

3.8 Zusammenfassende Betrachtung der geophysikalischen Messungen

H.-R. GLÄSER

UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Sektion Hydrogeologie, Hallesche Straße 44, 062246 Bad Lauchstädt

Durch ein umfangreiches und methodisch breit gefächertes geophysikalisches Meßprogramm haben die in das Forschungsvorhaben integrierten Universitätsinstitute und Unternehmen auf relativ kleinem Raum eine Fülle von Daten über den Untergrund des Untersuchungsstandortes erarbeitet. So sehr auch der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten auf chemische, mikrobiologische und verfahrenstechnische Fragestellungen orientiert ist, so notwendig sind in der Frühphase des Forschungsprojektes Erkundungsarbeiten zu den hydraulischen und petrophysikalischen Eigenschaften des Untersuchungsraumes. Entsprechend waren die an die Geophysik herangetragenen Aufgaben zunächst mehr stratigrafischen, petrophysikalischen und hydrodynamischen Fragestellungen zugeordnet. Bei der Sichtung und komplexen Betrachtung des Datenmaterials ergeben sich, wenn auch noch mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, Ansatzpunkte für ein auf geophysikalischer Basis durchführbares Monitoring der Grundwasserkontamination. Eher kontrovers und daher auch sehr zurückhaltend werden Phänomene diskutiert, die im Aquifer womöglich spontan ablaufenden Reaktionen zugesprochen werden können. Darauf soll später noch eingegangen werden.

Nicht alle eingesetzten Technologien und Konzepte führten zum Erfolg. Insbesondere die von der Oberfläche aus durchgeführten elektrischen Messungen waren aufgrund der durch das Netz der Deutschen Bahn AG hervorgerufenen Störspannungen zum Scheitern verurteilt. So werden im wesentlichen nur die tomografischen Untersuchungen in der durch die Pegel SafBit 3 und 4 aufgespannten Vertikalebene und Messungen in den Pegeln SafBit 7 und 14 einer Diskussion unterworfen.

Zwischen den Pegeln SafBit 3 und 4 sind tomografische Messungen auf seismischer, elektrischer und elektromagnetischer Verfahrensgrundlage vorgenommen worden. Aus den durch die Universität Tübingen durchgeführten Untersuchungen zur Ausbreitung seismischer Wellen im Untergrund wurden Porositätsberechnungen für den durchlaufenen Weg zwischen beiden Pegeln abgeleitet. Die Messungen belegen grundsätzlich eine horizontale Stratifizierung des Untersuchungsraumes, allerdings mit teilweise kleinräumig stark wechselnden Inhomogenitäten in seismischer Laufzeit und Porosität. Besonders ausgeprägt ist dieses Phänomen im Teufenintervall zwischen 10 m und 12 m zu beobachten. Extrem hohe Porositäten wurden im Bereich des Pegels SafBit 4 in der Teufe um 16 m berechnet. Betrachtet man das Material der gewonnenen Bohrkern in diesem

Teufenbereich, so ist der Anteil an kohligter Substanz in der sonst sandig-kiesigen Matrix augenfällig. Dieses Substrat verlängert naturgemäß die Laufzeit der elastischen Wellen, woraus dann letztendlich überhöhte Porositätswerte berechnet werden. Eine Kontrollmöglichkeit ist prinzipiell durch die Berechnung von Porositätswerten aus Widerstandsmessungen gegeben. Das erfolgt in kombinierter Form unter Zuhilfenahme der Formationsfaktor-Widerstandsbeziehung und der sogenannten ARCHIE-Gleichung [1]. Im Falle 100%-iger Wassersättigung des Porenraumes sowie schichtbezogen gleichmäßig ausgeprägter Grundwasserleitfähigkeit und Fehlens abgeschlossener (hydraulisch nicht durchströmbarer) Porenraumstrukturen müssen die Werte aus beiden Bestimmungsmethoden identisch sein.

Die aus Widerstandsmessungen berechnete Porosität ergibt sich zu:

$$p = \sqrt[m]{\frac{R_w}{R_o}}$$

wobei m empirisch mit 1,6 bestimmt worden ist. R_w kennzeichnet den Schichtwasserwiderstand, R_o den Meßwert des Gesteinswiderstandes (Matrix und Porenflüssigkeit) in der Maßeinheit Ωm .

Voraussetzung für diesen methodischen Ansatz ist die Kenntnis um die Leitfähigkeits- respektive Widerstandsverteilung des Grundwassers. Auf der Grundlage von Probenahmen mit dem in Tübingen entwickelten Multilevel-Packertestsystem konnte in den durchgängig verfilterten Pegeln teufenorientierte Wasserproben gewonnen und daraus der Schichtwasserwiderstand R_w bestimmt werden. Die vertikale Heterogenität der Wasserleitfähigkeit ist den Diagrammen in Abb. 1 zu entnehmen.

Der Teufenbereich um 20 m - hier befindet sich die Oberkante des Kohleflözes - ist deutlich durch eine sprunghafte Vergrößerung der Leitfähigkeit gekennzeichnet.

Es müssen im Untersuchungsraum aber auch laterale Leitfähigkeitsunterschiede auftreten. Zwischen den Pegeln SafBit 3 und 4 werden im Teufenbereich 10 m-12 m starke Differenzierungen in der seismischen Geschwindigkeit und damit auch der seismischen Porosität beobachtet. Das Widerstandsbild reflektiert die Situation dort durchweg monotoner. Die Ursache muß hierfür in einer lateral stark differierenden Wasserleitfähigkeit begründet sein. Die aus Probenahmen ermittelten Leitfähigkeitswerte des Grundwassers variieren im Teufenbereich unterhalb 7 m im gesamten Areal innerhalb 1,6 mS/cm und 3,2 mS/cm ($R_w=6,2 \dots 3,1 \Omega m$).

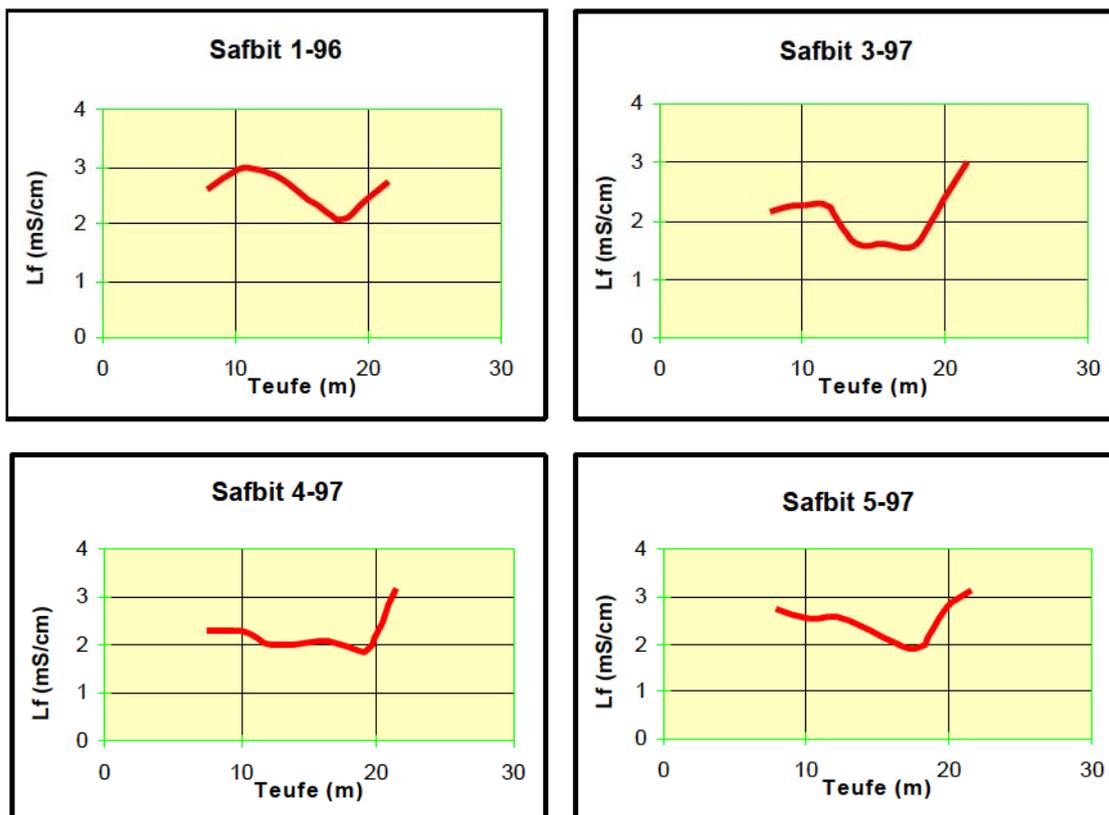


Abb.1: Pegel SafBit 1, 3, 4, 5 - Leitfähigkeitsprofil

Die nachstehende Tabelle zeigt im Nahfeld des Pegel SafBit 4/97 den Vergleich zwischen den aus Widerstandsmessungen und aus seismischen Untersuchungen abgeleiteten Porositätswerten PWID und PSEIS.

Tabelle 1: Porositätswerte im Nahfeld von SafBit 4/97

Teufe (m)	PWID (%)	PSEIS (%)	Ro (Ω m)	Rw (Ω m)
10,5	21	17	50	4,4
12	22	23	55	4,95
14	29	33	37	5,0
16	31	39	32	4,81
18	26	31	45	5,07
19,4	26	35	45	5,24

Die Abweichungen zwischen den beiden Porositätsgruppen können folgende Ursachen haben:

- Unsichere R_w -Werte (PWID zu groß)
- Einschaltung von bindigem und kohligem Material in das Schichtsubstrat (PSEIS zu groß).

Am Beispiel des Porositätsvergleiches für das Nahfeld der Pegel SafBit 3 und 4, für welches auch die elektrische Leitfähigkeit des Grundwassers bestimmt worden war, wird die Streuung um die Identitätsgerade deutlich.

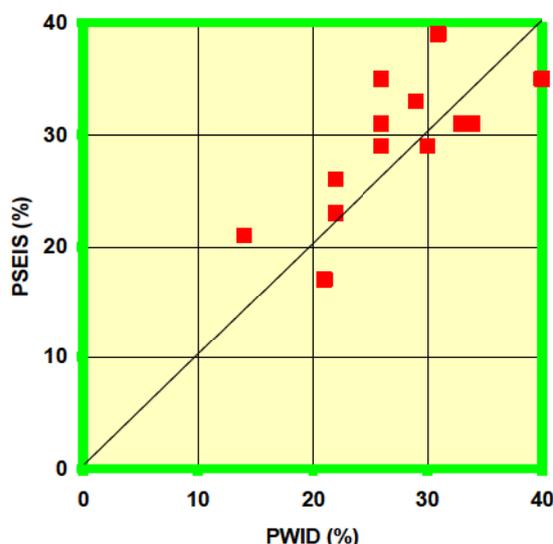


Abb. 2: SafBit 3 u. 4, Seismisch und elektrisch ermittelte Porositätswerte

Beim gegenwärtigen Kenntnisstand werden die Ursachen für die Heterogenität in der Grundwasserleitfähigkeit kontrovers diskutiert. Ursächlich werden dabei folgende Phänomene in Betracht gezogen:

- Eine Grundwasserscheide unmittelbar unter dem Untersuchungsgebiet verursacht -je nach Wasserhaltung- abrupte Fließrichtungsänderungen und damit Veränderungen im Leitfähigkeitsmuster des Grundwassers
- Mikrobiologische Abbauprozesse (?) an noch unbekanntem Komponenten des Kontaminationsinventars im Grundwasserleiter, der durch eine unterschiedliche Matrixsituation (Anteile kohligem Substanz) charakterisiert ist, bewirken Veränderungen der elektrischen Leitfähigkeit des Grundwassers

Welche Ursachen für die ungleichmäßigen Leitfähigkeitsverteilungen im Grundwasser auch geltend gemacht werden können, der womöglich zeitliche Fortgang in der Leitfähigkeitsentwicklung kann ab einer bestimmten Größe über elektrische Meßsysteme beobachtet werden und zwar mittels tomografischer Technologie auch in Bereichen, die nicht durch Bohrungen durchteuft worden sind. Für die aus dem Abbauprozess von aromatischen CKW in Lösung gehenden Chloridionen dürfte die zu erwartende Konzentrationszunahme wahrscheinlich unterhalb der Nachweisgrenze liegen. Für eine zeitbezogene Kontrolle des die Leitfähigkeit dominierenden gesamten Kontaminationsinventars sollten aber durchaus Überlegungen zum Einsatz solcher Messungen angestellt werden.

Bei einer Aquiferporosität von 25 % lassen sich Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit von 0.2 mS/cm durch Widerstandsdifferenzen in der Größenordnung von 5 Ω m belegen. Dabei entsprechen 0.2 mS/cm vergleichsweise ca. 70 mg/l Chloridlösung bei einer Formationstemperatur von 15°C. Somit stünde ein prinzipielles, auch auf Bereiche zwischen den Pegeln ausdehnbares, Kontrollsystem zur Leitfähigkeitsüberwachung im Untergrund ohne zusätzliche Neuabteufungen zur Verfügung. Beobachtungen in einzelnen Pegeln ermutigen zu derartigen Untersuchungen, was zunächst am Beispiel von SafBit 14 demonstriert werden soll.

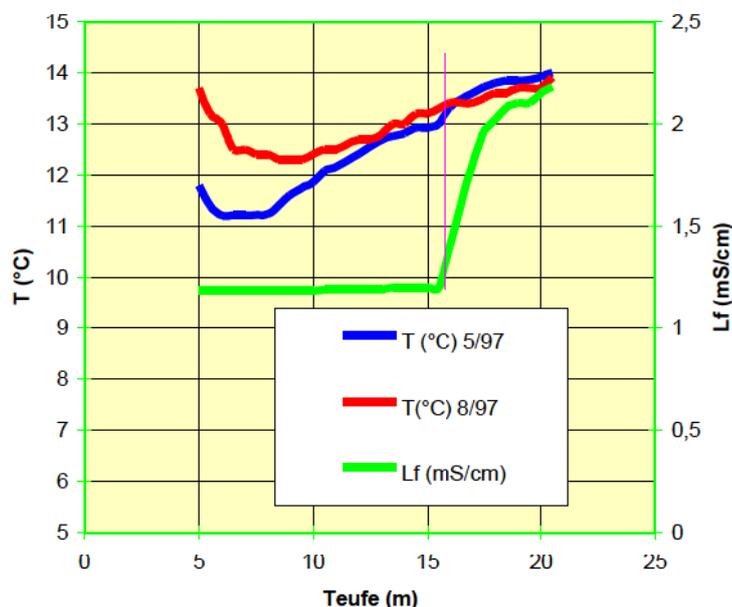


Abb. 3: SafBit 14 - Leitfähigkeit und Temperaturentwicklung Mai - August 1997

Die im Rahmen einer geplanten Traceruntersuchung vorgenommenen Temperatur- und Leitfähigkeitsmessungen zeigten zunächst teufenidentische Anomalien oberhalb des Kohleflözes. Eine im zeitlichen Abstand von drei Monaten vorgenommene Temperaturwiederholungsmessung zeigte dagegen ein verändertes Temperaturfeld.

Auch in den meisten anderen Pegeln sind Temperaturanomalien oberhalb des Kohleflöztes belegt. Daß für den Bereich oberhalb der Kohle ein genereller Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Temperatur bestehen sollte, darauf weisen auch die Messungen im Hinterrohrraum des Pegels SafBit 7 hin. Dort wurden an die Verrohrung ein elektrischer Kabelbaum (Universität Leipzig) und ein faseroptisches Meßsystem (GESO) angeschlossen. Aus den elektrischen Potentialmessungen waren sogenannte synthetische Bohrlochmeßkurven berechnet worden. Insbesondere die Konstellation KN = kleine Normalpotentialsonde erfaßt teufenkonform mit der Temperaturanomalie einen Bereich geringen elektrischen Widerstandes (erhöhte Leitfähigkeit). Dieses Meßsystem im Hinterrohrraum eignet sich vermutete zeitlich gestaffelte Veränderungen der elektrischen Grundwasserleitfähigkeit direkt zu erfassen.

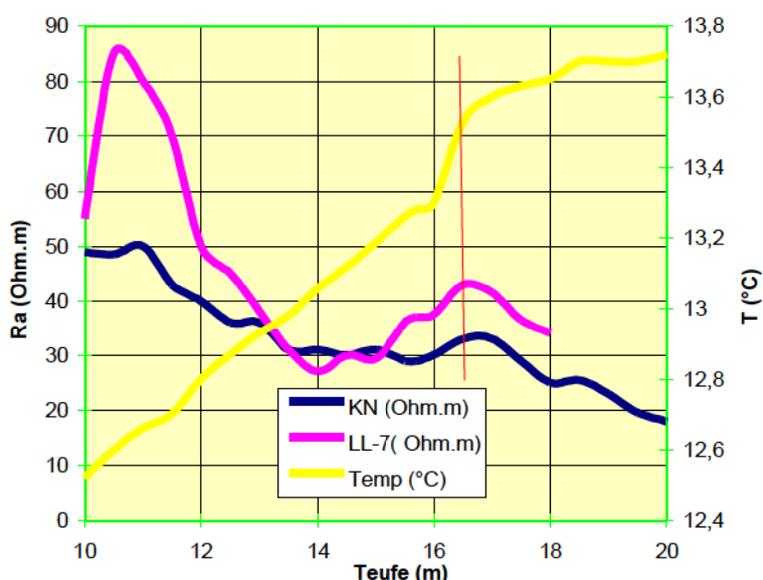


Abb. 4: SafBit 7 - Elektrik und faseroptisches Temperaturmeßsystem im Hinterrohrraum

In der Diskussion wird das sprunghafte Ansteigen der Leitfähigkeit oberhalb des Kohleflöztes auch mit dem Eindringen von Prozeßwässern aus der industriellen Chlorchemie in den Untergrund erklärt (dichteabhängige Schichtung). Das gleichzeitige Auftreten von Temperaturanomalien könnte aber womöglich auch mit erhöhter Aktivität von Mikroorganismen begründet werden.

Die tomografischen Untersuchungen auf Basis direkter galvanischer Stromankopplung an den Untergrund waren durch die Universität Tübingen nur in der durch die Bohrungen SafBit 3 und 4 aufgespannten Ebene vorgenommen worden. Mit dem Verfahren Bohrlochradar (K-UTEC) wurden insgesamt 6 derartige Meßebenen vermessen und damit eine ungleich höhere Datenfülle erzeugt. Registriert

wurden hierbei die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen im Untergrund und ein komplexer, also frequenzabhängiger, elektrischer Widerstand. Prinzipiell lassen sich die Stratifizierungsverhältnisse im Untersuchungsraum bei dieser Datenfülle viel detaillierter abbilden. Für die Umsetzung der Meßwerte in petrophysikalische Größen - wie beispielsweise Porositätswerte - müssen noch Untersuchungen anlaufen. Auch für die Ausdeutung auf kontaminationsbezogene Fragestellungen ergibt sich noch ein weites Betätigungsfeld.

Literatur

- [1] R. MEINHOLD (1965): Geophysikalische Meßverfahren in Bohrungen, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G. Leipzig

Sanierungsforschung in regional kontaminierten Aquiferen (SAFIRA)

Bericht zur Machbarkeitsstudie für den Modellstandort Bitterfeld

Holger Weiß¹⁾, Georg Teutsch²⁾, Birgit Daus¹⁾ (Hrsg.)

1) UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH
PB Industrie- und Bergbaufolgelandschaften
Permoserstraße 15, 04318 Leipzig

2) Eberhard-Karls-Universität
Geologisches Institut
Sigwartstraße 10, 72076 Tübingen