung	Widerstands-sondierung	Induzierte Polarisation	Eigenpotential-messung	Elektromagnetische Kartierung	VLF	Bodenradar	Refraktions-seismik	Reflexions-seismik	Gravimetrie	Geothermik
Fragestellungen												
Lokalisierung : Ausdehnung	+	+	-	(+)	-	+	(+)	(+)	(+)	-	(-)	-
Abdeckung : Durchlässigkeit	-	+	(-)	+	+	+	(+)	+	-	-	-	(-)
Abdeckung : Mächtigkeit	-	-	+	(+)	-	-	-	(+)	-	-	-	-
Mächtigkeit der Altlast	-	-	+	-	-	-	-	(+)	+	-	-	-
Ortung von Einzelobjekten 1)	(+)	+	-	(+)	(+)	+	+	+	-	-	-	-
Sickerwege in der Altlast	-	+	-	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	-	-	-	+
Sickerwege im Umfeld/Untergrund 2)	-	(+)	-	+	(+)	+	(+)	-	+	(+)	-	(-)
Sohlabdichtung : Einbau	-	-	+	-	(-)	-	-	-	-	-	-	-
Sohlabdichtung : Natürlich	-	-	+	-	-	(-)	-	-	(+)	(+)	-	-
1) auch Schadstoffkonzentrationen						+ Geeignet						
2) auch Erkundung von Verwerfungs- und Karstsystemen						(+) Nicht in allen Fällen geeignet						
						(-) In Ausnahmefällen geeignet						
						- Nicht geeignet						

Tabelle A3 : Entscheidungsmatrix Methodenauswahl

Tabelle A4 : Mögliche Methodenkombinationen bei der Vor- und Haupterkundung von Altlasten

Vorerkundung E ₁₋₂	Haupterkundung E ₂₋₃
Geomagnetik	Geomagnet. Detailvermessung Bodenradar
Geelektrische Kartierung	Geelekt. Detailkartierung Widerstandssondierung Induzierte Polarisation Eigenpotentialmessung Geothermik
Widerstandssondierung	Refraktionsseismik Reflexionsseismik Gravimetrie
Elektromagnetische Kartierung	Elektromagn. Detailkartierung VLF-Methode
Bohrlochgeophysik	Bohrlochgeophysik

	Gamma Ray (GR)	Neutron (N) **)	Sonic Log (SONIC)	Elektriklog (EL)	Eigenpotential (EP)	Pokerlog Elektriklog (PEL)	Induktionsverfahren	Mikrotomologie	Mikrolog (M.L.M.)	Salinometer (SAL)	Temperatur (TEMP)	Kaliber (CAL)	Flowmeter (FLOW)	Bohrlochmeßverfahren
	+	+	-	-	-	+	-	-	-	+	-			Trockenes Loch
	+	+	*2	+	*4	+	+	+	+	+	+	-	im Locker- gestein	Unverrohrtes (offenes) Loch mit Spulung oder Wasser gefüllt
	+	+	+	+	*4	+	+	+	+	+	+	*7	im Fest- gestein	Unverrohrtes (offenes) Loch mit Spulung oder Wasser gefüllt
Nur in **1) Ausnahmefällen anzuwenden	*1	*1	-	-	-	-	-	-	+	+	+	*7	im Locker- gestein	Stahlverrohrtes oder -verfiltertes Loch mit Spulung oder Wasser gefüllt
Messung ohne + Einschränkung möglich	*1	*1	-	-	-	-	-	*5	*5	+	*6	*7	im Fest- gestein	Stahlverrohrtes oder -verfiltertes Loch mit Spulung oder Wasser gefüllt
Messung nicht - möglich bzw. nicht sinnvoll	*1	*1	-	-	*5	+	-	+	+	+	*7	*7	im Locker- gestein	Kunststoffverrohrtes -verfiltertes bzw. mit nicht metallischem Material ausgebautes Loch mit Spulung oder Wasser gefüllt
Messung mit * Einschränkung möglich	*1	*1	-	*3	-	*5	+	-	+	+	*7	*7	im Fest- gestein	Kunststoffverrohrtes -verfiltertes bzw. mit nicht metallischem Material ausgebautes Loch mit Spulung oder Wasser gefüllt

Tabelle A5: Die wichtigsten Bohrlochmeßverfahren und deren Anwendungsmöglichkeiten (nach REPSOLD und SCHNEIDER 1988)

Erläuterungen zu Tabelle A5:

- *1) Unerwünschte Dämpfung durch Verrohrung, Ausbau und große Bohrllochdurchmesser, Kontrolle von Tonsperren jedoch möglich.
- *2) Nur für qualitative Korrelationszwecke, keine verlässliche Umrechnung in Porositätswerte.
- *3) In den Filterstrecken Aufnahme eines Widerstandsprofils möglich, jedoch keine quantitativ auswertbaren Widerstandswerte.
- *4) Voraussetzung für die quantitative Auswertung ist eine Ton-Sand-Wechselagerung; häufig Störungen durch nicht identifizierbare Basissprünge. In wassergefüllten Festgesteinsbohrungen meist keine deutbare EP-Kurve.
- *5) Wie *2), außerdem u.U. geeignet zur Kontrolle auf undichte Rohrverbindungen und Leckstellen.
- *6) Zweifelhaft bei hilfswise eingebauten "geschlitzten" Rohren: u.U. starke Teufen- bzw. Mengenverfälschung.
- *7) Mindestpumpraten (min. Förderstrom) sind zu beachten!

Tabelle A6: Gliederung der Bohrlochmeßverfahren nach Zielbereichen (nach REPSOLD und SCHNEIDER 1988); Abkürzung der Verfahren siehe Tab. A5

Methoden in nicht ausgebauten Versuchs- und Aufschlußbohrungen				Methoden zur Kontrolle von Ausbauten und zur Feststellung von Betriebsdaten		
Lockergestein		Festgestein		Locker- und Festgestein		
Gebirgsaufbau	Wasserqualität	Gebirgsaufbau Kluftigkeit Grundwasserzuflüsse	Wasserqualität	Ausbau	Grundwasserzuflüsse	Wasserqualität
GR N *) SONIC EL FEL IES	EL EP FEL IES	SONIC EL FEL IES ML/MLL SAL TEMP CAL FLOW	SAL TEMP	GR EL FEL CAL	FEL SAL TEMP FLOW	SAL TEMP

*) Nur in Ausnahmefällen anzuwenden

*) Nur in Ausnahmefällen anzuwenden

Tabelle A7 : Geophysikalische Arbeiten, die für die Kosten eines Bohrmeters (200,- DM) ausgeführt werden können

Methoden	Anzahl der Meßpunkte	Vermessene Profil-Meter*) [m]	Vermessene Fläche*) [m ²]
Geomagnetik	60 - 250	100 - 800	200 - 1000
Elektromagnetische Kartierung	15 - 50	80 - 400	1000 - 3600
Geoelektrische Kartierung	6 - 20	80 - 200	250 - 1200
Widerstandssondierung	1 - 2	---	---
Induzierte Polarisation*)	3 - 6	30 - 70	100 - 650
Bodenradar	---	40 - 200	---
Eigenpotentialmessung	4 - 10	20 - 100	200 - 1000
Refraktionsseismik	1 - 3	6 - 40	---
Reflexionsseismik	1 - 7	10 - 20	---

Bemerkungen:

Zu den Ursachen der o.a. Bandbreiten siehe Abschn. 3.3.1.

*) Sie Werte wurden abgeleitet unter der Annahme der bei der Altlastenerkundung Üblicherweise verwendeten Meßraster (vgl. Tab. 11)

Tabelle A8: Geeignete Meßpunktabstände für geophysikalische Untersuchungen im Rahmen der Altlastenerkundung

Verfahren	Meßpunktabstände	Bemerkungen
Geomagnetik	1 - 5 m	quadratisches Meßnetz
Goelektrische Kartierung	2 - 15 m	dto
Elektromagnetische Kartierung	2 - 15 m	dto
Induzierte Polarisation*)	10 - 20 m	
Eigenpotentialmessung	5 - 20 m	
Bodenradar	-	kontinuierliche Registrierung
VLF	2 - 10 m	
Refraktionsseismik	1 - 10 m	Geophonabstände
Reflexionsseismik	5 - 20 m	dto
Gravimetrie	2 - 10 m	

Tabelle A9: Checkliste für die Vorarbeiten eines geophysikalischen Untersuchungsprogramms

- Definition des zu untersuchenden Objekts und der Zielsetzung.
- Beurteilung der Geländeverhältnisse in Bezug auf:
 - Anwendbarkeit des Verfahrens,
 - Befahr- und Begehbarkeit,
 - die Messungen beeinflussende Installationen wie Hindernisse, Hochspannungsleitungen, Leitungen für Gas oder Wasser im Untergrund, Nähe von Bebauung und von Verkehrsanlagen.
- Einholen von Hilfsmitteln vom Auftraggeber oder, wenn dort nicht vorhanden, von den Geologischen Landesämtern bzw. den Vermessungs- oder Bergämtern: Lagepläne, eingemessene Punkte und Höhen, vorliegende Erkenntnisse aus Bohrungen auf dem Gelände und in der Umgebung, Informationen über die hydrogeologischen Standortverhältnisse.
- Einschätzung der Aussagekraft des Verfahrens in Bezug auf die Fragestellung..
- Ausarbeitung eines Meßprogramms mit der Festlegung der Meßprofile bzw. eines flächigen Rasters mit geeigneten Profil- und Meßpunktabständen entsprechend der geforderten Erkundungstiefe und Meßgenauigkeit.

Tabelle A10: Checkliste für die Ausschreibung und Vergabe eines geophysikalischen Untersuchungsprogramms

- Erstellen einer sachgemäßen, aber flexibel formulierten Ausschreibung für das Untersuchungsvorhaben mit einer genauen Programmkonzeption und Anforderungen an die Meßdurchführung, die Auswertung und Interpretation sowie die Ergebnisdarstellung.
 - Einholen einer Anfrage mit Auszeichnung der Preise für Arbeitsvorbereitung, Gerätekosten, Fahrtkosten, Geländearbeiten, Auswertung und Interpretation, Erstellung eines Ergebnisberichtes, Besprechungstermine etc.
 - Vergabe des Untersuchungsprogramms an einen Anbieter unter Berücksichtigung der Kosten sowie den Referenzen und der Zuverlässigkeit des Anbieters.
-

Tabelle A11: Checkliste für die Geländearbeiten eines geophysikalischen Untersuchungsprogramms

- Organisatorische Vorbereitungen, wie Bereitstellung von Personal und Meßgeräten, Benachrichtigung von Aufsichtsbehörden, Gemeinden und Eigentümer, Einholen der Genehmigung zum Betreten des Meßortes.
 - Anschließen der Meßprofile an topographische Unterlagen, wie Karten oder Meßnetze.
 - Kennzeichnung der Meßlinien und Meßpunkte im Gelände, z.B. durch einbetonierte Markierungen.
 - Sachgemäße Gestaltung des Meßnetzes, d.h. Wahl der Orientierung der Meßprofile und der Meßpunkt- und Profilabstände.
 - Absuchen des Meßgebietes auf Vorhandensein unbekannter Leitungen im Untergrund bei den geoelektrischen Verfahren.
 - Ausdehnen der Messungen zur Erkundung einer Altlast in die ungestörte Umgebung.
 - Ggf. digitale Aufzeichnung der Meßwerte.
 - Soweit möglich, Durchführung einer Vorauswertung im Gelände.
 - Anpassen der Geländearbeiten an unvorhergesehene Bedingungen, z.B. Verändern von Profil- oder Meßpunktabständen.
-

Tabelle A12: Checkliste für die Auswertung und Interpretation geophysikalischer Untersuchungen

- Anwendung anerkannter DV-Programme.
 - Geeignete, klare Darstellung, die auch für Nichtfachleute verwertbar ist, z.B. in Form von farbigen Profil-, Isoliniendarstellungen und Raumbildern.
 - Übertragen der Ergebnisse verschiedener Verfahren in Kartenmaterial mit festgelegtem, einheitlichem Maßstab.
 - Kritische Überprüfung der Ergebnisse und Vergleich zwischen verschiedenen geophysikalischen Methoden.
 - Interdisziplinärer Abgleich der Ergebnisse mit Daten der Altlast und dem geologisch - hydrogeologisch - tektonischen Aufbau des Nebengesteins.
-

Tabelle A13: Checkliste für die Nachfolgearbeiten geophysikalischer Untersuchungen

- Durchführung eines ergänzenden Untersuchungsprogramms, z.B. zur Verdichtung der Messungen in Gebieten mit fest- gestellten Anomalien.
- Verifizierung der geophysikalischen Ergebnisse anhand von Bohr- oder Schürfarbeiten.

Abbildungsverzeichnis

ABB. 1: GEOGRAPHISCHE LAGE DER MODELLSTANDORTE	6
ABB. 2: MAGNETISCHE ANOMALIEN IN UNTERSCHIEDLICHER HÖHE ÜBER GRUND.....	10
ABB. 3: MAGNETISCHES PROFIL DER TOTALINTENSITÄT ΔT ÜBER EINE KUGELFÖRMIGE EISENSCHROTTANHÄUFUNG IN MITTELEUROPA.....	11
ABB. 4: GEOMAGNETISCHE MESSUNGEN AM MODELLSTANDORT GEISLINGEN ZUR ERKUNDUNG MAGNETISCHER OBJEKTE UND STRUKTUREN AUF EINEM EHEMALIGEN GASWERKSGELÄNDE (UNTERSUCHUNGEN: GESELLSCHAFT FÜR GEOPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN, KARLSRUHE; KOORDINATION: INST. DR. JUNGBAUER + PARTNER, 1988/89).....	12
ABB. 5: RAUMBILD DES VERTIKALGRADIENTEN DER MAGNETISCHEN TOTALINTENSITÄT AM MODELLSTANDORT LEONBERG (UNTERSUCHUNGEN: THOR GEOPHYSIKALISCHE PROSPEKTION GMBH, KIEL; KOORDINATION: LURGI/ OBERMEYER, 1988/89).....	13
ABB. 6: ANOMALIEN DER MAGNETISCHEN TOTALINTENSITÄT T AM MODELLSTANDORT BITZ (UNTERSUCHUNGEN: GEOPHYSIK CONSULTING GMBH, KIEL; KOORDINATION: VEDEWA, 1988/89).....	14
ABB. 7: STROMDURCHGANG IN EINEM RÄUMLICH BEGRENZTEN LEITER	15
ABB. 8 : MEßPRINZIP DER GLEICHSTROMVERFAHREN	16
ABB. 9: MEßANORDNUNGEN BEI GEOELEKTRISCHEN KARTIERUNGEN UND WIDERSTANDSSONDIERUNGEN	18
ABB. 10: ISOLINIENKARTE DES SCHEINBAREN SPEZIFISCHEN WIDERSTANDES P_s NACH GEOELEKTRISCHER KARTIERUNG AM MODELLSTANDORT OSTERHOFEN (UNTERSUCHUNGEN: R. BUCHHOLZ BÜRO FÜR INGENIEURGEOPHYSIK, HEILIGENBERG; KOORDINATION: TGU, 1988/89).....	20
ABB. 11: ISOLINIENKARTE DES SCHEINBAREN SPEZIFISCHEN WIDERSTANDES P_s NACH GEOELEKTRISCHER KARTIERUNG AM MODELLSTANDORT LEONBERG (UNTERSUCHUNGEN: THOR GEOPHYSIKALISCHE PROSPEKTION GMBH, KIEL; KOORDINATION: LURGI / OBERMEYER, 1988/89).....	21
ABB. 12: BEISPIEL FÜR EINE SONDIERUNGSKURVE UND INTERPRETATION MIT ELEKTRONISCH BERECHNETER MODELLKURVE NACH EINER WIDERSTANDSSONDIERUNG IN SCHLUMBERGER-ANORDNUNG AM MODELLSTANDORT MANNHEIM.....	23
ABB. 13: ISOLINIENPLAN DER BASIS DES GRUNDWASSERLEITERS NACH ERGEBNISSEN VON WIDERSTANDSSONDIERUNGEN AM MODELLSTANDORT OSTERHOFEN (UNTERSUCHUNGEN: R. BUCHHOLZ BÜRO FÜR INGENIEURGEOPHYSIK, HEILIGENBERG; KOORDINATION: TGU, 1988/89)	24
ABB. 14 : ERGEBNISSE VON WIDERSTANDSSONDIERUNGEN IN SCHLUMBERGER-ANORDNUNG AM MODELLSTANDORT MANNHEIM (UNTERSUCHUNGEN: GEOPHYSIK CONSULTING GMBH, KIEL; KOORDINATION: RÖVER + PARTNER / TAUW, 1988/89), (A) SONDIERUNGSKURVE UND SCHICHTENMODELL AM PUNKT 17E AUßERHALB DER DEPONIE, (B) SONDIERUNGSKURVE UND SCHICHTENMODELL AM PUNKT 13E AUF DEM DEPONIEKÖRPER, (C) GEOELEKTRISCHES PROFIL	26
ABB. 15: MEßPRINZIP DER INDUZIERTEN POLARISATION	29
ABB. 16: PSEUDOPROFIL-DARSTELLUNG EINER IP-MESSUNG IN DIPOL-DIPOL-ANORDNUNG MIT 5 VERSCHIEDENEN DIPOLABSTÄNDEN (VON 12,5 BIS 62,5 M) AM MODELLSTANDORT LEONBERG (UNTERSUCHUNGEN: NLfB, HANNOVER; KOORDINATION: LURGI / OBERMEYER, 1988/89)	31
ABB. 17: ERGEBNIS VON IP-MESSUNGEN IN DIPOL-DIPOL-ANORDNUNG MIT 5 VERSCHIEDENEN DIPOLABSTÄNDEN VON 10 BIS 50 M AM MODELLSTANDORT OSTERHOFEN (UNTERSUCHUNGEN: NLfB, HANNOVER; KOORDINATION: TGU, 1988/89), A) ISOLINIENKARTE DER AUFLADEFÄHIGKEIT M_2 FÜR DAS MEßNIVEAU $N=5$ (DIPOLABSTAND 50 M).....	32
ABB. 17: B) PSEUDOPROFIL-DARSTELLUNG FÜR MEßPROFIL 7963, C) PSEUDOPROFIL-DARSTELLUNG FÜR MEßPROFIL 7966.....	33
ABB. 18: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG VERSCHIEDENER EP-ANOMALIEN ÜBER EINER ALTLAST	35
ABB. 19: ISOLINIEN DES ELEKTRISCHEN EIGENPOTENTIALS AM MODELLSTANDORT BITZ (UNTERSUCHUNGEN: GEOPHYSIK CONSULTING GMBH, KIEL; KOORDINATION: VEDEWA, 1988/89).....	36
ABB. 20: MEßPRINZIP DER ELEKTROMAGNETISCHEN KARTIERUNG	38
ABB. 21: NOMOGRAMM ZUR BEZIEHUNG ZWISCHEN SPEZIFISCHEM WIDERSTAND (LINKE SÄULE), EINDRINGTIEFE (MITTLERE SÄULE) UND MEßFREQUENZ (RECHTE SÄULE) EINER EBENEN HOMOGENEN WELLE	40
ABB. 22: TYPISCHE ELEKTROMAGNETISCHE MEßKURVEN ÜBER STEILSTEHENDEN, ELEKTRISCH GUT LEITENDEN STRUKTUREN, Z.B. VERWERFUNGEN, SPALTEN ODER KLUFTZONEN.....	41

ABB. 23: PROFIL DER EM-MEßWERTE: IN- UND OUTPHASE FÜR DREI FREQUENZEN ÜBER DER SONDERMÜLLDEPONIE MÜHLACKER (UNTERSUCHUNGEN: NLFb, HANNOVER; KOORDINATION: WEBER/IFU/TAUW, 1988/89).....	42
ABB. 24 : MEßPRINZIP DES BODENRADARS.....	44
ABB. 25: ERGEBNISSE DES BODENRADARS ZUR ERKUNDUNG EINES EHEMALIGEN GASWERKSGELÄNDES AM MODELLSTANDORT GEISLINGEN (UNTERSUCHUNGEN: GESELLSCHAFT FÜR GEOPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN, KARLSRUHE; KOORDINATION: INST. DR. JUNGBAUER PARTNER, 1988/89).....	45
ABB. 26: BODENRADAR-PROFILSCHNITT AM MODELLSTANDORT OSTERHOFEN (UNTERSUCHUNGEN: R. BUCHHOLZ BÜRO FÜR INGENIEURGEOPHYSIK, HEILIGENBERG; KOORDINATION: TGU, 1988/89).....	46
ABB. 27: MEßPRINZIP DES REFRAKTIONSSEISMISCHEN VERFAHRENS.....	49
ABB. 28: ERGEBNISSE REFRAKTIONSSEISMISCHER MESSUNGEN AM MODELLSTANDORT LEONBERG (UNTERSUCHUNGEN: THOR GEOPHYSIKALISCHE PROSPEKTION GMBH, KIEL; KOORDINATION: LURGI/OBERMEYER, 1988/89).....	51
ABB. 29: ERGEBNISSE REFRAKTIONSSEISMISCHER MESSUNGEN AM MODELLSTANDORT MÜHLACKER (UNTERSUCHUNGEN: GESELLSCHAFT FÜR BAUGELOGIE UND -MEßTECHNIK MBH, RHEINSTETTEN; KOORDINATION: WEBER / IFU / TAUW, 1988/89), A) SCHICHTENMODELL FÜR EIN MEßPROFIL MIT GEOPHONABSTÄNDEN VON 2,5 M, B) SCHICHTENMODELL FÜR EIN MEßPROFIL MIT GEOPHONABSTÄNDEN VON 10 M	53
ABB. 30: MEßPRINZIP DES REFLEXIONSSEISMISCHEN VERFAHRENS.....	54
ABB. 31: ERGEBNISSE REFLEXIONSSEISMISCHER MESSUNGEN AM MODELLSTANDORT MÜHLACKER (UNTERSUCHUNGEN: GESELLSCHAFT FÜR BAUGELOGIE UND -MEßTECHNIK MBH, RHEINSTETTEN; KOORDINATION: WEBER/IFU/TAUW, 1988/89), A) PROFILSCHNITT, B) SEISMOGRAMM.....	56
ABB. 32: ERGEBNISSE VON REFRAKTIONS- UND REFLEXIONSSEISMISCHEN MESSUNGEN AM MODELLSTANDORT HERTEN (UNTERSUCHUNGEN: GESELLSCHAFT FÜR BAUGELOGIE UND -MEßTECHNIK MBH, RHEINSTETTEN; KOORDINATION: SCHLEGEL & PARTNER, 1988/89).....	57
ABB. 33 : MEßPRINZIP EINER GRAVIMETRISCHEN VERMESSUNG	59
ABB. 34: ERGEBNIS EINER GRAVIMETRISCHEN VERMESSUNG AM MODELLSTANDORT MÜHLACKER NACH DURCHFÜHRUNG EINER FREILUFT- UND TOPOGRAPHISCHEN KORREKTUR (UNTERSUCHUNGEN: GESELLSCHAFT FÜR GEOPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN, KARLSRUHE; KOORDINATION: WEBER / IFU / TAUW, 1988/89).....	60
ABB. 35: GEBIETE MIT GEOTHERMISCHEN ANOMALIEN AM MODELLSTANDORT BITZ (UNTERSUCHUNGEN: GESELLSCHAFT FÜR GEOPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN, KARLSRUHE KOORDINATION: VEDEWA, 1988/89).....	62
ABB. 36: PRINZIP DER BOHRLOCHMEßVERFAHREN AM BEISPIEL EINER TEMPERATURMESSUNG (RECHTS: MEßKURVE).....	63
ABB. 37: ÜBERSICHT ÜBER HYDROGEOLOGISCHE STANDORTTYPEN (NACH ALTLASTENHANDBUCH BADEN-WÜRTTEMBERG TEIL II, 1987)	77
ABB. 38: VERGLEICH VON BOHRKOSTEN MIT DEN KOSTEN FÜR GEOPHYSIKALISCHE VERFAHREN IM MODELLSTANDORTPROGRAMM	83

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: STANDORTMERKMALE DER MODELLSTANDORTE.....	7
TABELLE 2 : GEOPHYSIK-PROGRAMM AN DEN MODELLSTANDORTEN	7
TABELLE 3: DIE WICHTIGSTEN BOHRLOCHMEßVERFAHREN UND DEREN ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN (NACH REPSOLD U. SCHNEIDER 1988).....	65
TABELLE 4: WIRKUNGSWEISE DER BOHRLOCHMEßVERFAHREN (NACH REPSOLD U. SCHNEIDER 1988); ABKÜRZUNG DER VERFAHREN SIEHE TAB. 3	66
TABELLE 5: GLIEDERUNG DER BOHRLOCHMEßVERFAHREN NACH ZIELBEREICHEN (NACH REPSOLD U. SCHNEIDER 1988) ; ABKÜRZUNG DER VERFAHREN SIEHE TAB. 3	67
TABELLE 6 : ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN DER GEOPHYSIKALISCHEN VERFAHREN BEI DER ALTLASTENERKUNDUNG	74
TABELLE 7: EINSATZMÖGLICHKEITEN DER GEOPHYSIKALISCHEN VERFAHREN AN VERSCHIEDENEN ALTLASTENTYPEN UND HYDROGEOLOGISCHEN STANDORTTYPEN	75
TABELLE 8 : KOSTEN PRO MEßTAG DER GEOPHYSIKALISCHEN VERFAHREN IM MODELLSTANDORTPROGRAMM	80
TABELLE 9: KOSTEN PRO 1 M PROFIL UND PRO MEßPUNKT DER GEOPHYSIKALISCHEN VERFAHREN IM MODELLSTANDORTPROGRAMM	80
TABELLE 10: GEOPHYSIKALISCHE ARBEITEN, DIE FÜR DIE KOSTEN EINES BOHRMETERS (DM 200,-) AUSGEFÜHRT WERDEN KÖNNEN.....	81
TABELLE 11: GEEIGNETE MEßPUNKTABSTÄNDE FÜR GEOPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN IM RAHMEN DER ALTLASTENERKUNDUNG	82
TABELLE 12: ENTSCHEIDUNGSMATRIX METHODENAUSWAHL.....	84
TABELLE 13 : CHECKLISTE FÜR DIE VORARBEITEN EINES GEOPHYSIKALISCHEN UNTERSUCHUNGSPROGRAMMS.....	87
TABELLE 14: CHECKLISTE FÜR DIE AUSSCHREIBUNG UND VERGABE EINES GEOPHYSIKALISCHEN UNTERSUCHUNGSPROGRAMMS	89
TABELLE 15: CHECKLISTE FÜR DIE GELÄNDEARBEITEN EINES GEOPHYSIKALISCHEN UNTERSUCHUNGSPROGRAMMS	90
TABELLE 16: CHECKLISTE FÜR DIE AUSWERTUNG UND INTERPRETATION GEOPHYSIKALISCHER UNTERSUCHUNGEN	91
TABELLE 17: CHECKLISTE FÜR DIE NACHFOLGEARBEITEN GEOPHYSIKALISCHER UNTERSUCHUNGEN.....	92
TABELLE 18 : MÖGLICHE METHODENKOMBINATIONEN BEI DER VOR- UND HAUPTERKUNDUNG VON ALTLASTEN .	93
TABELLE A1: ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN DER GEOPHYSIKALISCHEN VERFAHREN BEI DER ALTLASTENERKUNDUNG	117
TABELLE A2 : EINSATZMÖGLICHKEITEN DER GEOPHYSIKALISCHEN VERFAHREN AN VERSCHIEDENEN ALTLASTENTYPEN UND HYDROGEOLOGISCHEN STANDORTTYPEN	118
TABELLE A3 : ENTSCHEIDUNGSMATRIX METHODENAUSWAHL.....	119
TABELLE A4 : MÖGLICHE METHODENKOMBINATIONEN BEI DER VOR- UND HAUPTERKUNDUNG VON ALTLASTEN	119
TABELLE A5: DIE WICHTIGSTEN BOHRLOCHMEßVERFAHREN UND DEREN ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN (NACH REPSOLD UND SCHNEIDER 1988).....	120
TABELLE A6: GLIEDERUNG DER BOHRLOCHMEßVERFAHREN NACH ZIELBEREICHEN (NACH REPSOLD UND SCHNEIDER 1988); ABKÜRZUNG DER VERFAHREN SIEHE TAB. A5	121
TABELLE A7 : GEOPHYSIKALISCHE ARBEITEN, DIE FÜR DIE KOSTEN EINES BOHRMETERS (200,- DM) AUSGEFÜHRT WERDEN KÖNNEN.....	121
TABELLE A8: GEEIGNETE MEßPUNKTABSTÄNDE FÜR GEOPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN IM RAHMEN DER ALTLASTENERKUNDUNG	122
TABELLE A9: CHECKLISTE FÜR DIE VORARBEITEN EINES GEOPHYSIKALISCHEN UNTERSUCHUNGSPROGRAMMS...	122
TABELLE A10: CHECKLISTE FÜR DIE AUSSCHREIBUNG UND VERGABE EINES GEOPHYSIKALISCHEN UNTERSUCHUNGSPROGRAMMS	123
TABELLE A11: CHECKLISTE FÜR DIE GELÄNDEARBEITEN EINES GEOPHYSIKALISCHEN UNTERSUCHUNGSPROGRAMMS	123
TABELLE A12: CHECKLISTE FÜR DIE AUSWERTUNG UND INTERPRETATION GEOPHYSIKALISCHER UNTERSUCHUNGEN.....	124
TABELLE A13: CHECKLISTE FÜR DIE NACHFOLGEARBEITEN GEOPHYSIKALISCHER UNTERSUCHUNGEN	124

Indexverzeichnis

B

Bodenradar	
Allgemeines	43
Anwendungsgrenzen	76
Ausschreibetext Bodenradar	112
Meßprinzip	43
Modellstandort Geislingen	45
Modellstandort Osterhofen	46
Verfahrens-Musterbeschreibung Bodenradar	112
Bohrlochgeophysik	
Allgemeines	63, 64, 66
Anwendungsmöglichkeiten	64
Eigenpotentialmessung	68
Elektriklog (EL)	68
Flowmetermessung (FLOW)	70
fokussiertes Elektriklog (FEL)	69
Gamma-Ray Messung (GR)	64
Gliederung	67
Induktionsmessung (IES)	69
Kalibermessung (CAL)	70
Laterolog (LL)	69
Neutronenmessung	64
Salinometermessung (SAL)	69
Sonic Log (Akustiklog)	68
Temperaturmessung (TEMP)	70
Wirkungsweise	66
Bohrungen	
Allgemeines	81
Kostenvergleich Geophysik / Bohrungen	81, 82
E	
Eigenpotentialmessung	
Allgemeines	34, 68
Anwendungsgrenzen	76
Einschränkungen	75
Forschungs- und Entwicklungsbedarf	99
Modellstandort Bitz	36
Elektriklog (EL)	68
elektromagnetische Kartierung	
Allgemeines	37
Anwendungsgrenzen	76
Ausschreibetext Elektromagnetische Kartierung und VLF/VLF-R-Methode	110
Meßkurven	40
Meßprinzip	37
Profil	42
Sondermülldeponie Mühlacker	42
Verfahrens-Musterbeschreibung	
Elektromagnetische Kartierung und VLF/VLF-R-Methode	110

F

Flowmetermessung	
Allgemeines	70
fokussiertes Elektriklog (FEL)	69

G

Gamma-Ray Messung (GR)	64
Geoelektrik	
Allgemeines	15
Anwendungsgrenzen	76
Bodenradar	43
Eigenpotentialmessung	34
Einschränkungen	75
elektromagnetische Kartierung	37
geoelektrische Kartierung	17
Gleichstromverfahren	15, 16
induzierte Polarisation	27, 28
Very Low Frequency-(VLF-)Methode	42
Widerstandssondierung	17, 22
geoelektrische Kartierung	
Allgemeines	17
Anwendungsgrenzen	76
Ausschreibetext Geoelektrische Kartierung	104
Dipol-Dipol-Anordnung	17
Meßanordnung	17
Modellstandort Leonberg	20
Modellstandort Osterhofen	19
Schlumberger-Anordnung	17
Verfahrens-Musterbeschreibung Geoelektrische Kartierung	104
Wenner-Anordnung	17
Geomagnetik	
Allgemeines	9
Anwendungsgrenzen	76
Ausschreibetext Geomagnetik	102
Einschränkungen	75
magnetische Anomalien	9
magnetische Totalintensität	10, 12, 13
Modellstandort Bitz	13
Modellstandort Leonberg	12
Verfahrens-Musterbeschreibung Geomagnetik	102
Geophysik	
Allgemeines	4
Forschungs- und Entwicklungsbedarf	98
Kostenvergleich Geophysik / Bohrungen	81, 82
Modellstandorte	5, 7

geophysikalische Untersuchung	
Allgemeines	9
Altlastentypen	73
Anwendungsbereiche	72, 74
Anwendungsgrenzen	76
Ausschreibetext Bodenradar	112
Ausschreibetext Elektromagnetische Kartierung und VLF/VLF-R-Methode	110
Ausschreibetext Geoelektrische Kartierung ..	104
Ausschreibetext Geomagnetik	102
Ausschreibetext Induzierte Polarisisation	108
Ausschreibetext Refraktionsseismik	115
Ausschreibetext Widerstandssondierung	106
Ausschreibung	88
Auswertung und Interpretation	91
Bodenradar	43
Bohrlochgeophysik	63
Bohrlochmeßverfahren	64, 66, 67
Checkliste für die Ausschreibung	89
Checkliste für die Auswertung und Interpretation	91
Checkliste für die Geländearbeiten	90
Checkliste für die Nachfolgearbeiten	92
Checkliste für die Vergabe	89
Checkliste für die Vorarbeiten	87
Durchführung	85
Eigenpotentialmessung	34, 68
Einsatzmöglichkeiten Altlastentypen	75, 118
Einsatzmöglichkeiten hydrogeologische Standorttypen	75, 118
Einschränkungen	75
Elektriklog (EL)	68
elektromagnetische Kartierung	37
Erkundung der Altlast	72
Erkundung der Geologie und Hydrogeologie ..	72
Erkundung der Schadstoffausbreitung	72
Flowmetermessung (FLOW)	70
fokussiertes Elektriklog (FEL)	69
Forschungs- und Entwicklungsbedarf	98
Geländearbeiten	89
Geoelektrik	15
geoelektrische Kartierung	17
Geothermik	60
Gleichstromverfahren	15, 16
Gravimetrie	57, 58
Haupterkundung	87
Hilfsmittel	86
hydrogeologische Standorttypen	76
Induktionsmessung (IES)	69
induzierte Polarisisation	27, 28
isotopenhydrologische Altersbestimmung	71
Kalibermessung (CAL)	70
Kosten	79, 80
Kostenvergleich Geophysik / Bohrungen .	81, 82
Laterolog (LL)	69
Literatur	100
Meßprinzip	48, 58
Meßpunktabstände	82
Methodenauswahl	84, 85
Methodenkombinationen	92, 93
Nachfolgearbeiten	91
nähere Erkundung E2-3	87
orientierende Erkundung E1-2	87
Reflexionsseismik	52, 53
Refraktionsseismik	48
Salinometermessung (SAL)	69
Seismik	46
Sonic Log (Akustiklog)	68
Temperaturmessung (TEMP)	70
Tritiumbestimmungen	71
Verfahrens-Musterbeschreibung Bodenradar	112
Verfahrens-Musterbeschreibung Elektromagnetische Kartierung und VLF/VLF-R-Methode	110
Verfahrens-Musterbeschreibung Geoelektrische Kartierung	104
Verfahrens-Musterbeschreibung Geomagnetik	102
Verfahrens-Musterbeschreibung Induzierte Polarisation	108
Verfahrens-Musterbeschreibung Refraktionsseismik	114
Verfahrens-Musterbeschreibung Widerstandssondierung	106
Verfahrens- Musterbeschreibungen/Ausschreibetexte .	101
Vergabe	88
Very Low Frequency-(VLF-)Methode	42
Vorarbeiten	85
Vorerkundung	87
Vorschläge für weitere geophysikalische Untersuchungen an den Modellstandorten	94
Widerstandssondierung	17, 22
Geothermik Allgemeines	60
Anwendungsgrenzen	76
Infrarot(IR)-Oberflächenerkundung	60
Modellstandort Bitz	61
Temperaturmessungen in Flachbohrungen	60
Gleichstromverfahren	16
Gravimetrie Allgemeines	57, 58
Anwendungsgrenzen	76
Einschränkungen	75
Modellstandort Mühlacker	59

I

Induktionsmessung (IES)	69
induzierte Polarisation	
Allgemeines	27, 28
Anwendungsgrenzen	76
Ausschreibetext Induzierte Polarisation	108
Einschränkungen.....	75
Forschungs- und Entwicklungsbedarf	99
Grenzschichtpolarisation	27
Meßprinzip.....	28
metallische Polarisation.....	27
Modellstandort Leonberg.....	30
Modellstandort Osterhofen	31
Verfahrens-Musterbeschreibung Induzierte Polarisation.....	108
isotopenhydrologische Altersbestimmung.....	71

K

Kalibermessung (CAL)	70
----------------------------	----

L

Laterolog (LL)	69
Literatur	
geophysikalische Untersuchung	100

M

Modellstandort Bitz	
Allgemeines	13, 36, 61
Eigenpotentialmessung.....	36
Geomagnetik	13
Geothermik	61
Vorschläge für weitere geophysikalische Untersuchungen.....	96
Modellstandort Geislingen	
Allgemeines	45
Bodenradar.....	45
Vorschläge für weitere geophysikalische Untersuchungen.....	98
Modellstandort Hertzen	
Vorschläge für weitere geophysikalische Untersuchungen.....	97
Modellstandort Leonberg	
Allgemeines	12, 30, 50
Geomagnetik	12
induzierte Polarisation.....	30
Refraktionsseismik	50
Vorschläge für weitere geophysikalische Untersuchungen.....	94
Modellstandort Mannheim	
Allgemeines	22, 25
Vorschläge für weitere geophysikalische Untersuchungen.....	97
Widerstandssondierung	22, 25
Modellstandort Mühlacker	
Allgemeines	42, 52, 55, 59
elektromagnetische Kartierung	42
Gravimetrie	59

Reflexionsseismik.....	52, 55
Vorschläge für weitere geophysikalische Untersuchungen	95

Modellstandort Osterhofen

Allgemeines.....	19, 24, 31, 46
Bodenradar	46
geoelektrische Kartierung	19
induzierte Polarisation	31
Vorschläge für weitere geophysikalische Untersuchungen	96
Widerstandssondierung.....	24

Modellstandorte

Geophysik.....	5, 7
Stand 1990	5, 7
Vorschläge für weitere geophysikalische Untersuchungen	94

N

Neutronenmessung.....	64
-----------------------	----

R

Reflexionsseismik

Allgemeines.....	52, 53
Anwendungsgrenzen	76
Forschungs- und Entwicklungsbedarf	98
Meßprinzip.....	53
Modellstandort Mühlacker	52, 55

Refraktionsseismik

Allgemeines.....	48
Anwendungsgrenzen	76
Ausschreibetext Refraktionsseismik	115
Einschränkungen.....	75
Modellstandort Leonberg	50
Verfahrens-Musterbeschreibung Refraktionsseismik	114

S

Salinometermessung (SAL).....	69
-------------------------------	----

Seismik

Allgemeines.....	46
Meßprinzip.....	48
Reflexionsseismik.....	52, 53
Refraktionsseismik.....	48
Sonic Log.....	68

T

Temperaturmessung (TEMP)	70
Tritiumbestimmungen	71

V

Very Low Frequency-(VLF-)Methode

Allgemeines.....	42
Anwendungsgrenzen	76
Ausschreibetext Elektromagnetische Kartierung und VLF/VLF-R-Methode.....	110
Verfahrens-Musterbeschreibung Elektromagnetische Kartierung und VLF/VLF-R-Methode.....	110

W

Widerstandssondierung

Allgemeines	17, 22
Anwendungsgrenzen	76
Äquivalenzprinzip	22
Ausschreibetext Widerstandssondierung	106

Meßanordnung	17
Modellstandort Mannheim.....	22, 25
Modellstandort Osterhofen.....	24
Schichtunterdrückung	22
Verfahrens-Musterbeschreibung	
Widerstandssondierung	106