

## 111 Geophysikalische Untersuchungen

Mit geophysikalischen Untersuchungen ist es, basierend auf den stofflichen Eigenschaften und physikalischen Vorgängen des Erdkörpers möglich, Aussagen über seinen strukturellen Aufbau und den Stoffbestand zu treffen. Im Umweltbereich erfolgt der Einsatz geophysikalischer Messverfahren speziell zur Auffindung von Anomalien in geringen Tiefen. Es können Schadstoffherde von Altlasten, Auffüllungen / Deponien, Erdtanks, Leitungen, Fundamente, Hohlräume, Fässer, Bomben usw. im Untergrund erfasst werden, wenn die physikalisch-stofflichen Eigenschaften von denen des umgebenden Materials abweichen. Möglich ist auch die Erkundung der Schadstoffausbreitung, z.B. im Umfeld von Deponien. Der Vorteil besteht in der zerstörungsfreien Untersuchungsmethodik, so dass abdichtende Schichten nicht zerstört werden. Die Ergebnisse der geophysikalischen Messungen enthalten meist relative Aussagen, die anhand mittels Bohrungsinformationen (z.B. Schichtenverzeichnisse, Grundwasserstand) kalibriert werden müssen.

Geophysikalische Untersuchungen bestehen grundsätzlich aus drei Schritten:

- Gewinnung von physikalischen Messdaten
- Kalibrierung und Auswertung der Daten
- geologische, hydrogeologische bzw. geotechnische Darstellung und Interpretation

### 111.1 Seismik

Die Seismik beruht auf der Ausbreitung und Erfassung von Wellen im Untergrund. Es gelten die Ausbreitungsgesetze von elastischen Wellen. Die Signale werden durch Impulsquellen (Hammerschlag, Fallgewicht oder seltener kleine Sprengladungen) erzeugt und mit Schwingungsaufnehmern registriert. Die Signale breiten sich mit materialspezifischen Wellengeschwindigkeiten aus. Sie werden an seismisch wirksamen Grenzflächen refraktiert und reflektiert. Dabei treten Oberflächen- und Raumwellen auf. Ausgewertet werden die Laufzeiten der Raumwellen in Form der Kompressions- und Scherwellen.

Die Seismik dient der Bestimmung der Festgesteinstiefe, Gesteinswechsel und Verwitterungszonen, der Erkundung von Störungen, Dolinen und Erdfällen, der Ermittlung der Bodentragfähigkeit usw. Mit Mikroseismik können auch Bauwerks- und Bauteilprüfungen durchgeführt werden.

#### 111.1.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche/technische Grundlagen)

Signalerzeugung: Impulshammer für geringe Aufschlusstiefen, beschleunigte Fallgewichte, Kleinsprengungen, spezielle Signalquellen für Bohrlöcher (Sparker, Airgun, Scherwellenhammer)

Signalregistrierung: mit mehreren Empfängern und digitaler Seismikapparatur. Die Signalregistrierung wird durch die Signalquelle gestartet.

Auswertung: mit spezieller Auswertesoftware (editieren, filtern, analysieren, auswerten, modellieren)

Ergebnisse: Das wesentliche Ergebnis von seismischen Untersuchungen sind i.d.R. Schichtgrenzen im Untergrund. Sie werden üblicherweise als Tiefenschnitte dargestellt. Die zur Schichtung gehörenden unterschiedlichen elastischen Eigenschaften werden in Form von Wellengeschwindigkeiten angegeben. Teilweise können die elastischen Eigenschaften eigentliches Ziel (Bodentragfähigkeit usw.) der seismischen Untersuchungen sein. In diesem Falle werden sie meist in Form von Moduln (Schermodul, Elastizitätsmodul, Kompressionsmodul, Poissonverhältnis) dokumentiert.

Vorhandene Bohrerergebnisse können zur Vorplanung der Seismik, als Auswertehilfe und zur Kalibrierung / Kontrolle einbezogen werden. Umgekehrt liefern vorab linienhaft durchgeführte seismische Untersuchungen Ansatzpunkte für Bohrungen.

**Refraktionsseismik:** Es werden die Einsatzzeiten der direkten und refraktierten Welle betrachtet, um daraus die Tiefenlage des sog. Refraktors (Schichtgrenze) zu bestimmen. Das Auftreten von Refraktoren ist an die Zunahme der seismischen Impedanz (Wellengeschwindigkeit mal Dichte) mit der Tiefe gebunden. Innerhalb der Ingenieurgeophysik ist die Refraktionsseismik das am meisten angewandte seismische Verfahren und wird häufig zur Bestimmung der Festgesteinstiefe bzw. Deckschichtmächtigkeit eingesetzt. Auch lassen sich die elastischen Bodenkennwerte i.A. einfach bestimmen.

**Reflexionsseismik:** Es wird die Laufzeit der reflektierten Welle mit dem Ziel der Lagebestimmung des Reflektors (Schichtgrenze) betrachtet. Reflektoren sind an Diskontinuitäten der elastischen Eigenschaften bzw. seismischen Impedanz gebunden. Die Reflexionsseismik besitzt aufgrund der großen Wellenlänge im nahen Untergrundbereich eine „blinde“ Zone und wird deshalb erst ab einer größeren Zieltiefe ab einigen 10er Metern eingesetzt. Typische Ziele sind Bodenschichtungen und Störungszonen. Der Aufwand für die Reflexionsseismik ist sowohl bei der Messung als auch bei der Auswertung höher als für die Refraktionsseismik.

**Transmissionseismik:** Es wird die Laufzeit einer Welle durch einen Untergrundabschnitt mit dem Ziel ermittelt, die elastischen Bodeneigenschaften (Wellengeschwindigkeiten und Moduln) zu bestimmen. Einige Varianten der Sender-Empfänger-Anordnung: von Bohrloch zu Bohrloch (Crosshole), von der Oberfläche zum Bohrloch (Downhole), vom Bohrloch zur Oberfläche (Uphole).

Die Transmissionseismik ist apparativ und auswertetechnisch i.A. zwar weniger aufwendig als die Reflexions- und Refraktionsseismik, bedarf aber Bohrungen zur Signalerzeugung und/oder -registrierung. Untersuchungsziele sind weniger die Schichtgrenzen als vielmehr Materialeigenschaften (dynamische Bodenkennwerte).

**Mikroseismik:** Die Mikroseismik ist die Anwendung seismischer Verfahren im kleinen Maßstab meist an Gebäuden oder Bauteilen. Kennzeichnend ist die Frequenz bzw. die Wellenlänge der mikroseismischen Signale. Sie liegt zwischen den tieffrequenten Signalen der normalen Seismik und den hochfrequenten Signalen des Ultraschalls. Damit verbunden sind eine spezielle Anregung des Signals meist mit Impulshämmern sowie die Verwendung von geeigneten Aufzeichnungsapparaturen. Eingesetzt wird die Mikroseismik in Form der Transmissionseismik, um die materialcharakteristischen Wellengeschwindigkeiten zu bestimmen. Andere Anwendungen betreffen die Strukturerkundung, wobei hier die Wellenlaufzeiten analysiert werden (z.B. Risstiefenabschätzung). Im Vergleich zum Ultraschall besitzt die Mikroseismik eine wesentlich größere Reichweite, weswegen z.B. auch Mauerwerksuntersuchungen möglich sind. In der Reflexionsanordnung kann die Mikroseismik zur Bestimmung von Bauteildicken herangezogen werden, in dem das Signalspektrum der sich bildenden stehenden Wellen untersucht wird.

### 111.1.2 Kostenermittlung

Die Kosten hängen v.a. von folgenden Randbedingungen ab:

- Erkundungsumfang/Messfläche/Messtiefe
- Hindernisse bei der Messung (Auslegung der Geophone)
- Messraster/-dichte
- erwarteter Umfang der Dokumentation, des Berichts
- Aufwand bei der Auswertung/Dateninterpretation

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 111).

### 111.1.3 Literatur

Kathage, Andreas, (2011), Der gläserne Untergrund: So nutzt der Bauingenieur die Geophysik. Verlag Vulkan

Kertz, Walter, (1992), Einführung in die Geophysik 1 (Band 1 Erdkörper) von B.I. Wissenschaftsverlag

Knödel, K., Krummel, H., Lange, G., (2005), Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten: Band 3: Geophysik. Springer

Militzer, H.; Weber, F. (1985), Angewandte Geophysik, Band 2, Springer

Vogelsang, Dieter, (1991), Geophysik an Altlasten: Leitfaden für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Juristen, Springer

### 111.1.4 Information über Leistungsanbieter

BDG - Berufsverband Deutscher Geowissenschaftler e.V., Lessenicher Straße 1, 53123 Bonn

Deutsche Geophysikalische Gesellschaft e.V., Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches Geoforschungszentrum, Telegrafenberg E 453, 14473 Potsdam

## 111.2 Geomagnetik

Geomagnetische Messungen dienen der Erfassung des Erdmagnetfeldes bzw. dessen Anomalien. Das Magnetfeld der Erde ist ein Vektorfeld und entspricht vereinfacht dem eines Stabmagneten im Zentrum der Erde.

Das Gesamtfeld der Erde setzt sich aus folgenden vektoriellen Anteilen zusammen:

Hauptfeld: Es ist der vorherrschende Feldanteil mit einer relativ geringen, aber langzeitlichen Änderung. Sein Ursprung liegt im Erdinnern.

Außenfeld: Es erreicht nur einen Bruchteil der Hauptfeldintensität, ändert sich aber zeitl. relativ rasch. Die Ursache liegt außerhalb der festen Erde.

Anomalienfeld: Es ist meist viel kleiner als das Hauptfeld und zeitlich nahezu konstant. Der Ursprung liegt in der oberen Erdkruste.

Für die Belange der Ingenieurgeophysik ist das Anomalienfeld von Interesse. Magnetfeldanomalien sind örtliche Abweichungen vom Haupt- und Außenfeld. Ihre natürlichen Ursachen liegen in Magnetisierungskontrasten der Gesteine und insbesondere ihrem Gehalt an ferromagnetischen Mineralen. Künstliche Ursachen sind v.a. verborgene Eisenobjekte oder auch Bauobjekte, welche einen Magnetisierungskontrast bewirken. Befinden sich aber an der Oberfläche Metallgegenstände (Betonbewehrung o.a.) oder Hochspannungsleitungen, werden diese Kontraste deutlich verringert oder gar unsichtbar.

Untersuchungsziel bei Altlasten im Untergrund ist die Ortung von Fässern, Tanks, Munition, eisenhaltigen Leitungen, unterirdischer Bauten.

### 111.2.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche / technische Grundlagen)

Gemessen wird entweder der Betrag bzw. eine Komponente der magnetischen Flussdichte oder deren Gradient (meist Vertikalgradient). Dies geschieht entweder entlang von Profillinien als Profilierung oder flächendeckend mit einem bestimmten Messraster als Kartierung. Enge Messraster für Detailuntersuchungen liegen bei etwa 1 m, wogegen bei Übersichtsuntersuchungen die Messpunktabstände 5 m und teilweise mehr betragen können. Daneben wird an festen Basisstationen der zeitliche Verlauf des Magnetfeldes (Außenfeld) registriert, um die Magnetfeldwerte vom zeitlichen Einfluss befreien zu können. Dies ist bei Gradientenmessungen nicht notwendig. Die Dichte des Messrasters richtet sich v.a. nach der "Rauhigkeit" der Anomalienform. Die Anomalienform und -stärke ist u.a. durch den Messabstand zur Anomalienursache bedingt. Die Messwertaufnahme in mehreren Abständen bzw. Messhöhen lässt sich günstig zur Massen- und Tiefenabschätzung ausnutzen. Die Messhöhen liegen i.a. zwischen 1,0 und 2,5 m über der Geländeoberkante (GOK).

Folgende Feldmessgeräte werden häufig eingesetzt:

**Protonen-Präzession-Magnetometer:** mit dem Protonen-Präzession-Magnetometer wird der Betrag der Totalintensität der magn. Flussdichte  $B$  in nT gemessen. Dieses Magnetometer muss nur grob orientiert werden. Der Messablauf ist schnell (i.a.  $< 5$  s/Messpunkt) und die Messgenauigkeit sehr hoch (i.a.  $< 1$  nT).

**Sättigungskern-Magnetometer:** mit dem Sättigungskern-Magnetometer (Fluxgate-Magnetometer) wird die Feldkomponente  $Z$  der magn. Flussdichte  $B$  in nT gemessen. Das Gerät muss genau entsprechend der Feldkomponente ausgerichtet werden, der Messzyklus verläuft sehr schnell (i.a.  $< 1$  s/Messpunkt) und die Genauigkeit ist hoch (i.a.  $< 20$  nT). Die Messgenauigkeit und -geschwindigkeit können je nach Anwendungszweck des Geräts sehr unterschiedlich sein.

Weitere seltenere Magnetometer sind: Cäsium-Magnetometer, Feldwaage, Absorptionszellen-Magnetometer, SQUID-Magnetometer.

Anwendungsbeispiele:

- Erkundung von Störungszonen bei kristallinem Untergrund
- Suche von Eisenobjekten (z.B. Leitungen, Tanks, Fässer, Bomben)
- Erkundung von Deponien (z.B. Berandung, Gliederung, Mächtigkeitsabschätzung)
- Nachweis von Pleistozän-Rinnen für hydrogeologische Zwecke
- Erkundung für archäologische Fragestellungen (z.B. Brennöfen, Ziegelbauten, Gräben)
- Vorlaufuntersuchung für den gezielten Einsatz weiterführender Erkundungen

Sehr wichtig bei der Geomagnetik ist die genaue Dokumentierung von störenden Eisenobjekten wie Maste, Fahrzeuge, Zäune usw. Diese haben starken Einfluss auf die Messwerte und müssen in jedem Fall bei der Auswertung berücksichtigt werden.

### 111.2.2 Kostenermittlung

Die Kosten hängen v.a. von folgenden Randbedingungen ab:

- Erkundungsumfang/Messfläche
- Hindernisse bei der Messung
- Messraster/-dichte
- Aufwand bei der Auswertung/Dateninterpretation

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 111).

#### weiterführende Leistungen

LB 111.3        Geoelektrik

LB 111.6        Bodenradar

### 111.2.3    Literatur

Militzer, H., Scheibe, R., (1981): Grundlagen der angewandten Geomagnetik. Leipzig, Dt. Verl. für Grundstoff-industrie

### 111.2.4    Information über Leistungsanbieter

BDG - Berufsverband Deutscher Geowissenschaftler e.V., Lessenicher Straße 1, 53123 Bonn

Deutsche Geophysikalische Gesellschaft e.V., Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches Geoforschungszentrum, Telegrafenberg E 453, 14473 Potsdam

## 111.3        Geoelektrik

Die Geoelektrik reicht von der einfachen Abschätzung bis hin zur quantitativen Ermittlung der strukturellen Untergrundsituation aufgrund der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes bzw. der Leitfähigkeit. Über Elektroden wird dem Boden ein Gleichstrom zugeführt, wodurch sich ein Potentialfeld ausbildet, welches durch den Untergrund beeinflusst wird. Aus der Messung des Potentialunterschiedes zwischen zwei Sonden können Angaben über die Verteilung spezifischer Widerstände und zugehöriger Strukturen im Untergrund abgeleitet werden. Die Elektroden-Sondenanordnung variiert bei den verschiedenen Verfahrensvarianten und ist der jeweiligen Zielstellung anzupassen.

Anwendung findet die Geoelektrik in der Geologie und Hydrogeologie zur Erkundung von Grundwasserleitern und -stauern, geol. Störungen und Verwerfungen, Lagerstätten, Erosionsrinnen, Verkarstungen und bei der Platzierung von Bohrungen. Bei der Untersuchung des Baugrunds und von Altlasten können geoelektrische Verfahren zur Abschätzung von Schichtmächtigkeiten, der Suche nach Hohlräumen und größeren Bauwerksresten, Deponiegrenzen und -gliederung, und der Ausbreitung von Schadstoffahnen angewendet werden. Außerdem kann die Geoelektrik zur archäologischen Vorerkundung und Feuchte-Salzverteilung in der Bauwerksdiagnostik eingesetzt werden.

### 111.3.1    Leistungsbeschreibung (rechtliche / technische Grundlagen)

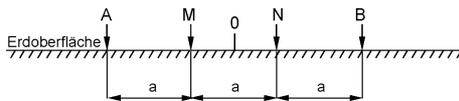
Mögliche Verfahrensvarianten sind:

- Widerstandskartierung/Profilierung: das Verfahren liefert flächenhafte oder linienhafte Aussagen in Form von integralen Werten
- Widerstandssondierung: das Verfahren liefert an einer Stelle Aussagen über den etwaigen vertikalen Schichtaufbau
- 2D-, 2,5D und 3D-Widerstandstomografie (= Widerstandssondierungskartierung): das Verfahren liefert entlang einer Linie Aussagen über den ungefähren Schichtaufbau

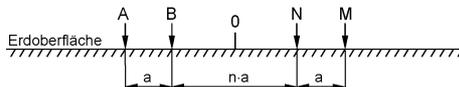
**Widerstandskartierung:** bei der Widerstandskartierung erfolgt die Messung, indem die Elektroden-Sonden-Anordnung im vorgesehenen Messraster von Messpunkt zu Messpunkt wandert und so flächig der scheinbare

spez. Widerstand erkundet wird. Die Messanordnung bleibt dabei gleich, so dass auch die Eindringtiefe in etwa gleich bleibt. Die Ergebnisse werden als Karte des scheinbaren spez. Widerstandes dargestellt. In vielen Fällen ist es sinnvoll, Kartierungen mit mehreren Eindringtiefen (durch Variation der Elektrodenabstände) vorzunehmen, um abschätzen zu können, aus welchen Tiefen die erkennbaren Widerstandsveränderungen stammen. Bei der Widerstandsprofilierung erfolgt die Untersuchung und Datendarstellung entlang von Messlinien.

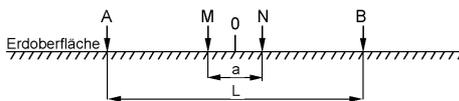
Überwiegend befinden sich die Elektroden bzw. Sonden in einer Linie, so dass die Widerstandsbestimmung stark richtungsabhängig ist. Es kann deshalb sinnvoll sein, mit mehreren Auslagerichtungen zu messen, um orientierte Strukturen besser erfassen zu können (z.B. Klüfte). Entsprechend der Aufgabenstellung können folgende Anordnungen verwendet werden: Wenner-Anordnung (für Kartierungen), Dipol-Dipol-Anordnung (höhere Auflösung bei kleineren Strukturen), Schlumberger-Anordnung (für Tiefensondierungen).



Wenner-Anordnung



Dipol- Dipol-Anordnung



Schlumberger-Anordnung

**Widerstandssondierung:** für die Widerstandssondierung werden häufig die Schlumberger- und teilweise die halbe Schlumbergeranordnung (Hummel) verwendet, da sie eine hohe Schichtauflösung besitzen. Bei ihnen haben die Sonden einen fixen, geringen Abstand. Der Elektrodenabstand wird variiert. Es können mehrere Auslagerichtungen für einen Sondierungspunkt gewählt werden. Bei einer Drehsondierung wird in mehreren Richtungen ausgelegt, z.B. 8 Auslagerichtungen im Vollkreis mit jeweils  $45^\circ$  Winkelabstand. Dies dient z.B. der Erkennung von Schichtneigungen.

### 2D-, 2,5D- und 3D-Widerstandstomografie

Um den Untergrund möglichst dreidimensional zu erfassen, können flächige Messungen von parallelen 2D-Messlinien ausgeführt werden. Bei ausreichend engem Messlinienabstand ist es möglich, rechnerisch die benachbarter Messlinien zu berücksichtigen. Das Inversionsresultat nennt man 2,5D-Widerstandstomografie. Neben den tomografischen Vertikal- können dann auch Horizontalschnitte für gewünschte Tiefenstufen berechnet werden. Eine weitergehende 3D-Tomografie beruht im Unterschied dazu auf der Inversion von 2 orthogonalen Messrichtungen.

### 111.3.2 Kostenermittlung

Die Kosten hängen v.a. von folgenden Randbedingungen ab:

- Profillänge
- Profilabstand
- Hindernisse bei der Messung
- Anzahl der Messpunkte pro Sondierung

- Mehrfachsondierungen zur Verbesserung der Genauigkeit
- erwarteter Umfang der Dokumentation

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 111).

weiterführende Leistungen:

LB 111.1      Seismik

LB 111.6      Bodenradar

### 111.3.3      Literatur

Militzer, H., Weber F., 1985, Geoelektrik-Geothermik-Radiometrie-Aerogeophysik: Wien, Springer, Akademie Berlin, p. 13-214.

Militzer, H., Schön, J., Stötzner, U., 1986, Angewandte Geophysik im Ingenieur- und Bergbau: Stuttgart, Enke, p. 35-62.

### 111.3.4      Information über Leistungsanbieter

BDG - Berufsverband Deutscher Geowissenschaftler e.V., Lessenicher Straße 1, 53123 Bonn

Deutsche Geophysikalische Gesellschaft e.V., Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches Geoforschungszentrum, Telegrafenberg E 453, 14473 Potsdam

## 111.4      Elektromagnetik

Elektromagnetische Verfahren werden zur Erkundung von Leitfähigkeitsstrukturen im Untergrund eingesetzt. Bei diesem Messverfahren handelt es sich um ein flächenhaftes, hochauflösendes Metallortungsverfahren bei dem mittels einer Sendespule elektromagnetische Wirbelströme im Boden induziert werden. Diese führen bei elektrisch leitenden Einlagerungen zur Erzeugung sekundärer elektromagnetischer Felder, die sich mit dem ursprünglichen Sendefeld überlagern. Mittels einer Empfangsspule wird das gesamte resultierende elektromagnetische Feld erfasst, das sich in Abhängigkeit von der Größe und Leitfähigkeit einer Einlagerung in der Intensität und Phasenlage unterscheidet. Durch eine Kanalisierung der Wirbelströme in gut leitfähigen Einlagerungen, wie z.B. Metallteilen, ist die Elektromagnetik für deren Nachweis in einer elektrisch schlecht leitenden Umgebung besonders geeignet. Bei Messpunktdichten bis zu 20 Messpunkte/m<sup>2</sup> gestattet dieses Verfahren eine präzise Ortung metallischer Objekte mit Genauigkeiten im Dezimeterbereich. Die Tiefenreichweite des Verfahrens beträgt bis zu 5m, die sich bei Oberflächenversiegelung etwas reduziert.

### 111.4.1      Leistungsbeschreibung (rechtliche / technische Grundlagen)

Das Messgerät mit den Spulen wird auf vorher bestimmten Profilen über die Messfläche bewegt. Je nach Messgerät können verschiedene Frequenzbereiche verwendet werden und somit unterschiedliche Eindringtiefen erreicht werden. Ein Datenlogger dient zur automatischen Messwertspeicherung. Bei metallischen Objekten im Untergrund erhält man, abhängig von ihrer Größe und Tiefenlage, entsprechend induzierte Spannungen. Das Ergebnis der Messungen ist eine flächenhafte Verteilung der gemessenen induzierten Spannungen, an Hand deren Höhe sich z.B. die Lage möglicher Metallgegenstände lokalisieren lässt. Hohe induzierte Spannungen sind somit ein Hinweis auf Metallgegenstände im Boden.

### 111.4.2 Kostenermittlung

Die Kosten hängen v.a. von folgenden Randbedingungen ab:

- Erkundungsumfang/Messfläche
- Hindernisse bei der Messung
- Messraster/-dichte
- Aufwand bei der Auswertung/Dateninterpretation

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 111).

weiterführende Leistungen:

LB 111.3        Geoelektrik

LB 111.6        Bodenradar

### 111.4.3 Literatur

Knödel, K., Krummel, H. & Lange, G. (2005): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band III: Geophysik. 2. Auflage, Springer, Berlin.

### 111.4.4 Information über Leistungsanbieter

BDG - Berufsverband Deutscher Geowissenschaftler e.V., Lessenicher Straße 1, 53123 Bonn

Deutsche Geophysikalische Gesellschaft e.V., Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches Geoforschungszentrum, Telegrafenberg E 453, 14473 Potsdam

### 111.5 Gravimetrie

In der Gravimetrie misst man mit hochempfindlichen Messgeräten die geringfügigen Schwerkraft-Änderungen, die von Dichteunterschieden im Untergrund hervorgerufen werden.

Durch Dichteunterschiede zeichnen sich z.B. folgende Gruppierungen aus: Lockergesteine und Festgesteine, saure und basische Kristallin-Gesteine, dichte und poröse Gesteine, wasserfreie und wasserführende Gesteine, sowie erzhaltige und erzfreie Gesteine. Empirisch wird eine grobe Korrelation zu den Geschwindigkeiten elastischer Wellen der Seismik festgestellt.

Mit geeigneten Rechenverfahren zur Modellierung lassen sich quantitative Aussagen über die Geometrie und die Dichtekontraste der Störkörper machen. Dies können z.B. magmatische Intrusiv-Körper, lithologische Grenzen, Sediment-Becken, Änderungen der Krusten-Dicke oder Inhomogenitäten andere Ursache innerhalb der Erdkruste oder des oberen Mantels sein. In der Umweltgeophysik wird die Gravimetrie zur Erkundung oberflächennaher Schichten eingesetzt.

Vorteil dieses Messverfahrens ist, dass Schweremessungen unbeschadet von Verkehr, Bebauung, Versorgungsleitungen, versiegelten Böden praktisch überall durchgeführt werden können. Das kommt insbesondere im Bereich der Umweltgeophysik zum Tragen, wo die Erkundung geologischer Strukturen in bebauten Arealen mit Geomagnetik, Geoelektrik, aber auch Seismik auf unüberwindbare Hindernisse stoßen kann.

### 111.5.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche/technische Grundlagen)

Bei diesem Verfahren werden oberirdisch wahrnehmbare lokale Änderungen des Schwerefeldes der Erde gemessen. Es erfolgt eine Bestimmung von Schwereänderungen zwischen Messpunkten, absolute Messwerte werden üblicherweise nicht benötigt. Durch die Messung der Dichteunterschiede können auch Hohlräume im Untergrund lokalisiert werden.

Da die Schwerebeschleunigung nicht nur von der lokalen Variation der Dichte abhängt, ist eine Nachbearbeitung der Daten unumgänglich, um andere Einflussfaktoren zu kompensieren. Dies sind Breitengrad, Höhe, Topographie und Gezeiten. Dazu muss die relative Höhenlage der Messpunkte bis auf wenige Millimeter genau bestimmt werden. Der kompensierte, relative Wert der Schwerebeschleunigung, benannt als Bouguer-Anomalie, wird als Ergebnis der Gravimetriemessung flächenhaft dargestellt. Mittels geeigneter Rechenverfahren zur Modellierung lassen sich quantitative Aussagen über Geometrie und Dichtekontraste wie z.B. lithologische Grenzen, Sedimentbecken, Änderungen der Deckschichtdicke oder Inhomogenitäten anderer Ursache (z.B. Hohlräume) ermitteln.

### 111.5.2 Kostenermittlung

Die Kosten hängen v.a. von folgenden Randbedingungen ab:

- Topografische Lage- und Höheneinmessung
- Modellierung der Schwereanomalien
- Erkundungsumfang/Messfläche
- Messraster/-dichte
- Aufwand bei der Auswertung/Dateninterpretation

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 111).

### 111.5.3 Literatur

Keary, P., Brooks B., Hill, I., (2003): An introduction to Geophysical Exploration, Blackwell Publishing

Mussett, A.E., Khan, M.A., (2000): Lookig into the Earth, Cambridge University Press

### 111.5.4 Information über Leistungsanbieter

BDG - Berufsverband Deutscher Geowissenschaftler e.V., Lessenicher Straße 1, 53123 Bonn

Deutsche Geophysikalische Gesellschaft e.V., Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoforschungsZentrum, Telegrafenberg E 453, 14473 Potsdam

## 111.6 Bodenradar

Beim Bodenradar, engl. Auch Ground Penetrating Radar (GPR) handelt es sich um ein elektromagnetisches Reflexionsverfahren (EMR), d.h. um ein hochauflösendes Verfahren zur Bestimmung von Strukturen oder zur Objektdetektion im Untergrund und im Bauwerk aufgrund der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Das Bodenradar nutzt sehr kurzwellige elektromagnetische Wellen zur Ortung und Abtastung von Objekten, die die Wellen reflektieren. Wie in der Seismik elastische Wellen werden beim Bodenradar elektromagnetische Wellen in Impulsform über Antennen in den Untergrund geschickt. Vom Sender breiten sie sich mit gesteinspezifischen

Geschwindigkeiten aus, werden an Diskontinuitäten reflektiert und werden von einer Empfänger-Antenne empfangen. Wie in der Seismik werden die Laufzeiten zwischen Sendung und Empfang gemessen; kennt man die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten, können Wegstrecken ermittelt werden.

In Luft breiten sich Radarwellen mit nahezu der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit aus. In Materie ist die Geschwindigkeit reduziert und wird dort von der relativen Dielektrizitätszahl bestimmt. Deshalb hat Wasser mit der extrem hohen Dielektrizitätszahl von 81 einen großen Einfluss bei der Ausbreitung von Radarwellen.

Starken Einschränkungen unterliegen Radarmessungen durch die Absorption im Untergrund, die von der elektrischen Leitfähigkeit abhängt. Sehr gut leitende Gesteine (Ton- und Mergelsteine; salzwasserführende Sande usw.) reduzieren die Eindringtiefe rasch auf wenige Dezimeter, und auch in Gesteinen mit höheren spezifischen Widerständen werden Untersuchungstiefen von 10 bis 20 m kaum überschritten. Ein anderer Einflussfaktor ist die Frequenz der Radarsignale (20 MHz bis 2 GHz): Niedrigere Frequenzen erlauben größere Eindringtiefe; einher damit geht dann eine Reduzierung des Auflösungsvermögens. Typische Anwendungen sind die Erkundung von unterirdischen Einbauten und Hohlräume, Auffüllungen, Leitungen und Bodenschichtverläufe.

### 111.6.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche / technische Grundlagen)

Zur Datenaufnahme wird eine Sender-Empfänger-Kombination entlang einer Messlinie mit möglichst geringem Abstand (1 bis einige cm) über die zu untersuchende Fläche gezogen. In sehr dichter Folge wird gesendet und empfangen, sodass die Messung entlang der Messlinie quasi als kontinuierlich bezeichnet werden kann (Messpunktabstand einige mm bis einige cm).

Registriert wird die Signalamplitude in Abhängigkeit der Zeit als sog. Signalspur. Die Amplitude sollte grauwert- oder farbcodiert dargestellt werden. Durch Aneinanderreihung der Signalspuren erhält man ein Diagramm, in dem die Entfernung entlang der Messlinie über der Laufzeit aufgetragen ist. In diesem sog. Radargramm - quasi ein Tiefenschnitt - zeigen sich die reflektierenden Strukturen als mehr oder weniger starke Signale.

Im Allgemeinen überwiegt bei Georadar die Betrachtung von nahezu vertikal ausgesandten und reflektierten Signalen, jedoch erlaubt eine räumliche Trennung von Sender und Empfänger die Aufzeichnung von in unterschiedlichen Winkeln reflektierten Signalen oder die Durchstrahlung des Untersuchungsobjektes.

### 111.6.2 Kostenermittlung

Die Kosten hängen v.a. von folgenden Randbedingungen ab:

- Erkundungsumfang/Messfläche
- Hindernisse bei der Messung
- Beschaffenheit der Messfläche
- Anzahl der Messprofile
- Messprofillänge
- erwarteter Umfang der Dokumentation, des Berichts
- Aufwand bei der Auswertung/Dateninterpretation

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 111).

weiterführende Leistungen:

LB 111.3      Geoelektrik

LB 111.6      Bodenradar

### 111.6.3 Literatur

- Leckebusch, J. (2001): Die Anwendung des Bodenradars (GPR) in der archäologischen Prospektion – 3D-Visualisierung und Interpretation. Leidorf, Rahden
- D.J. Daniels, D.J. (2004): Ground-penetrating radar. Inst. of Electrical Engineers, London
- C. S. Bristow, C.S. (2003): Ground penetrating radar in sediments. Geological Society, London
- Harry M. J. (2009): Ground Penetrating Radar – Theory and Applications. Elsevier, Amsterdam

### 111.6.4 Information über Leistungsanbieter

BDG - Berufsverband Deutscher Geowissenschaftler e.V., Lessenicher Straße 1, 53123 Bonn

Deutsche Geophysikalische Gesellschaft e.V., Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches Geoforschungszentrum, Telegrafenberg E 453, 14473 Potsdam

## 111.7 Bohrlochgeophysik

Bohrlochgeophysik bezeichnet die Anwendung geophysikalischer Messverfahren in Bohrungen. Bohrlochgeophysikalische Messungen ermöglichen eine nahezu kontinuierliche Ermittlung verschiedener physikalischer, chemischer und hydraulischer Parameter innerhalb und in der direkten Umgebung des Bohrloches. Aus den in Abhängigkeit von der Messtiefe im Bohrloch gewonnenen Daten, den sog. Logs, lassen sich je nach Art und Umfang des Messprogrammes eine Fülle von geologischen, petrophysikalischen und hydrogeologischen Informationen zu den durchteuften Schichten ableiten.

Geophysikalische Messungen in Bohrlöchern tragen zur Lösung folgender Aufgaben bei:

1. Dokumentation des Bohrprofils auf der Basis physikalischer Messgrößen,
2. Korrelation von Schichtprofilen, Leithorizonten,
3. Quantitative Bestimmung von Parametern (Porosität, Sättigung, hydrogeologische und geotechnische Parameter),
4. Ableitung von Aussagen zur stofflichen bzw. mineralogischen Zusammensetzung,
5. Bestimmung von kleinräumigen Strukturelementen, Schichtmerkmalen, Klüften usw.,
6. Quantitative Bestimmung von Parametern des Bohrlochfluids,
7. Dokumentation und Überwachung des technischen Zustandes von Bohrungen,
8. Kontrolle und Monitoring von Abbau- bzw. Förderprozessen,
9. Unterstützung oberflächengeophysikalischer Untersuchungen.

### 111.7.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche / technische Grundlagen)

Geophysikalische Bohrlochuntersuchungen werden als kontinuierliches Log gefahren. Dazu wird die Sonde mittels Seilwinde mit konstanter Geschwindigkeit innerhalb des Bohrlochs oder der Messstelle abgefahren. Der Messwert wird zusammen mit der Tiefenlage der Sonde kontinuierlich registriert. Die Abfahrtsgeschwindigkeit der Sonde sowie die Reihenfolge der eingesetzten Sonden sind ebenfalls zu registrieren. Meist geschieht dies durch automatische Aufzeichnung von Datum und Uhrzeit. In den wenigsten Fällen ist auch eine Messung während der Auffahrt der Sonde sinnvoll.

Mögliche Verfahren sind im Folgenden aufgelistet:

- Elektrische und elektromagnetische Verfahren wie Widerstandsmessung mit Potenzialsonde, Gradientensonde, Mikrolog, Fokussierende Widerstandsmessung, Eigenpotentialmessung, Induktive Messung.  
Aussage über: Lithologie, Porosität, Sättigung, Klüfte
- Kernphysikalische Verfahren wie Gammalog, Spektrales Gammalog, Gamma-Gamma-Log, Neutron-Neutron-Messung, Neutron-Gamma-Messung, Neutron-Gamma-Spektroskopie, Neutron-Aktivierung  
Aussage über: Detektion zwischen Ton- und Sandschichten (Lithologie), Dichte, Porosität, Hinterfüllmaterial bei verrohrten Ausbauten
- Akustische Verfahren wie Akustiklog, Cement-Bond-Log  
Aussage über: Gesteinsporosität, Schichtgrenzen und deren Einfallen, Defekte in Ausbauverrohrung
- Messung von Eigenschaften des Bohrlochfluids wie Temperaturlog, el. Leitfähigkeitslog, Druckmessung, Milieuparameter, Trübungslog, Salinitätslog, Flowmeter, Sauerstoffgehalt  
Aussage über: Zu- und Abströmbereiche, natürliche Vertikalströmungen, physikalische und chemische Eigenschaften
- Verfahren zur Bestimmung geometrischer Größen wie Kaliberlog und Bohrlochabweichungsmessung  
Aussage über: Bohrlochgeometrie, Porosität, Klüfte
- Optisches Verfahren mit Bohrlochkamera  
Aussage über: Ausbaukontrolle und Zustandskontrolle von Grundwassergütemessstellen
- Magnetische Messungen wie Magnetische Flussdichte und Suszeptibilität  
Aussage über: Schichtgrenzen, Aufspüren von mit magnetisierbaren Stoffen dotierten Ringraummaterialien wie Quillon / Compactonit o.ä.

### 111.7.2 Kostenermittlung

Die Kosten hängen v.a. von folgenden Randbedingungen ab:

- Anfahrmöglichkeit, Zugänglichkeit
- Bohrlochtiefe
- Hindernisse bei der Messung wie Bohrlochausbrüche, Messstellendeformation oder -bruch, falsch dokumentierter Ausbaudurchmesser

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 111).

### 111.7.3 Literatur

Bisch, G., Grimm-Strele, J., Barczewski, B, (Januar 1993), Überprüfung der Eignung von Grundwasserbeschaffenheitsmessstellen. Wasserwirtschaft 83, Heft 1

DVGW-Arbeitsblatt W 110 (2005), Geophysikalische Untersuchungen in Bohrungen, Brunnen und Grundwassermessstellen – Zusammenstellung von Methoden und Anwendungen.- wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn

DVGW-Arbeitsblatt W 121 (2002), Bau und Ausbau von Grundwassermessstellen. - wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn

Fricke, S., Schön, J. (1999): Praktische Bohrlochgeophysik, ENKE im Georg Thieme Verlag, Stuttgart.

#### 111.7.4 Information über Leistungsanbieter

BDG - Berufsverband Deutscher Geowissenschaftler e.V., Lessenicher Straße 1, 53123 Bonn

Deutsche Geophysikalische Gesellschaft e.V., Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches Geoforschungszentrum, Telegrafenberg E 453, 14473 Potsdam