

## **E1-3 Geophysikalische Standortuntersuchung**

Stand: Bautechnik 2004

### **1 Allgemeines**

Als Ergänzung zu den Methoden der Standorterkundung nach E1-1 stellt die Geophysik eine Vielzahl unterschiedlicher Messmethoden bereit. Mit ihnen können punktuell ermittelte Informationen über den Untergrund in die Fläche interpoliert werden. Das Messprogramm muss jedoch sehr genau auf die jeweilige Fragestellung abgestimmt werden und setzt sich in der Regel aus einer Kombination mehrerer geophysikalischer Methoden und Verfahren zusammen.

Eine kurz gefasste Übersicht über geophysikalische Messmethoden kann der DIN 4020 entnommen werden. Diese DIN-Norm weist jedoch ausdrücklich darauf hin, dass geophysikalische Messungen zur Baugrunderkundung und Beurteilung nur in Verbindung mit direkten Aufschlussverfahren eingesetzt werden sollten. Geophysikalische Verfahren liefern umfangreiche Informationen über den Aufbau und die Struktur des Untergrundes. Sie ermöglichen einen schnellen, linienhaften, vertikal ebenen Aufschluss (Profil) oder – aus der Kombination von mehreren Profilen beziehungsweise einer flächenhaften Versuchsanordnung – ein dreidimensionales Modell des Untergrundes. Mit lithologischen, strukturellen und mechanischen Veränderungen im Untergrund gehen auch Änderungen der physikalischen Eigenschaften einher, so dass sie ab einer gewissen Signifikanz messbar sind. Lokale, kleinräumige Veränderungen im Untergrund wie z.B. Hohlräume, Auflockerungen, anthropogene Einlagerungen o.ä. bilden sich als Anomalien in den geophysikalischen Untersuchungen ab.

### **2 Anwendungsgebiete geophysikalischer Felduntersuchungen**

Die geophysikalischen Felduntersuchungen dienen der Verdichtung einer Standorterkundung und der Planung von weitergehenden Untersuchungen. Sie sind eine wertvolle Hilfe bei der räumlichen Abgrenzung von Ablagerungen, bei der Lokalisierung von Anomalien im Untergrund und bei der Modellierung der Ausbreitung von Schadstoffen. Wegen der Mehrdeutigkeit bei der Interpretation und Visualisierung der Messergebnisse ist eine enge Zusammenarbeit zwischen einem erfahrenen Geophysiker und einem qualifizierten geotechnischen Sachverständigen (DIN 4020) unerlässlich.

Geophysikalische Untersuchungen haben die folgenden Ziele:

- Erkundung des Gebirgsaufbaus, zum Beispiel Grenze zwischen einzelnen lithologischen Horizonten und deren Mächtigkeiten
- Erkundung von geologischen Störungen (Tektonik)
- Erkundung von Hohlräumen, zum Beispiel Karsthohlräume oder bergbauliche Strukturen
- Erkennen von Anomalien und Hindernissen, zum Beispiel anthropogene Strukturen wie Bauwerksreste und/oder Rohrleitungen
- Ableitung von Festigkeits-, Dichte- oder Elastizitätsparameter des Untergrundes
- Erkundung des Wasserspiegels, der wasserführenden Schichten und wasserführenden Großklüfte
- Erkundung von Verunreinigungen im Untergrund.

### **3 Geophysikalische Verfahren**

Eine Auswahl der wichtigsten geophysikalischen Verfahren zur Standorterkundung ist in der Tabelle 1-3.1 zusammengestellt. Bei allen Methoden und Messverfahren ist, bei gegebener Fragestellung, auf eine Mindestvoraussetzung der verwendeten Messapparaturen, der Feldparameter der Auswertetechniken zur Bearbeitung der Messdaten und der Ausbildung des eingesetzten Personals zu achten. Eine ausführliche Beschreibung und eine Auflistung dieser Mindestanforderungen findet sich in KNÖDEL, KRUMMEL UND LANGE, 1997 [1].

#### **3.1 Seismik**

Bei den seismischen Verfahren werden als Informationsträger elastische Wellen und Wellenfelder verwendet, die zu ebenen oder räumlichen Bildern des Untergrundes aufgearbeitet werden. Die für die Wellenausbreitung entscheidenden Parameter sind die Wellengeschwindigkeiten in den unterschiedlichen Materialien. Die Wellengeschwindigkeiten werden durch Kenngrößen wie Dichte, Kompressions- und Schubmodule, Porosität u.ä. bestimmt. Der Untergrund beeinflusst die Ausbreitung seismischer (elastischer) Wellen durch Mechanismen wie: Reflexion, Refraktion (Brechung, Beugung), Absorption und Streuung.

Die seismischen Wellen werden künstlich erzeugt, z.B. durch Sprengstoff, Hammerschläge, Vibratoren, Implosionen, beschleunigte Fallgewichte oder Luftschallquellen. Im Wasser kommen z.B. Sparker, Boomer oder Airguns zum Einsatz. Die Wellen werden mit sog. Geophonen, Beschleunigungsaufnehmern oder Hydrophonen aufgezeichnet. Sende- und Empfängerfrequenzen müssen den Aufgabenstellungen vor Beginn einer Messung angepasst werden.

Die folgenden seismischen Verfahren werden eingesetzt:

- Reflexionsseismik:  
Auswertung der an Untergrundstrukturen wie z.B. Schichtgrenzen, Störungssystemen oder größeren Hindernissen reflektierten Wellen. Es wird ein „spiegelbildliches“ Abbild des Untergrundes erstellt. Dazu wird die komplette Aussagekraft der Wellen (Laufzeit, Frequenz, Amplitude) genutzt, um die Untergrundverhältnisse abzubilden.
- Refraktionsseismik, CMP-Refraktionsseismik, Refraktionstomographie:  
Auswertung von „zurückgebrochenen“ Wellen. Bei der Auswertung werden die Ersteinsatzzeiten der refraktierten Wellen ermittelt aus denen mit Hilfe von Inversionstechniken die Schichtstruktur des Untergrundes ermittelt werden kann. Dies erfolgt über die Angabe der Geschwindigkeitsverteilung für seismische Wellen innerhalb des Untergrundes. Während die Standard-Refraktionsseismik die Struktur des Untergrundes anhand von Verteilungen der Wellengeschwindigkeit innerhalb unterschiedlicher Schichten wiedergibt, verwendet man bei der CMP Refraktionsseismik die Aussagekraft der kompletten Wellenform ähnlich wie in der Reflexionsseismik. Mit Hilfe der Refraktionstomographie wird die Geschwindigkeitsverteilung der seismischen Wellen im Untergrund kontinuierlich berechnet und tomographisch dargestellt.
- Seismische Tomographie:  
Auswertung der Einsatzzeiten seismischer Wellen, die das Untersuchungsobjekt auf direktem Wege durchlaufen haben. Die seismische Tomographie wird i.a. zwischen zwei Bohrungen durchgeführt wobei eine Bohrung als Quellbohrung und die andere für die Empfänger verwendet wird. Als Ergebnis wird die Geschwindigkeitsverteilung seismischer Wellen in der Ebene zwischen Empfänger- und Quellbohrung dargestellt.
- VSP, seismische Messungen aus Bohrungen:  
Beim vertikalen seismischen Profil (VSP) befinden sich die Anregungspunkte an der Erdoberfläche entlang einer Linie, wohingegen die Signale in einer Bohrung registriert werden. Mit dieser Methode ist eine Identifizierung der Primärreflexionen sowie der multiplen Reflexionen einschließlich der Klärung der lithologischen Verknüpfungen möglich. Ferner können die Verhältnisse unterhalb der Endteufe der Bohrung genauer erkundet werden, als dies von der Erdoberfläche aus möglich ist. VSP-Messungen unterstützen die Auswertung der Reflexionsseismik.
- Oberflächenwellenseismik:  
Bei der Anregung seismischer Energie an der Erdoberfläche entstehen neben Raumwellen (akustische Wellen und Scherwellen) auch amplitudenstarke Oberflächenwellen, deren Energie prinzipiell an die Erdoberfläche gebunden ist. Die wichtigste Eigenschaft der Oberflächenwellen ist die Dispersion, d.h. die Abhängigkeit der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von der Frequenz der Schwingungen. Oberflächenwellen besitzen vergleichsweise geringe

Wellenlängen, wodurch sich gute Chancen für eine hohe laterale Auflösung oberflächennaher Strukturen (bis ca. 10 m Tiefe) ergeben. Hierzu zählen z.B. die Lokalisierung und laterale Abgrenzung von Altlastenflächen, das Auffinden oberflächennaher Anomalien (z.B. Hohlräume, Findlinge, etc.). Bei der Oberflächenwellenseismik wird neben der Geschwindigkeit auch die Streuamplitude der Oberflächenwellen genutzt und dargestellt, wodurch oberflächennahe Störungen lagegenau erkundet werden können.

Tabelle 1-3.1: Geophysikalische Oberflächen-Messverfahren bei der Erkundung von Deponien und Altlasten

Messverfahren	Einsatzorte		Untersuchungsziele
	Geländeoberfläche	Bohrloch	
Seismik			
Reflexionsseismik	X	X	Materialwechsel, Schichtgrenzen, Auflockerungen, Hohlräume, Störungen, Einbauten
Refraktionsseismik, Refraktionstomographie	X	X X	
Seismische Tomographie			
Vertikale seismische Profilmessungen (VSP) im Bohrloch	X		
Oberflächenwellenseismik			
Magnetik			Eisenhaltige Bestandteile
Totalfeldmessung	X	X	
Gradientenmessung	X	X	
Geoelektrik			Materialwechsel Schichtgrenzen, Grundwasserspiegel, Hohlräume, Metalle, Leitungen, Verunreinigungen
Geoelektrische Sondierung	X	X	
Geoelektrische Tomographie	X	X	
Elektromagnetik			Materialwechsel, Schichtgrenzen, Grundwasserspiegel, Hohlräume, Metalle, Leitungen, Verunreinigungen
Elektromagnetische Induktion	X	X	
Transientenelektromagnetik	X	X	
Magnetotellurik	X	X	
Gravimetrie / Micro-Gravimetrie			Materialwechsel, Dichteänderungen, Hohlräume
Regionalfeldmessungen	X		
Lokalfeldmessungen	X		
Bodenradar			Materialwechsel, Schichtgrenzen, Einlagerungen, Hindernisse, Leitungen
Elektromagnetische Reflexionsmessung	X	X	

### **3.2 Magnetik**

Bei der geophysikalischen Erkundung durch Magnetik wird das Magnetfeld der Erde am Ort der Datenaufzeichnung vermessen. Die Magnetisierung der Gesteine oder anderer Materialien im Untergrund beeinflussen lokal das Magnetfeld. In der Ingenieurgeophysik geht es weniger um die Erkundung von natürlichen Gesteinen als um die Magnetisierung künstlich hergestellter Körper wie etwa Träger, Rohrleitungen, Schrott, Fässer, Stahlbetonfundamente usw., die wegen ihres Eisenanteils durch die Magnetik besonders gut detektiert werden können. Indirekt können auch bergbaubedingte Hohlräume wie Bergwerksstollen und -schächte nachgewiesen werden, da sehr oft Schienen, Eisenträger oder Rohrleitungen in ihnen belassen wurden. In der Archäomagnetik genügen kleinste Veränderungen des Magnetfeldes zum Nachweis von Mauern, Straßen, Feuerstellen und mehr. Als Ergebnis liefert die Magnetik eine flächenhafte Darstellung des Erdmagnetfeldes im Untersuchungsgebiet. Bereiche mit erhöhtem Metallgehalt bilden sich als Erhöhung der Feldstärke ab.

### **3.3 Geoelektrik**

Bei der Geoelektrik werden im einfachsten Fall zwei spießförmige Sonden bzw. Elektrodenpaare in genau definierter Konfiguration in den Boden gesteckt oder ggf. eingegraben. Während über die Elektroden ein Strom eingespeist wird, messen die beiden Sonden die elektrische Spannung. Aus Strom und Spannung lässt sich der scheinbare elektrische Widerstand des Untergrundes berechnen. Über den Abstand der Elektroden wird die Erkundungstiefe festgelegt. Bei der s.g. geoelektrischen Tiefensondierung oder Widerstandssondierung wird für einen festen Punkt auf dem Messprofil sukzessive der Elektrodenabstand erweitert und demzufolge die Erkundungstiefe schrittweise vergrößert. Hierbei werden der Widerstand und die Mächtigkeit horizontal liegender Schichten in vertikaler Richtung ermittelt. Bei der geoelektrischen Profilierung oder Kartierung wird die Messfläche mit einem konstanten Elektrodenabstand untersucht. Hierbei wird die horizontale Widerstandsverteilung in bestimmten Tiefenniveaus ermittelt. Die Ergebnisse können als Pseudosektion (scheinbare spezifische Widerstände) oder als geoelektrische Tomographie mit wahren spezifischen Widerständen dargestellt werden.

### **3.4 Elektromagnetik**

Ein elektromagnetisches Wechselfeld wird von einer Primärspule abgestrahlt und dringt in den Untergrund ein. Dort werden an elektrisch leitenden Körpern, Schichten oder Strukturen Spannungen induziert, die elektrischen Wirbelströme zur Folge haben. Die elektromagnetischen Felder dieser Ströme - Sekundärfelder genannt – werden von der Sekundärspule des Messgerätes empfangen. Das Gerät misst die Intensität des Sekundärfeldes relativ zum Primärfeld sowie die Phasenverschiebung zwischen Primär- und Sekundärfeld. Aus diesen Messwerten werden die elektromagnetischen Parameter des Untergrundes abgeleitet.

### 3.5 Gravimetrie

Bei der Gravimetrie werden die Veränderungen des Schwerfeldes der Erde auf Grund von Dichteinhomogenitäten im Untergrund befindlicher Strukturen gemessen. Zur Erfassung von Dichteanomalien müssen von den registrierten relativen Schwerewerten bekannte orts- und zeitabhängige Referenzwerte subtrahiert werden, z.B. Gezeitenwirkung, Höhe des Messpunktes zum Bezugsniveau (Freiluftkorrektur), Geländere relief in der Umgebung (topographische Korrektur), Gesteinsschicht zwischen Mess- und Bezugsniveau (Bouguerkorrektur), sowie bekannte geologische Strukturen. Die Messungen werden mit hochempfindlichen Federwaagen ausgeführt. Die Änderungen der Federlängen stehen im direkten Zusammenhang mit Schwereänderungen.

### 3.6 Bodenradar

Das Bodenradar ist meist auch als EMR (Elektro Magnetic Reflexion), GPR (Ground Penetrating Radar) oder RES (Radio Echo Sounding) bekannt. Elektromagnetische Impulse von kurzer Dauer (einige ns, MHz Bereich) werden über eine nahe an der Erdoberfläche befindliche Antenne in den Untergrund abgegeben. Diese gesendeten elektromagnetischen Wellen werden an den Grenzen unterschiedlicher Materialien reflektiert und refraktiert. Frequenzabhängig können an Störkörpern Beugung oder Streuung der Signale auftreten. Gemessen werden an der Empfangsantenne die Amplituden und die Laufzeit über den Weg des Signals von der Sendeantenne zur Empfangsantenne. Es können eine oder mehrere Antennen gleichzeitig zum Einsatz kommen (Antennenkonfiguration). Gemessen wird die materialabhängige dimensionslose Dielektrizitätszahl, welche meistens im Bereich  $\epsilon_r = 1$  bis 100 liegt. Materialabhängig sind auch das Auflösungsvermögen und die Eindringtiefe. Je höher die Leitfähigkeit eines Materials ist, desto mehr wird die Signalamplitude gedämpft. Diese Dämpfung ist frequenzabhängig.

### 3.7 Bohrlochgeophysik

In Bohrungen können generell auch alle Verfahren, die an der Erdoberfläche zum Einsatz kommen, verwendet werden. Die Messsonden werden als s.g. Logs in Bohrungen eingesetzt. Bohrlochgeophysikalische Messungen dienen zur

- Bestimmung von technischen Parametern (Verrohrung, Zementation, Filter, etc.);
- Bestimmung von geometrischen Parametern (Kaliber, Neigung, Azimut, Anordnung von Klüften, Störungen, etc.);
- Ermittlung von physikalischen Parametern (Dichte, spezifischer elektrischer Widerstand, Geschwindigkeit elastischer Wellen, Dielektrizitätszahl);
- Abtastung der Bohrlochwand mit Ultraschall (Televiewer)
- Festlegung von Störungen, Klüften, etc. und in Kombination mit einem Kernscanner zur Orientierung von Bohrlochkernen.

Einen Überblick über die wichtigsten geophysikalischen Bohrlochmessverfahren gibt die Tabelle 1-3.2. Aus der Kombination der verschiedenen Bohrlochverfahren kann die Lithologie bestimmt werden. Mit Hilfe der Ergebnisse von Bohrlochmessungen lassen sich die Ergebnisse der Verfahren, die an der Erdoberfläche eingesetzt werden für eine Extrapolation der punktuellen Bohrlochinformation entlang der Profile nutzen.

Tabelle 1-3.2: Geophysikalische Bohrloch-Messverfahren bei der Erkundung von Deponien und Altlasten

Verfahren	Prinzip	Verwendung / Zweck
Gamma-Log	Messung der Intensität der natürlichen Gamma-Strahlung, vornehmlich K40	Bestimmung Lithologie und Tongehalt
Gamma-Gamma-Log, Neutron-Log	Aussendung von Gamma-Strahlung und Messung der rückgestreuten Strahlung	Dichte bzw. Wassergehalt, Ansprache der Lithologie
Eigenpotential-Log	Messung des natürlichen elektrischen Potentials zwischen Bohrlochsonde und Geländeoberfläche	Hinweis auf Lithologieänderung und Wasserdurchlässigkeit
Induktions-Log	Bestimmung der Leitfähigkeit mit Wechselstromverfahren	Schichtgrenzen, Porosität, Porenfüllung und Permeabilität
Temperatur-Log	Temperaturmessung	Hinweis auf Grundwasserströmung, Klüfte
Kaliber-Log	Mechanisches Abtasten der Bohrlochweite	Hinweise auf lithologische und strukturelle Änderungen
Widerstands-Log, Latero-Log, Microlatero-Log, Dipmeter	Gleichstrom- und Spannungsmessung bei unterschiedlichen Elektroden-/Sondenanordnungen	Schichtansprache, Porositäts-Bestimmung, Dipmeter: Raumlage von Schichtgrenzen im Bohrloch
Flowmeter	Drehzahl eines Flügelrades oder Heat-Pulse Messung	Zu- und Abflusszonen
Salinitäts-Leitfähigkeitsmessung	Widerstand der Bohrlochflüssigkeit durch Messung der Leitfähigkeit	Zu- und Abflusszonen
Fernsehsonde	Fernsehkamera im Bohrloch	Beschaffenheit der Bohrlochwand
Televiwer (Akustisches Bohrlochfernsehen)	Akustische Abtastung der Bohrlochwand	Beschaffenheit der Bohrlochwand, Bohrlochgeometrie, genaues Kaliber, Kluftsysteme und Festigkeit
Akustik/Sonic-Log	Erzeugung und Empfang seismischer Wellen	Schichtgrenzen, Schichtansprache, Geschwindigkeitsanisotropie, Porositätsbestimmung, $V_p$ , $V_s$ und abgeleitete Größen

**Literatur zu E 1-3:**

- [1] KNÖDEL, KRUMMEL, LANGE, 1997: Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, 7 Bde., Bd.3, Geophysik. Springer Verlag

**Regelwerke:**

DIN 4020: 2003-10 Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke und Beiblatt.