Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 84 (1992)

Heft: 5-6

Artikel: Georadar zur Kartierung der obersten 10 bis 20 Meter des Untergrundes

Autor: Meier, Edi / Huggenberger, Peter

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940559

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 03.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Georadar zur Kartierung
der obersten 10 bis 20 Meter des Untergrundes

Edi Meier und Peter Huggenberger

Einleitung

Georadar kann als elektrisches Pendant zur Reflexionsseismik bezeichnet werden. Statt elastischer Wellen werden hochfrequente elektromagnetische Wellen im 80- bis 1000-MHz-Bereich verwendet. Die Radarwellen durchlaufen die verschiedenen Bodenschichten, je nach deren elektromagnetischen Eigenschaften, mit unterschiedlicher Geschwindigkeit und werden bei den Schichtgrenzen teilweise reflektiert. Die Zeitdifferenz zwischen Sendeimpuls und dem Eintreffen der reflektierten Welle beim Empfänger ist ein Mass für die Tiefe der reflektierenden Schicht.
Wegen des hohen Auflösungsvermögens und der leicht zu handhabenden Apparatur wird das Georadar in Zukunft zur Beantwortung von Fragen im Zusammenhang mit Baugrund, Verschmutzung von Böden und Grundwasser stark an Bedeutung gewinnen.
Anhand von Messungen in Lockergesteinen, für ein Projekt der EAWAG-ETH, werden neben einigen theoretischen vor allem die praktischen Aspekte beim Einsatz von Georadar beschrieben.

Apparatur

Die Apparatur besteht aus Sende- und Empfangsantenne (Sender und Empfänger) und der Kontrolleinheit zur Aufbereitung der Signale. Sender und Empfänger sind mobil, je nach Einsatz nebeneinander auf einem Schlitten oder Anhängewagen untergebracht und über Kabel mit der am Messort meist stationären Kontrolleinheit verbunden (Bild 1). Der Bildschirm der Kontrolleinheit zeigt die Empfangssignale. Auf dem Bedienungsfeld der Kontrolleinheit werden die Signale den örtlichen Bedingungen entsprechend eingestellt. Alle Messungen werden in ein Bild umgewandelt und als Feldausdruck aufgezeichnet. Die Messresultate können zudem auf Magnetband gespeichert werden.
Im Feldausdruck (Bild 2) werden die Laufzeiten (y-Achse) in Abhängigkeit der Messposition (x-Achse) aufgezeichnet. Falls die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Impulse nicht stark ändert, lassen sich schon an Ort und Stelle aus dem Feldausdruck erste Rückschlüsse auf den strukturellen Aufbau des Untergrundes ziehen.

Auflösungsvermögen und Eindringtiefe

Das Auflösungsvermögen, das heisst die Grössenordnung der kleinsten noch erkennbaren Strukturen, hängt von der Fortpflanzungsgeschwindigkeit und der Frequenz der elektromagnetischen Wellen ab und entspricht etwa einer halben Wellenlänge. Höhere Frequenzen und kleine Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Radarwellen bedeuten eine bessere Auflösung. Mit einer Frequenz von 250 MHz lässt sich eine Auflösung von Bodenstrukturen im Dezimeterbereich, mit einer Frequenz von 1000 MHz im Zentimeterbereich erzielen.
Die Eindringtiefe kann im voraus nicht generell angegeben werden. Sie hängt von der Sendefrequenz, der Dämpfung der Radarwellen und von deren Reflexionsstärke oder dem Geschwindigkeitskontrast zwischen zwei Bodenschichten ab. Zwar gibt es in der Radar-Literatur Tabellen über die Eindringtiefe und Fortpflanzungsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Materialien *(Davis & Annan,* 1989). Zweckmässiger ist es jedoch, die Eindringtiefe durch Auswertung der Weitwinkelmessungen zu ermitteln (siehe Kapitel Messmethoden).

Prospektionsgeschwindigkeit

Das Georadar kann sowohl für detaillierte Untersuchungen im kleineren Massstab (Meter-Bereich) als auch zur Kartierung oberflächennaher grossräumiger Untergrundstrukturen (Profilauslagen im 100-m- bis Kilometer-Bereich) eingesetzt werden.
Eine detaillierte Untergrundkartierung erfolgt in langsamem, konstantem Schrittempo. Für grössere Profilauslagen werden die Antennen auf einem Anhänger montiert und von einem Fahrzeug gezogen. Je nach der Fragestellung kann die Kartierungsgeschwindigkeit bis zu 60 km/h betragen.

Signalaufbereitung und Filterung

Um eine optimale Datengrundlage, die für eine weitere Verarbeitung und Auswertung wichtig ist, zu erhalten, muss der Georadaroperator im Feld Entscheide über das Vorgehen bei der Datenerfassung treffen. Dabei berücksichtigt er Verstärkereinstellung, Filterung, Testmessungen zur Unterscheidung zwischen Störsignalen und Reflektoren.

Bild 1. Die Messapparatur «Georadar 1, OYO». Auf einer Art Schlitten sind links der Empfänger und rechts der Sender angeordnet. Auf der Kontrolleinheit im Vordergrund ist der Kontrollbildschirm (links) zu erkennen. Darunter ist ein Drucker angeordnet und rechts davon das Bedienungsfeld.

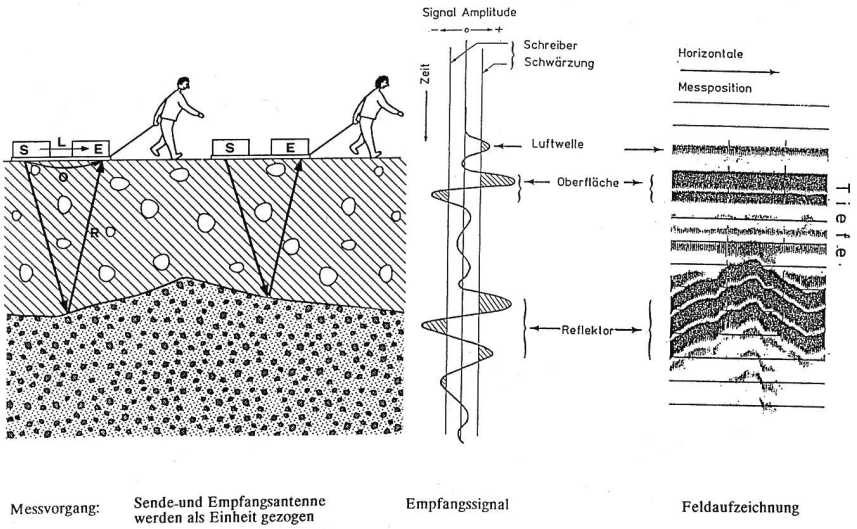

Bild 2. Schematische Darstellung des Kartierungsvorganges mit Georadar.

Reflexionen aus grösserer Tiefe erscheinen später und sind infolge der Absorption der Wellenenergie im geologischen Material stark abgeschwächt. Um die einzelnen Signale überhaupt noch zu erkennen, müssen diese zeitabhängig verstärkt werden. Im einfachsten Fall wird eine lineare Verstärkung gewählt, d.h. die Verstärkung erfolgt proportional zur Laufzeit. Daneben bestehen noch weitere Verstärkungsmöglichkeiten, z.B. die logarithmische Verstärkung. Die optimale Einstellung hängt von den jeweiligen Bedingungen, wie z.B. Geologie, Restwassersättigung des Bodens ab.

Neben der Verstärkung ist auch die Filterung der empfangenen Radarsignale ein wichtiger Teil bei der Datenakquisition. Bild 3 zeigt einen Feldausdruck, bei dem keine Filterung vorgenommen wurde. Im Vergleich mit Bild 2 des in einem nächsten Heft folgenden Artikels *(Huggenberger & Meier)* wird deutlich, dass eine Filterung, die nur hochfrequente Signalanteile durchlässt, im Bereich des schwarzen Bandes (Bild 3), noch weitere Reflektoren erkennen lässt. Eine Filterung kann nicht nur im Feld via Kontrolleinheit, sondern auch anschliessend bei der computergestützten Verarbeitung der Georadardaten vorgenommen werden.

Messmethoden

Georadarkartierung

Bei der Kartierung wird der Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne konstant gehalten. Beide Einheiten zusammen werden z.B. auf einem Schlitten (Bild 2) mit konstanter Geschwindigkeit entlang des Messprofils gezogen. Bild 3a zeigt ein Beispiel eines Feldausdruckes einer Radarkartierung. Der Feldausdruck entsteht durch ein Aneinanderreihen von Einzelsignalen, wobei in der gewählten Darstellung die positiven Amplituden durch eine Schwärzung hervorgehoben wurden. Auffällig ist das dicke schwarze Band zwischen 70 und 120 ns (Nanosekunden, 10^{-9}), das sich über die ganze Kartierung erstreckt. Im Vergleich mit den Einzelsignalen (Bild 3b) wird deutlich, dass dieses Band sich durch eine Überlagerung von hochfrequenten Reflexionssignalen mit tieffrequenten Wellen erklären lässt, d.h. im schwarzen Band ist wesentlich mehr Information enthalten.

Weitwinkelmessung

Die Weitwinkelmessung erlaubt im Feld eine rasche Abschätzung der Eindringtiefe. Bei dieser Messanordnung bleibt eine Antenne stationär und die andere wird in einer Richtung kontinuierlich von der stationären Antenne weggezogen. Mit dem sich zunehmend vergrössernden Abstand zwischen Sender und Empfänger nimmt auch der Weg der Wellen zu. Auf dem Feldausdruck erscheinen die einzelnen Reflektoren als nach unten gekrümmte, zunehmend zu einer Spitze auslaufende Linien. Aus der Lage der Spitzen des untersten sichtbaren Reflektors lässt sich die Eindringtiefe der Radarimpulse ermitteln.

Bild 3 zeigt die wesentlichen Unterschiede zwischen Kartierung und Weitwinkelmessung. Letztere beginnt in der Bildmitte bei Position 20 m und überstreicht den Bereich der Kartierung rückwärts bis zu Position 10 m. Deutlich erkennbar setzen sich die Reflektoren an der Übergangsstelle von der Kartierung zur Weitwinkelmessung fort. Mit zunehmender Separationsdistanz der beiden Antennen werden die Empfangssignale (Bild 3c) schwächer.

CMP-Messungen (CMP = Common Mid Point)

Eine Umrechnung von Laufzeitbildern in tatsächliche Reflektortiefen erfordert Kenntnisse der mittleren Ausbrei-

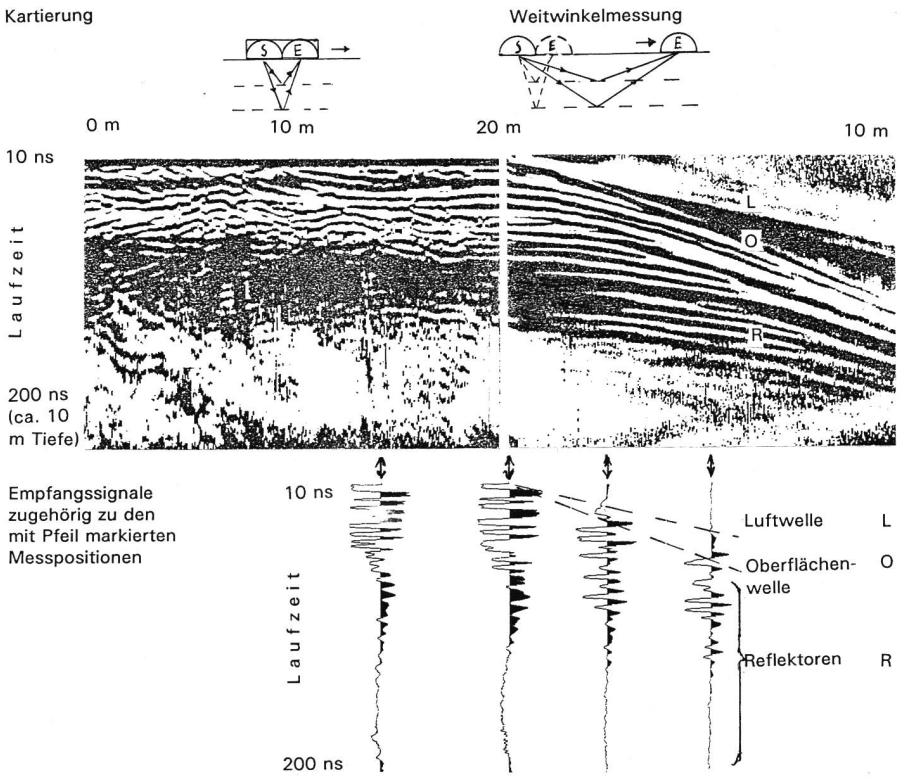

Bild 3. Georadar-Feldaufzeichnung am Beispiel Kiesgrube Hüntwangen. Oben links Kartierung, rechts Weitwinkelmessung. Unten sind die Empfangssignale aufgezeichnet, je wie sie zu den mit Pfeil markierten Messpositionen gehören.

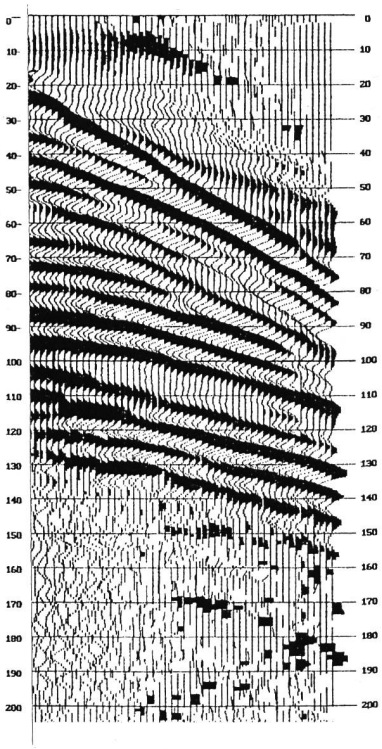

Bild 4. Computergestützte Auswertung einer Weitwinkelmessung. Von oben nach unten ist die Laufzeit, 0 bis 200 ns, aufgezeichnet. Von rechts nach links beträgt die Horizontaldistanz 7 m.

tungsgeschwindigkeiten der elektromagnetischen Wellen im Untergrund. Mit der CMP-Methode, die aus der Reflexionsseismik stammt, lassen sich diese Geschwindigkeiten ermitteln.
Bei CMP-Messungen werden sowohl der Sender als auch der Empfänger von einem Punkt, dem Common Mid Point, voneinander entfernt.
Da für einen Reflektor eine quadratische Abhängigkeit zwischen Separationsdistanz (Sender – Empfänger) und der Laufzeit besteht, werden die Reflektoren auf dem Feldausdruck als hyperbelförmig gekrümmte Kurven abgebildet. Das gleiche gilt auch für die Weitwinkelmessungen, wenn die Reflektoren horizontal sind. Stark gekrümmte Kurven verweisen auf niedrige, schwach gekrümmte Kurven dagegen auf hohe mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeiten.

Auswertung von Messungen

Bei der Auswertung müssen die Laufzeitbilder in Tiefen, also in Meter unter Boden, umgerechnet werden. Im Gegensatz zum Luftradar mit Geschwindigkeiten von 300 km/s = 30 cm/ns breiten sich die Impulse im Boden wesentlich langsamer, mit Geschwindigkeiten von 5 bis 15 cm/ns aus. Aus den Geschwindigkeiten ist also sofort zu erkennen, ob die Impulse durch Luft (Störsignale) oder Boden gingen. Die Tiefenumwandlung der Laufzeitbilder von Reflektoren setzt die Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Radarwellen im Untergrund voraus. Die Geschwindigkeit wird mit den im letzten Abschnitt beschriebenen CMP-Messungen bestimmt.

Signalzuordnung in der Weitwinkelmessung

Die Luftwelle verläuft mit konstanter Geschwindigkeit vom Sender zum Empfänger und erscheint deshalb im Feldausdruck als Gerade.
Die Oberflächenwelle wandert ebenfalls mit konstanter, aber verglichen mit der Luftwelle deutlich geringerer Geschwindigkeit entlang der Bodenoberfläche. Auf dem Feldausdruck zeichnet sie wie die Luftwelle eine Gerade, jedoch mit stärkerer Neigung.
Wie schon unter Messmethoden (Common-Mid-Point-Messungen) erwähnt, zeigen die Echos der Reflektoren die Form von Hyperbelästen.
Störsignale können durch reflektierende Körper entstehen, die sich an der Erdoberfläche in der Nähe des Messprofils befinden. Sie sind oft als Reflektoren im unteren Bereich des Laufzeitbildes erkennbar. Im Falle der abgebildeten Weitwinkelmessung (Bild 3) zieht ein weisses, vom unteren Rand nach oben aufsteigendes Band über den Feldausdruck. Der Verlauf dieses Bandes auf der Weitwinkelmessung kann nicht mit dem Strahlengang eines sich in grösserer Tiefe befindlichen Reflektors erklärt werden. Vielmehr handelt es sich aufgrund des Strahlengangs um ein Störsignal: eine von einem nahen Kiesförderband reflektierte Luftwelle.

Auswertung am Computer

Die im Feld auf Magnetband aufgezeichneten Signale besitzen eine ähnliche Struktur wie reflexionsseismische Daten. Da die Signalverarbeitung in der Reflexionsseismik durch die grossen wirtschaftlichen Interessen im Bereich der Erdölprospektion sehr weit gediehen ist, bieten sich auch für die Georadardaten zahlreiche Verarbeitungs- und Darstellungsmöglichkeiten. Der Unterschied in der Darstellungsmöglichkeit kommt bei einem Vergleich von Bild 4 mit Bild 3 deutlich zum Ausdruck. So zeigt Bild 4 einen Ausschnitt aus dem Feldausdruck der Weitwinkelmessung (Bild 3) in «Wiggle-Darstellung», nachdem eine Amplitudenanpassung vorgenommen wurde (Bild 4). Ein grosser Teil der Welleninformation ist im Feldausdruck nicht erkennbar, d.h. die Schwärzung auf dem Feldausdruck gibt keine Angaben über Amplitude und Frequenz der Reflexionssignale. Der Lufteinsatz z.B. erscheint im Feldausdruck als sehr markanter, breiter Reflektor. In der Wiggle-Darstellung hingegen sind die Amplituden des Lufteinsatzes sehr klein. Zudem geht aus der Wiggle-Darstellung deutlich hervor, wo Signale sich überlagern. Für eine weitere Beschreibung der in der Reflexionsseismik angewandten Verarbeitungsschritte, wie Signalstapelung, Amplitudencolorierung, Geschwindigkeitsanalyse usw., sei auf die bestehende Literatur verwiesen (z.B. *Robinson,* 1983).

Mögliche Anwendungsgebiete

Georadar kann aufgrund seiner Fähigkeit, geologische und bauliche Strukturen detailliert aufzulösen, in folgenden Bereichen zum Einsatz gelangen:
- ortsspezifische Abklärungen (geplante Deponien, undichte Deponien, Versickerungen, Verunreinigungen)
- hydrogeologische, sedimentologische Untersuchungen
- Ingenieurwesen (Untertagebau, Untersuchungen von Baugrund, Mauerwerk, Belägen, Armierungen, Installationen usw.)
- Archäologie (Lokalisierung von Mauerresten usw.)

Literatur

Davis, J.L., & *Annan, A.P.* (1989): Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy, Geophysical Prospecting 37, p. 531–551.

Robinson, E.A. (1983): Seismic velocity analysis and the convolutional model, Int. Human Resources Dev. Corp. Boston, p. 290.

Adresse der Verfasser: *Edi Meier,* Edi Meier & Partner AG, Hard 4, CH-8408 Winterthur, und *Peter Huggenberger,* Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Eawag, CH-8600 Dübendorf.

Verfahren zum Herstellen und Verarbeiten von silicamodifiziertem

Nassspritzbeton und -mörtel

Die Bauunternehmung Ludwig Freytag, Oldenburg, und das Putzmeister-Werk, Aichtal, haben gemeinsam ein Verfahren zum Herstellen und Verarbeiten von silicamodifiziertem Nassspritzbeton und -mörtel für Dünnstromfördertechnik entwickelt [1, 2], das neue Perspektiven bei der Instandsetzung von Betonbauwerken und für die einschalige Spritzbetonbauweise im Hohlraumbau eröffnet. Bei diesem Verfahren wirken Betontechnologie und Baumaschinentechnik untrennbar zusammen. Als Bereitstellungsgemisch im Sinne der DIN 18551 wird im Zwangsmischer hergestellter oder aus dem Transportbetonwerk gelieferter Beton und Mörtel verwendet. Zum Verbessern der Verarbeitungs- und Festbetoneigenschaften wird amorphes Siliciumdioxid (Silica fume, Microsilica; 5 bis 10% vom Zementgewicht) als Betonzusatzstoff nach DIN 1045 [3] zugegeben sowie ein hochwirksames Fliessmittel für einen Wasser-Bindemittelwert möglichst unter 0,40. Um derart steifplastische, kleb-