Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 85 (1993)
Heft: 5-6

Artikel: Anwendung des Georadars in der Hydrogeologie
Autor: Huggenberger, Peter / Meier, Edi
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939979

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: 02.07.2025

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

Anwendung des Georadars in der Hydrogeologie

Erkennung von Inhomogenitäten zur quantitativen Beschreibung von Stofftransport-Prozessen

Peter Huggenberger und Edi Meier

Der Einsatz von Georadar in der Hydrogeologie wird gezeigt. Die vorgestellten Messprofile wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Eawag) über die Ermittlung von Transportparametern in heterogenen Schotter-Grundwasserträgern aufgenommen.

Einleitung

Bei der Beschreibung der Ausbreitung von Stoffen im gesättigten und ungesättigten Bereich spielt nebst den chemisch-physikalischen Eigenschaften der transportierten Stoffe die räumliche Verteilung der Durchlässigkeiten und Porositäten eine wesentliche Rolle.

In verschiedenen Arbeiten wurde gezeigt, dass Durchlässigkeitsverteilungen in enger Beziehung zum sedimentologischen Aufbau des Untergrundes stehen [e.g. *Huggenberger* et al., 1988, *Phillips* und *Wilson,* 1989, *Hufschmied,* 1991]. Da in der Praxis die räumliche Struktur eines geologischen Körpers nie vollständig bekannt ist, werden heute zur Charakterisierung der Variabilität der hydraulischen Parameter vermehrt geostatische Ansätze verwendet. [*Gelhar* und *Axness,* 1983, *Hufschmied,* 1991]. Dabei wird z.B. die reale geologische Struktur im Feldmassstabsbereich durch ein fiktives, homogenes und anisotropes Kontinuum mit statistischen Eigenschaften (z.B. log-normale Verteilung der Durchlässigkeiten) ersetzt. Die Variabilität der hydraulischen Parameter wird in der Praxis mit Pumpversuchen oder Flowmessungen ermittelt. Die gemessenen hydraulischen Parameter stellen dabei Mittelwerte über ein bestimmtes, von der Messmethode abhängiges Aquifervolumen dar. Der damit erzielte Vorteil gegenüber deterministischen Ansätzen liegt darin, dass der natürlichen Variabilität der hydraulischen Parameter eines Aquifers Rechnung getragen wird. Die räumliche Vernetzung von Sedimentstrukturen und von Inhomogenitäten kann mit diesen Methoden jedoch nicht berücksichtigt werden [*Jussel,* 1989].

Aufschlüsse in Kiesgruben geben einen guten Einblick in den strukturellen Aufbau von Schottern (Bild 1). Deutlich erkennbar sind Inhomogenitäten in verschiedenen Massstabsbereichen (Schrägschichtungen und ausgedehnte Zonen ohne Anteil an Feinsediment, deren Durchlässigkeiten in der Grössenordnung von bis 10^{-1} m/s liegen können [*Huggenberger* et al., 1988]. Für die Beschreibung von Stofftransportprozessen ist die Erkennung ausgedehnter, stark durchlässiger Zonen insbesondere dann von Bedeutung, wenn es sich um ortsspezifische Probleme, wie z.B. um Deponien, handelt. Aber auch bei der Ermittlung von Makrodispersivitäten zur Beschreibung der grossräumigen Mischungsprozesse im Grundwasser spielt die Kenntnis der Inhomogenitäten des Untergrundes eine Rolle.

Da Änderungen der sedimentologischen Zusammensetzung von Schottern im Dezimeter- bis Meterbereich (Bild 1) stattfinden, werden an geophysikalische Methoden sehr hohe Anforderungen bezüglich vertikaler und horizontaler Auflösung gestellt. Wegen der hohen Frequenzen von Radarsignalen (je nach Antennentyp 80 bis 1000 MHz) und der Sensitivität der Methode auf Unterschiede im Wassergehalt erschien die Anwendung des Georadars für unsere Fragestellungen vielversprechend, mit der Einschränkung, dass mit einer geringen Eindringtiefe (7 bis 15 m) gerechnet werden muss [*Hara* und *Sakayama* 1985].

Experimente

Die Radarexperimente wurden im Rafzerfeld durchgeführt. Dieses Gebiet eignet sich als Testgebiet, weil durch umfassende vorgängige Untersuchungen über die Regionalgeologie und die Grundwasservorkommen [*Freimoser* und *Locher,* 1980], die Sedimentologie [*Huggenberger* et al., 1989], die hydraulischen Aspekte der Schotter [*Jussel,* 1989] und auf Grund der vielen Kiesgrubenaufschlüsse eine Informationsdichte zur Verfügung steht, die eine Kalibration geophysikalischer Methoden erlaubt.

Anhand des ersten Experimentes wird der Zusammenhang zwischen Radar-Reflexionsbildern und sedimentologischem Aufbau von fluvialen Schottern diskutiert. Beim zweiten Experiment steht die Frage nach der Erkennung des Grundwasserspiegels und der für fluviale Schotter charakteristischen Sedimentstrukturen im gesättigten und ungesättigten Bereich im Vordergrund.

Experiment 1

Das erste Experiment wurde in der Kiesgrube Hüntwangen in einem Gebiet, wo die Mächtigkeit der ungesättigten Zone etwa 20 m beträgt, durchgeführt. Durch den raschen Abbau der Schotter war es möglich, einige Tage nach den Messungen das Radarprofil mit dem geologischen Profil zu vergleichen. Das aufgenommene Profil ist 50 m lang und verläuft N-S, ungefähr senkrecht zur mittleren Abflussrichtung des ehemaligen Flusssystems.

Die Verarbeitung der Messdaten beschränkte sich auf eine zeitabhängige Verstärkung der Amplituden sowie eine Bandpassfilterung zwischen 70 und 250 MHz.

Im resultierenden Radargramm (Bild 2) sind in den obersten 100 ns deutliche Reflektoren erkennbar. Mit zunehmender Tiefe werden die Reflexionen seltener und auch weniger deutlich. Auffällig sind: 1. gegen Süden einfallende Reflektoren im mittleren Profilabschnitt zwischen 20 und 40 ns, welche nach oben von subhorizontalen Reflektoren abgeschnitten werden, 2. weitgehend reflektor-

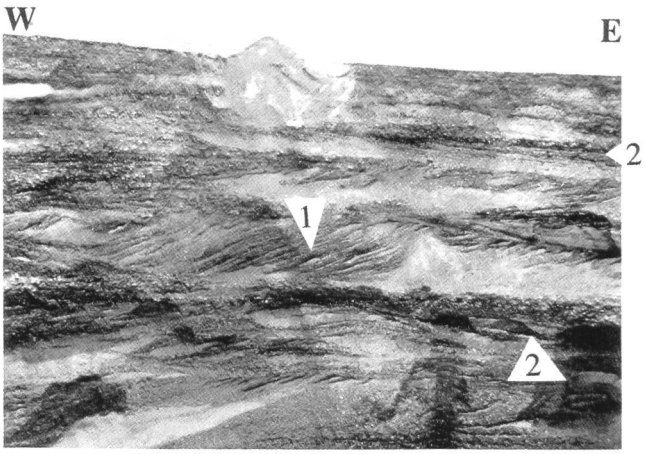
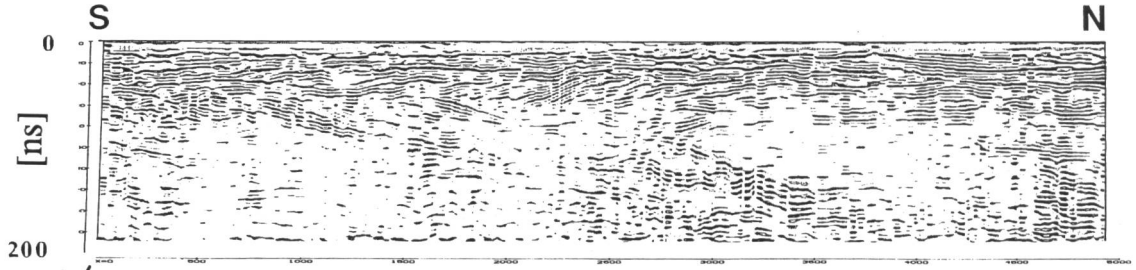
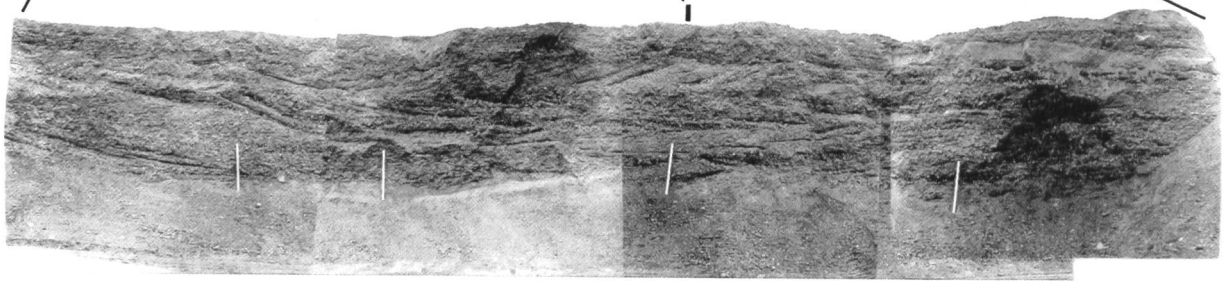


Bild 1. Sedimentstrukturen in Schottern (Kiesgrube Weiach, ZH), Wandhöhe 30 m. 1 Schrägschichtungen, 2 ausgedehnte Bereiche mit stark durchlässigem Kies, Änderungen der lithologischen Zusammensetzung im dm- bis m-Bereich.





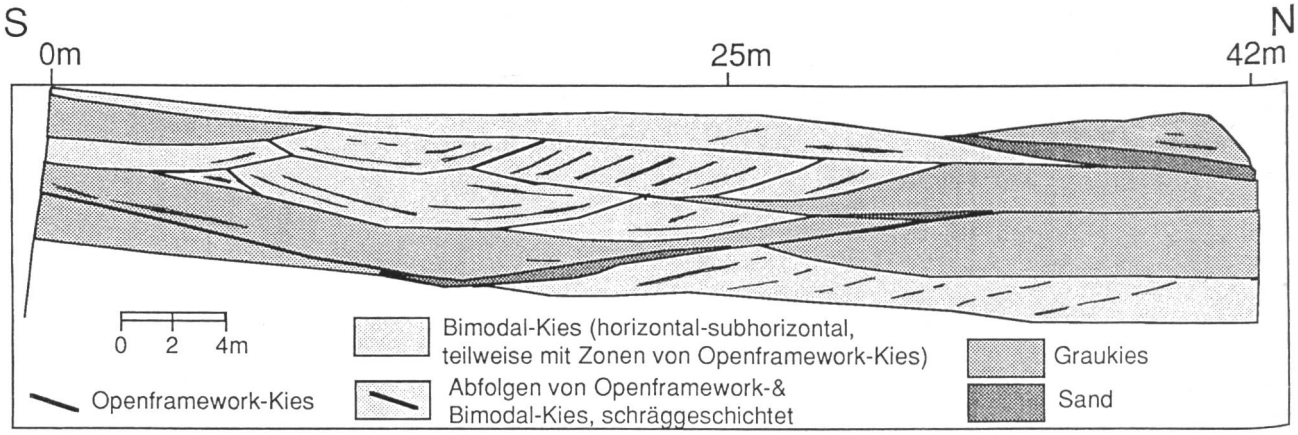


Bild 2, oben. Radargramm, Experiment 1 (Profil Nord-Süd).

Aufnahme-Parameter: Sendeantenne: 250 MHz, Abstand von Sende- zu Empfängerantenne 0,8 m; Horchzeit: 200 ns; zeitabhängige Verstärkung der Signale: linear.

Bild 3a, Mitte. Geologisches Profil nach erfolgtem Kiesabbau.

Bild 3b, unten. Lithologische Gliederung und charakteristische Sedimentstrukturen im geologischen Profil. Beschreibung der Lithotypen siehe Tabelle 1.

freie Bereiche, 3. kontinuierlich verlaufende Reflektoren in den obersten 20 ns im nördlichen Profilteil sowie geneigte, eher diskontinuierliche Reflektoren im mittleren und südlichen Profilabschnitt ab etwa 80 ns.

Ein visueller Vergleich des Radarprofils mit dem geologischen Profil nach erfolgtem Kiesabbau (Bild 3a) zeigt deutlich, dass eine Beziehung zwischen Sedimentstrukturen respektive Texturen und Reflexionsmuster existiert. So kann beispielsweise die leicht gegen Norden einfallende Sandschicht auf der rechten Seite des Profils mit den kontinuierlich verlaufenden Reflektoren in Beziehung gebracht werden. Auffällig sind auch die gegen Süden einfallenden Schrägschichtungen im mittleren Profilabschnitt (Bild 3a). Diese Schrägschichtungen bestehen aus einzelnen Lagen von gröberen Komponenten (Steine) und einer Matrix aus fein- bis mittelkörnigem Sand. Die Fraktion Grobsand-Feinkies fehlt, d.h., es handelt sich um eine typische bimodale Kornverteilung. Danach folgt ein scharfer Übergang zu einer Kiesschicht mit fehlendem Anteil an Feinkies und Feinmaterial. Diese Einheit ist gegen oben gradiert. Aufgrund der charakteristischen Korn-

verteilung wird der untere Teil als Bimodal-, der obere wegen der Absenz von feinem Sediment als «Openframework-Kies» bezeichnet [*Steel* und *Thompson,* 1983].

Dieses Sedimentgefüge ist in fluvialen Sedimenten – den wichtigsten Grundwasserträgern der Schweiz – sehr verbreitet und ist wegen seiner grossen Durchlässigkeit (Tabelle 1) für die Wasserzirkulation von Bedeutung. Weitere, ebenfalls häufig in den fluvialen Schotterablagerungen vorkommende Sedimentgefüge sind in der Tabelle 1 zusammengestellt. Aufgrund ihrer typischen Korngrössen-Zusammensetzung sind die ausgeschiedenen Lithologien auch am Aufschluss farblich unterscheidbar (Bild 3b). *Peter Jussel* (1989) konnte im Rahmen eines Projektes des Institutes für Hydromechanik zudem zeigen, dass diese Lithologien jeweils auch charakteristische Durchlässigkeiten und Porositäten aufweisen.

Welches ist die Bedeutung der Reflexionsmuster bzw. der einzelnen Reflektoren? Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen im Untergrund wird von den hochfrequenten elektrischen Eigenschaften der Sedimente bestimmt. Bei Änderungen der elektri-

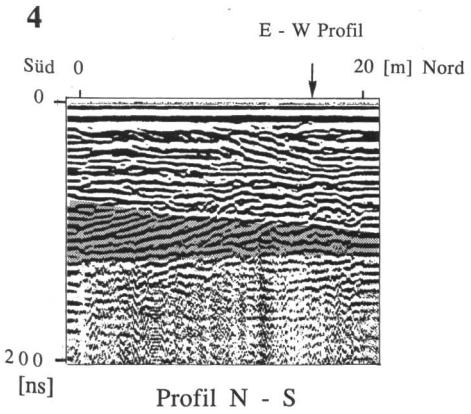


Bild 4. Radarprofil N-S.

Aufnahme-Parameter, Profile 4, 5a: Sendeantenne: 250 MHz; Abstand von Sende- zu Empfängerantenne 0,8 m; Horchzeit: 200 ns; zeitabhängige Verstärkung der Signale: linear.

Aufnahme-Parameter, Profil 5b: «Common-Midpoint-Messungen» (CDP); Sendeantenne: 250 MHz; Sende- und Empfängerantenne schrittweise voneinander entfernt; Schrittinkrement: 1 m; Horchzeit: 200 ns; zeitabhängige Verstärkung der Signale: linear.

Bild 5. a) E-W-Profil, Common-Midpoint-Messung (CMP) bei Meter 15; b) Common-Midpoint-Messung (CMP), Mitte bei Meter 15. c) Geschwindigkeitsprofil (Berechnung der Intervallgeschwindigkeiten aufgrund eines vereinfachten Strahlenganges). Der Geschwindigkeitsabfall bei 3,14 Meter stimmt mit der Höhe des Grundwasserspiegels zur Zeit des Experimentes gut überein.

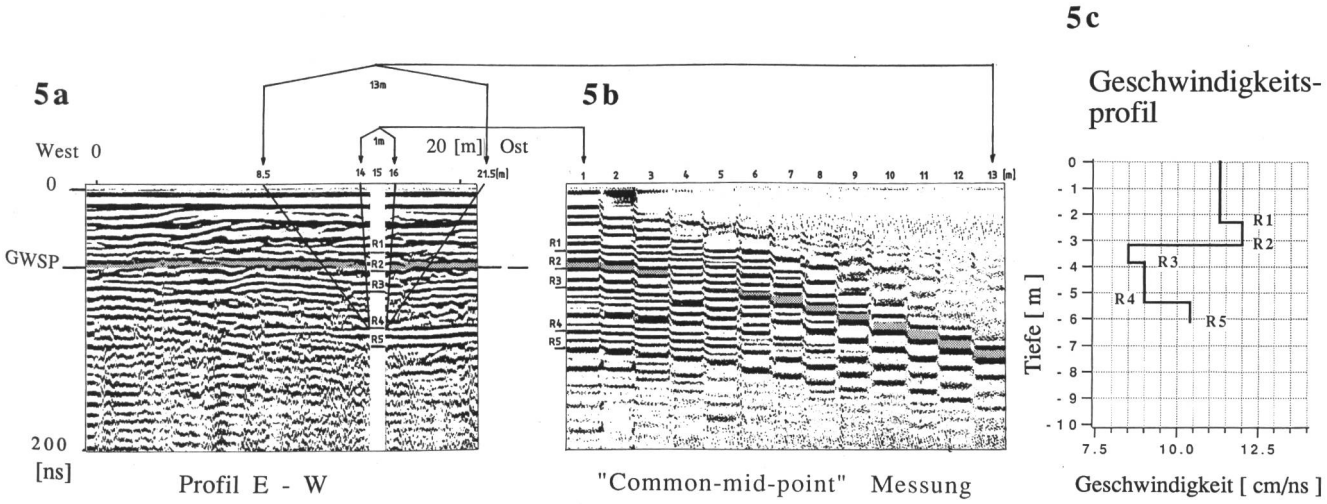


Tabelle 1. Unterschiedene Schottertypen, lithologische Beschreibung, Mittelwerte der hydraulischen Leitfähigkeiten und Standardabweichung (σ ln K), Porositäten (Mittelwerte).

Schottertyp (Lithotyp)	Zusammensetzung, Strukturen und charakteristische Merkmale	*Hydraulische Leitfähigkeit K (geometrisches Mittel) [m/s] / Standard Abweichung σ in K	*Porosität [%] Mittelwert
Bimodal-Kies	● gut sortierte Kieskomponenten (mittlerer Durchmesser: 3-5 cm) mit einer Matrix aus mittelkörnigem Sand ● Kieskomponenten gut gerundet ● einzelne Schichten 1-2 dm mächtig ● horizontal, schräggeschichtet (fast ausschliesslich zusammen mit Open-framework-Kies) ● Farbe: ockergelb ● USCS**: GP (schlechte Kornabstufung, Grobsand und Feinkies fehlend)	$2.3 \cdot 10^{-4}$ / 0.6	14
Open-framework Kies	● gut sortiert ● Komponenten gut gerundet ● Fraktionen < 0.5cm fehlend ● gradierte Schrägschichtung (zusammen mit Bimodal-Kies vorkommend), teilweise isolliert als horizontale Zonen in Bimodal- oder Graukies ● Farbe grau-bräunlich ● USCS: OW (sauberer Kies mit Dominanz einer Kornfraktion)	$- 5 \cdot 10^{-1}$	35
Graukies	● schlecht sortiert ● Absenz von Ton- und Siltfraktion ● Feinsand nur in kleinen Mengen ● Horizontale- sowie Schrägschichtung ● Farbe: grau ● USCS: GW (saubere Kiese mit guter Kornabstufung)	$1.4 \cdot 10^{-4}$ / 0.4	20
Braunkies	● schlecht sortiert ● Komponenten gut gerundet ● Silt und Feinsand in variierenden Mengen vorhanden ● Gerölle, vereinzelte Blöcke bis über 1m mittl. Durchmesser ● ausgedehnte bis mehrere Meter mächtige horizontale Schichten ● Farbe: braun ● USCS: GM	$3 \cdot 10^{-5}$ / 0.6	
Sand	● Bestandteil von Bimodal-Kies ● horizontale Sandschichten und Trogfüllungen ● Zwischenlagen von Graukies ● USCS: S - (SW) Sand mit Grau- oder Bimodal-Kies, (SP) dominante Fraktion: Mittelsand	$3 \cdot 10^{-4}$ / 0.3	43
Silt	● einzelne horizontale Schichten in charakteristischen Niveaus ● Bestandteil von Braunkies ● Oberste Lage von Trogfüllungen ● USCS: M	$< 10^{-6}$	

*Messungen von P. Jussel (1989) ** Klassifikation nach USCS: Unified-Soil-Classification-System (Hufschmied, 1983)

Tabelle 2. Reflexionskoeffizenten (R). Berechnete Reflexionskoeffizienten von Lithologieübergängen in der gesättigten und ungesättigten Zone. Da der Wassergehalt im ungesättigten Bereich nicht in allen Lithologien gleich ist, wurden zur Abschätzung des Reflexionskoeffizienten Messwerte verwendet, die anhand von Feldproben ermittelt wurden. Je grösser der Reflexionskoeffizient, desto stärker ist die zu erwartende Reflexion.

Texturübergang	R gesättigte Zone	R ungesättigte Zone (Messungen*)
● Sand/Bimodal-Kies	0.25	0.03
● Open-Framework-Kies/Bimodal-Kies	0.18	0.08
● Sand/Graukies	0.17	0.06
● Openframework-Graukies	0.12	0.04
● Sand/ Openframework-Kies	0.06	0.1

* Volumetrischer Wassergehalt an Sedimentproben bestimmt

Reflexionskoeffizient $R = \frac{|\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}|}{|\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}|}$; Berechnung gültig für schlechtleitende Schotter

ε_1: Dielektrizitätskonstante der oberen Schicht, ε_2: Dielektrizitätskonstante der unteren Schicht (gesättigte Zone: höchster Reflexionskoeffizient beim Übergang Sand/Bimodal-Kies und Openframework/ Bimodal-Kies; ungesättigte Zone: grösster Reflexionskoeffizient bei Sand/ Openframework-Kies Übergängen)

schen Eigenschaften wird ein Teil der eindringenden Welle reflektiert. Nach *Roth* et al. (1990) kann die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in geologischen Medien nur durch die Dielektrizitätszahl ε_T und die magnetische Permeabilität μ beschrieben werden (μ Schotter zirka = 1)

$$c = c_0 / \sqrt{\varepsilon_T}\,\mu \qquad (1)$$

(c = Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen im Boden, c_0 = Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Luft: 30 cm/ns).

Diese Autoren stellen die zusammengesetzte Dielektrizitätszahl ε_T eines Mehrkomponentensystems, z. B. Sediment-Wasser-Luft, in Beziehung zu den Dielektrizitätszahlen und den Volumenanteilen der einzelnen Fraktionen.

$$\sqrt{\varepsilon_T} = n\,(1-S)\,\sqrt{\varepsilon_a} + n\,S\sqrt{\varepsilon_w} + (1-n)\,\sqrt{\varepsilon_s} \qquad (2)$$

ε_a Dielektrizitätskonstante von Luft ($\varepsilon_a \approx 1$)
ε_w Dielektrizitätskonstante von Wasser ($\varepsilon_w \approx 81$)
ε_s Dielektrizitätskonstante von Sediment ($\varepsilon_s \approx 4$)
n Porosität
S Wassersättigungsgrad

Betrachtet man die Dielektrizitätszahlen der einzelnen Komponenten, so wird deutlich, dass der volumetrische Wassergehalt den grössten Einfluss auf die zusammengesetzte Dielektrizitätszahl des Gemisches hat. Bei einem Übergang von einem fein- zu einem grobporigen Sediment spielen in der ungesättigten Zone die groben Poren bis zu einer bestimmten Wassersättigung die Rolle eines Wasserstauers. Die deutlichsten Unterschiede in der Porengeometrie existieren bei Übergängen von Bimodal- zu Openframework-Kies oder von Sand zu Openframework-Kies.

Weil die Dielektrizitätszahlen an Texturgrenzen am stärksten ändern und bei Änderungen der Dielektrizitätszahl Reflexionen auftreten, wird mit der Radarmethode die räumliche Geometrie von lithologischen Grenzen abgebildet. Das Reflexionsverhalten bei solchen Übergängen im ungesättigten Bereich ist jedoch nur bedingt vergleichbar mit demjenigen im gesättigten Bereich (siehe Reflexionskoeffizienten, Tabelle 2), da der volumetrische Wassergehalt im gesättigten Bereich nur von der Porosität, im ungesättigten Bereich jedoch zusätzlich vom Sedimentgefüge abhängig ist.

Das geologische Profil (Bild 3a) veranschaulicht ebenfalls, dass die einzelnen Schottertypen in spezifischen Sedimentstrukturen vorkommen. So sind Abfolgen von Openframework- und Bimodal-Kies im zentralen Teil des Profils Bestandteil einer Trogfüllung. Die Geometrie des Troges wird durch die begrenzenden Erosionsflächen bestimmt. Weitere Trogstrukturen respektive Relikte von erodierten Trögen sind auf der linken Profilseite erkennbar. Ein Vergleich des geologischen Profils mit dem Radargramm zeigt, dass solche Troggeometrien mit der Radarmessung erkannt werden können.

Diejenigen Bereiche auf dem Radargramm, die sich durch schwache Reflexionen auszeichnen, bestehen lithologisch aus relativ homogenem Graukies (Tabelle 1).

Experiment 2

Das zweite Experiment wurde auf der untersten Abbaustufe der Kiesgrube Hüntwangen etwa 3 m über dem Grundwasserspiegel durchgeführt. Der Grundwasserspiegel am Messort konnte mit gemessenen Wasserständen in drei sich in der Nähe befindlichen Grundwasser-Beobachtungsrohren mit einer Genauigkeit von ± 5 bis 10 cm extrapoliert werden. Die Messprofile (Bilder 4, 5a) verlaufen N-S und E-W, d. h. senkrecht und parallel zur

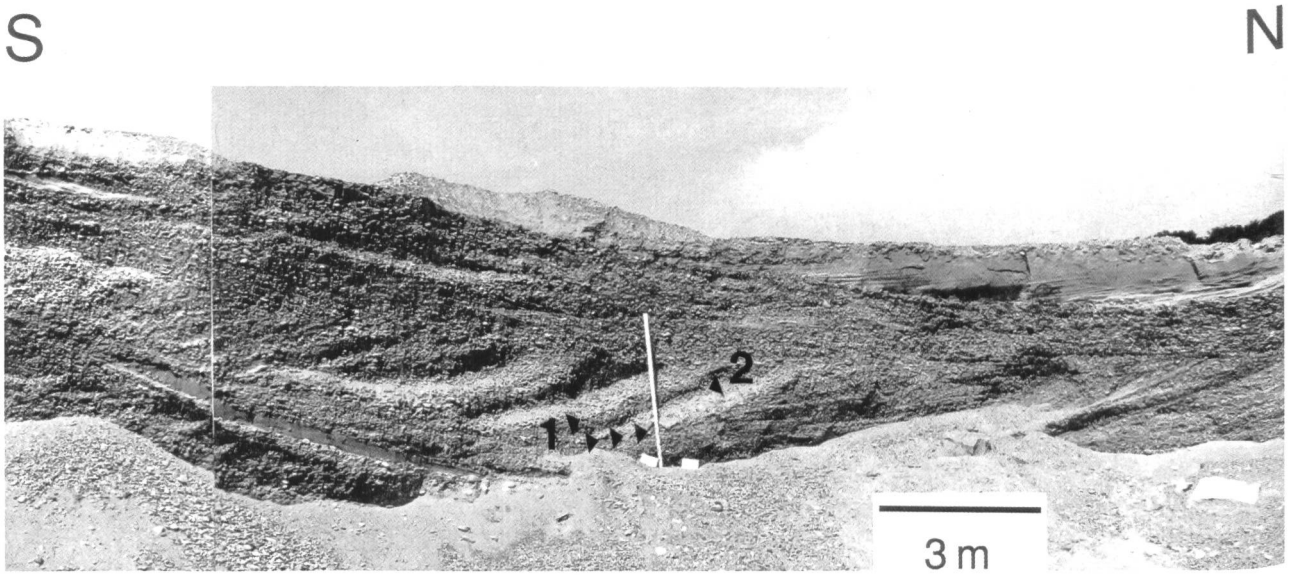


Bild 6. Beispiel einer Trogfüllung, bestehend aus einzelnen Sets von Openframework- und Bimodalkies (sedimentologische Interpretation: Sedimentfüllung eines Kolkloches [scour pool]).

mittleren Abflussrichtung des aufschotternden Flusssystems.

Bei Meter 15 (Profil 5a) wurde zur Bestimmung der Verteilung der Geschwindigkeiten der elektromagnetischen Wellen eine «Common-Midpoint-Messung» (CDP) durchgeführt (Bild 5b).

Im N-S-Profil (Bild 4) sind auf der linken Bildseite zwischen 70 und 120 ns, deutlich gegen Süden, und im oberen Profilteil bis etwa 60 ns gegen Norden einfallende Reflektoren erkennbar. Im E-W-Profil (Bild 5a) dominieren subparallele Reflektoren das Reflexionsmuster. Gegen Westen einfallende kürzere Reflexionen liegen zwischen ausgedehnten subparallelen Reflektoren.

Der Grundwasserspiegel (Bild 5a, GWSP) kann in der Auswertung der CDP-Messung (Bild 5c) durch den markanten Geschwindigkeitsabfall (Reflektor R2) in einer Tiefe von 3,14 m unter der Terrainoberkante identifiziert werden. Die geologische Bedeutung der geneigten Reflektoren (Bild 4, schraffierter Bereich) wird im Vergleich mit Bild 6 deutlich. Das Bild zeigt eine Trogform, bestehend aus einzelnen Schichten von Openframework- und Bimodal-Kiesen. Es handelt sich dabei um eine Auffüllung eines Kolkloches («scour pool») des ehemaligen Flusssystems [*Huggenberger* et al., 1988]. Die geneigten Reflektoren, welche sich auf der linken Profilseite (Bild 4) zwischen 70 und 120 ns befinden, entsprechen ziemlich genau der rechten Hälfte einer solchen Kolkfüllung.

Die CDP-Messung (Bild 5b) zeigt ausserdem, dass ausgeprägte Reflektoren bis zirka 160 ns auftreten. Darunter befinden sich noch weitere, jedoch nur schlecht erkennbare Reflexionen. Ihre Auswertung erfordert eine aufwendigere Datenverarbeitung, wie sie in der Reflexionsseismik zur Anwendung kommt.

Diskussion

Generell können durch die Sedimentationsprozesse bedingte Inhomogenitäten des Untergrundes in Lockergesteinen mit dem Georadar auch bis unterhalb des Grundwasserspiegels erkannt werden. Eine geologische Interpretation der Radarprofile ist im allgemeinen ohne zusätzliche Information nicht eindeutig. In Kombination mit Bohrungen und Aufschlüssen kann jedoch eine räumliche Information über die Inhomogenitäten des Untergrundes gewonnen werden. Die aufgeführten Beispiele zeigen, dass im Idealfall sogar Rückschlüsse auf charakteristische Sedimentgefüge möglich sind.

Radarprofile können in einem solchen Fall direkt für hydrogeologische Fragestellungen verwendet werden. Die Geometrie der charakteristischen fluvialen Sedimentstrukturen gibt dem Geologen zudem wertvolle Hinweise auf die Dynamik des ehemaligen Ablagerungssystems und erlaubt gewisse Voraussagen über die zu erwartende Geometrie von Sedimentstrukturen auch ausserhalb des Messgebietes.

Bei der in diesen Experimenten angewendeten Sendefrequenz von 250 MHz konnten in Schottern Reflektoren bis in eine Tiefe von maximal 10 m erkannt werden. Damit liegt die Stärke des Georadars in der hohen Auflösung (dm-Bereich) der geologischen Strukturen in den obersten 10 m des Untergrundes.

Verdankungen:
Wir danken den nachfolgend aufgeführten Personen, die im Rahmen dieses Projektes bei den Feldmessungen, der Reproduktion der Fotos und der Bearbeitung des Manuskriptes mitgearbeitet haben: *I. Holderegger, B. Schwertfeger, D. Elber, H. Bolliger* und *P. Schlup.*

Bibliographie

Jussel, P. (1989): Stochastic description of typical inhomogeneities of hydraulic conductivity in fluvial gravel deposits, in Contaminant Transport in Groundwater, eds. Kobus & Kinzelbach, Balkema, p. 221–228.
Gelhar, L. W., and *Axness, C. L.* (1983): Three-dimensional stochastic analysis of macrodispersion in aquifers. «Water. Resour. Res.» *19,* p. 161–180.
Hara, T., and *Sakayama, T.* (1985): The applicability of ground probing radar to site investigations (OYO, RP-4159, pp. 32).
Hufschmied, P (1983), Ermittlung der Durchlässigkeit von Lockergesteins-Grundwasserleitern, eine vergleichende Untersuchung verschiedener Feldmethoden. Diss. No. 7397, 300 S., ETH Zürich.
Hufschmied, P., (1991): Ermittlung makroskopischer Transportparameter am Beispiel des Grundwasserleiters im Hydrothermischen Testareal Aelfligen. «Gas, Wasser, Abwasser» 3/*91,* S. 216–230.
Huggenberger, P., Siegenthaler, Ch., und *Stauffer, F.* (1988): Grundwasserströmung in Schottern; Einfluss von Ablagerungsformen auf die Verteilung der Grundwasserfliessgeschwindigkeit. «Wasserwirtschaft» *78*/5, S. 202–212.
Phillips, F. M., and *Wilson, J. L.* (1989): An approach to estimating hydraulic conductivity correlation scales using geological characteristics, «Water Resour. Res.» *25* (1), p. 141–143.
Roth, K., et al. (1990): Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using composite dielectric approach, «WRR», V. 26/10, p. 2267–2273.
Steel, R. J., and *Thompson, D. B.* (1983): Structures and textures in triassic braided stream conglomerates («Bunter» Pebble Beds) in the Sherwood Sandstone Group, North Staffordshire, England. «Sedimentology», *30,* p. 341–367.

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

International workshop on dam safety evaluation

Grindelwald, April 1993

Am dreitägigen Workshop, unter der Schirmherrschaft von ICOLD und gefördert von der Fachzeitschrift «Dam Engineering», nahmen 165 Teilnehmer aus 31 Ländern teil. Das war mehr, als es die Organisatoren erwartet hatten. Warum wohl?

Das zunehmende Alter bestehender und die Dimensionen neuerer Talsperren sind Substanz und Verantwortung zugleich, sich mit ihrer Sicherheit zu befassen. Mit dem Zugriff zu verfeinerten Rechenmethoden und verlässlichen Instrumenten ist der Anreiz, dem tatsächlichen Sperrenverhalten etwas näher zu kommen, geweckt; ein Synergieeffekt, so scheint es, der beflügelt.

Die Tagung wurde von Prof. *R. Sinniger* (EPFL), Dr. *R. Biedermann* (Bundesamt für Wasserwirtschaft) und *R. Taylor* (Dam Engineering) eröffnet. Das Programm behandelte neun Themen und endete mit einer Diskussionsrunde (siehe Kasten).

Es gibt wohl keine einzelne und absolute Methode, womit die Sicherheit einer Talsperre definiert werden könnte. Das Thema ist vielschichtig und verschiedenartig, es ist orts- und zeitabhängig, mit dem Ergebnis, dass mehrere Wege erforscht und angewendet werden. Obwohl Vereinheitlichung und gegenseitige Verträglichkeit wünschenswert wären, würde das die Qualität der Sicherheitsermittlungen einschränken. Schon allein das Ausmass an vor-