

Lake Mead und Las Vegas



Bild 1: Bohrarbeiten zum Errichten der Grundwassermessstellen  
(Foto: Norma Neuheiser, UFZ)

Bild 2: Ablage des Bohrgutes in Kernkisten (Foto: Ralf Trabitzsch, UFZ)

## BITTE WARTEN – »SIE« WERDEN PLATZIERT

H.-Reinhard Gläser

Wesentliche Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz von *in situ*-Sanierungstechnologien sind nicht nur geeignete Verfahren zum Schadstoffabbau und umfassende Kenntnisse zur Kontaminationssituation, sondern auch eine sorgfältige Standortwahl unter geologischen Gesichtspunkten. Um die untertägig ausgelegten Bauwerke optimal platzieren zu können, waren umfangreiche geologische und geophysikalische Untersuchungen notwendig. Es wurden zahlreiche Erkundungsbohrungen abgeteuft und zu Grundwassermessstellen ausgebaut. Diese Bohrungen reichen meist in den Bereich des tertiären Bitterfelder Kohleflözes hinein.

Die horizontalen Zulaufrohre der in den Untergrund versenkten fünf Forschungsreaktoren strecken sich unmittelbar oberhalb des Bitterfelder Kohleflözes dem Grundwasseranstrom entgegen. Hier – im Basisbereich der weichselkaltzeitlichen Niederterrassenschotter – sind die Konzentrationen an organischen und anorganischen Schadstofffrachten im Grundwasser beachtlich. Die sandig-kiesigen Sedimente des Grundwasserleiters selbst sind von schluffigen Einlagerungen durchsetzt, so dass hydraulisch wirksame Inhomogenitäten im Untergrund auftreten. Will man jedoch die unterschiedlichen Sanierungsverfahren auf deren Effizienz einschätzen, müssen die Zulaufbedingungen aus dem Aquifer vergleichbar oder zumindest bekannt sein.

Die Fragen nach der Homogenität bzw. Inhomogenität der Lagerungsbedingungen und der petrophysikalischen Eigenschaften der Grundwasserleiter (z. B. Porosität, Dichte, Durchlässigkeit) ließe sich theoretisch durch ein sehr engmaschig gefasstes Bohrraster beantworten, wäre jedoch mit einem enormen



Bild 3 und 4: Messung von Fließrichtung und -geschwindigkeit des Grundwassers (Fotos: Norma Neuheiser, UFZ)

finanziellen Aufwand verbunden. Deshalb wurde einer anderen Untersuchungsstrategie der Vorzug gegeben: der tomografischen Untersuchung des Zwischenfeldes von Bohrungen. Dabei steht der Begriff »Tomografie« sinngemäß für Durchstrahlung des Untergrundes.

Die aus den Bohraufschlüssen gewonnenen Informationen lassen sich mit den zurzeit modernsten Methoden der geophysikalischen Zwischenfelderkundung in den Untersu-

chungsraum übertragen. Dabei bietet die Vielzahl der am Untersuchungsstandort vorhandenen Bohrungen die Möglichkeit, die eingesetzten geophysikalischen Verfahren zu kalibrieren. Ordnet man die Bohrungen also optimal an, kann der den Reaktoren vorgelagerte Untergrund nahezu durchgängig bemustert oder »durchleuchtet« werden.

Bei der Standorterkundung war die Sektion Hydrogeologie des UFZ in ein Team von Wissenschaftlern und Ingenieuren aus Universitätsinstituten aber auch gewerblichen Unternehmen integriert. Es wurden zum Teil völlig neuartige geologische und geophysikalische Untersuchungsmethoden eingesetzt und weiterentwickelt.

### Der Spagat

Exemplarisch für die gesamte Zwischenfelderkundung sollen die Messarbeiten zwischen den Messstellen SAFBIT 3 und SAFBIT 4 betrachtet werden. Diese Messstellen und drei weitere waren im Anfangsstadium der Untersuchungen der Basisaufschluss für alle Forschungsaktivitäten. Hier wurden auch alle Register des »geophysikalisch Machbaren« gezogen. Zum Einsatz kamen solche modernen Methoden der Zwischenfelderkundung wie Bohrlochradar, Bohrlochseismik und Geoelektrik. Bei den tomografischen Zwischenfeldmessungen werden verfahrensspezifische Sender und Empfänger in verschiedene Teufenpositionen S1, S2... Sx einer »Sendebohrung« und einer »Empfangsbohrung« E1, E2...Ex eingebracht. Bei seismischen Messungen sind

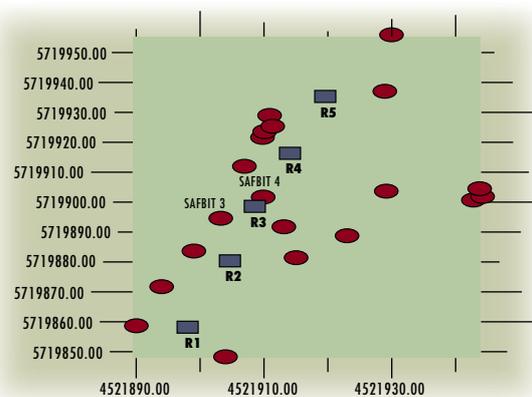
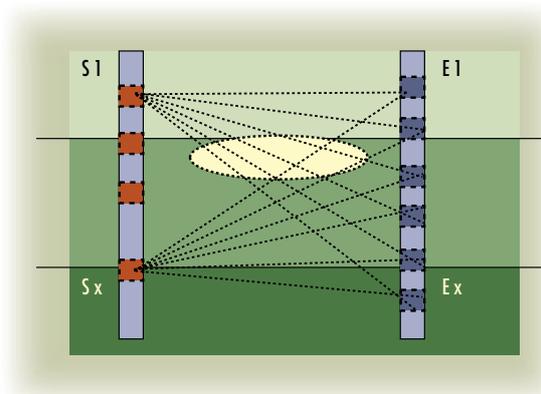


Bild 5: Lageplan der Messstellen und Reaktoren R 1 bis R 5 am Standort SAFIRA



**Bild 6:** Schema zum tomografischen Messprinzip zwischen zwei Bohrungen

dies sendeseitig Erregerquellen bzw. empfängerseitig Schwingungsaufnehmer in Form sogenannter Hydrophone. Im Falle des hochfrequenten Bohrlochradars werden Sende- und Empfangsantennen in die entsprechenden Messstellen am Messkabel eingefahren (Bild 6).

Bei Anwendung der seismischen Tomografie werden über spezielle Anregungsquellen in der »Sendebohrung« Scher- und Kompressionswellen erzeugt und in Richtung der in der Empfangsbohrung versenkten Hydrophonkette geschickt. Aus Laufzeit und Amplitude der beiden Wellentypen lassen sich gesteinsidentifizierende Materialparameter ableiten. Somit können Substratansprachen (Sand, Kies oder Schluff) erfolgen und Substrateigenschaften bestimmt werden. Unter Verwendung geeigneter Interpretationsansätze und unter Zuhilfenahme der Kernbemusterung aus Bohrungen ist es möglich die lithologischen Schichtungsverhältnisse zwischen den Messstellen zu rekonstruieren – also beispielsweise Kiesschichten von Feinsandschichtungen abzugrenzen, lithologische Einlagerungen zu erkennen und Porositätsbestimmungen vorzunehmen. Die Reichweite der am Standort eingesetzten seismischen Messverfahren liegt derzeit bei etwa 35 Metern und legt damit den maximal möglichen Abstand der Messbohrungen fest. Setzt man das Bohrlochradarverfahren ein, muss der Abstand der Bohrungen wesentlich geringer bemessen sein. Unter den spezifischen Standortbedingungen stellen 10 Meter eine Art »Schallmauer« für das Radarverfahren dar.

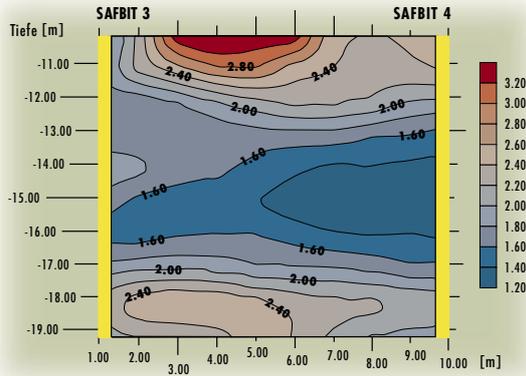
Kombiniert man voneinander unabhängig wirkende Messprinzipien miteinander, erhöht sich die Aussagekraft geophysikalischer Verfahren deutlich. Bei der Radarmethode werden analog zur Seismik Geschwindigkeiten der sich im Untergrund ausbreitenden – diesmal hochfrequenter elek-

tromagnetischer – Wellen bestimmt. Zusätzlich wird aber auch der komplexe Wechselstromwiderstand des Bodens erfasst. Die Frequenzabhängigkeit dieses komplexen Widerstandes bietet die Möglichkeit nicht nur Informationen zum Schichtungs Aufbau zu erhalten; es kann bei hohem Belastungsgrad prinzipiell auch die qualitative Konzentration der Schadstoffe im Grundwasser integral erfasst werden. Welche Zusammenhänge zwischen den dielektrischen Eigenschaften des Untergrundes und der Kontamination bestehen, sollen künftige Untersuchungen zeigen.

Der Summenparameter Leitfähigkeit charakterisiert unter anderem den Löseinhalt an Sulfaten und Chloriden – also den Salzgehalt – im Grundwasser. Am Untersuchungsstandort sind diese Komponenten infolge industrieller Prozesse massiv direkt in den Untergrund versickert. Die beim Abbau chlorierter Kohlenwasserstoffe (CKW) ebenfalls entstehenden Chloride spielen – gemessen am Gesamtgehalt – zwar nur eine untergeordnete Rolle; das technologisch induzierte und gesteuerte Abbauverhalten dieser CKW ist aber das eigentliche Hauptuntersuchungsziel am Forschungsstandort. Die übliche Bestimmungsprozedur der Leitfähigkeit anhand einer Probenahme ist bekannt. Zwar nicht mit exakter Genauigkeit, aber dafür mit einem flächenrepräsentativen Charakter, sind geophysikalische Verfahren in der Lage den elektrischen Widerstand des Porenwassers und damit dessen Kehrwert – die Leitfähigkeit – abzuschätzen.

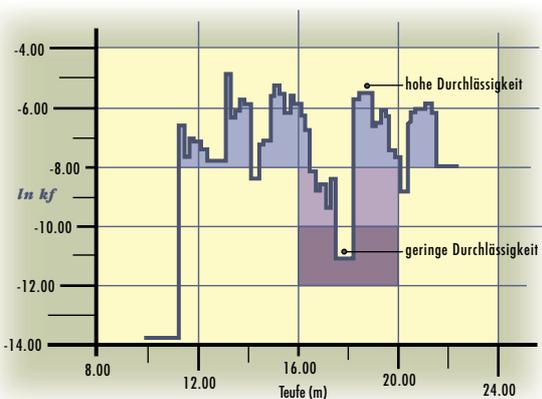
Die Kombination von seismischer und Radartomografie zwischen den Messstellen SAFBIT 3 und SAFBIT 4 ermöglichte primär eine flächenhafte Bestimmung von seismischen Geschwindigkeiten und elektrischen Widerständen. Aus beiden Methoden lässt sich verknüpft über den sogenannten Formationsfaktor die Porosität bestimmen. Dieser Zusammenhang ist seit langem aus der Kohlenwasserstoffexploration bekannt und in der sogenannten ARCHIE-Gleichung verankert. Grundvoraussetzung für dieses Herangehen ist ein Überwiegen der sandig-rölligen Matrix gegenüber bindigen Bestandteilen des Gesteines. Im (in der Natur nie eintretenden) Idealfall sind die aus beiden Verfahren bestimmten Porositätswerte einander gleich.

Im vorliegenden Beispiel wurden anhand von teufenselektiven Beprobungen über sogenannte »Inlinepacker« – eine Entwicklung der Universität Tübingen – aus den beiden vollkommen verfilterten Messstellen SAFBIT 3 und SAFBIT 4 Wasserproben gewonnen. Deren Analyse lieferte die methodischen Basiswerte zur Untersuchung des Zwischenfeldes.



**Bild 7:** Leitfähigkeitsverteilung (mS/cm) des Grundwassers zwischen zwei Messstellen

Das abgebildete Leitfähigkeitsmuster reflektiert offensichtlich auch die petrophysikalischen und hydraulischen Eigenschaften des Substrates der untersuchten Messebene (Bild 7). Im Ergebnis der an beiden Messstellen vorgenommenen Flowmetermessungen korrelieren hohe Leitfähigkeit des Grundwassers und der Durchlässigkeitsbeiwert des Gesteines für das Wasser  $k_f$  (Bild 8). Die dem Zufluss proportionale Drehzahl des Flowmeterpropellers lässt sich durch mathematische Zwischenrechnungen in ein Durchlässigkeitsprofil des Grundwasserleiters umrechnen. Geoelektrische Potentialmessungen in Multielektrodenanordnung sind in industriellen Gebieten oftmals durch Störpotentiale (z. B. Erdungen, Eisenbahntrassen, Industrieanlagen) geprägt. Dies trifft sowohl für reine Oberflächenmessungen als auch für tomografische Messungen von Bohrung zu Bohrung zu. Im letzteren Fall kann die Stromankopplung ans »Gebirge« (Untergrundschichten) nur über Installation der Elektrodenbäume an die Außenwandung der Messstellenverrohrung ermöglicht werden. Eine



**Bild 8:** Interpretationsergebnis aus einer Flowmetermessung (Quelle: Universität Tübingen)



**Bild 9:** Multielektrodenanlage für SIP-Messung der Universität Leipzig am Standort SAFIRA (Foto: H.-Reinhard Gläser, UFZ)

Spezialform der elektrischen Potentialmessungen stellt die Methode der Spektralen Induzierten Polarisation SIP dar, (Bild 9).

In der Konfiguration von jeweils einem angesteuerten Einspeise- und einem Messelektrodenpaar wird bei diesem Messverfahren die Frequenzabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes der Bodenschichten ausgenutzt. Bei Verwendung verschiedener Arbeitsfrequenzen werden Amplitude und Phase der gemessenen Spannungen in Relation zum Einspeisestrom gesetzt. Offensichtlich ist die Grundvoraussetzung dafür, dass ein Aufladungsvorgang (Polarisation) im Untergrund auftritt – das sind der Wechsel von elektrolytischen und elektronischen Leiteigenschaften bzw. die variable Elektrolytbeweglichkeit im Porenraum – am Untersuchungsstandort gegeben. Weitere geologische und geophysikalische Untersuchungen sollen auf Basis der vorhandenen umfassenden analytischen Daten neue methodische Perspektiven bieten, um den »Kontaminationszustand« im Untergrund zu beschreiben.



**Bild 10:** Propellerflowmeter (Foto: Ralf Trabitzsch, UFZ)

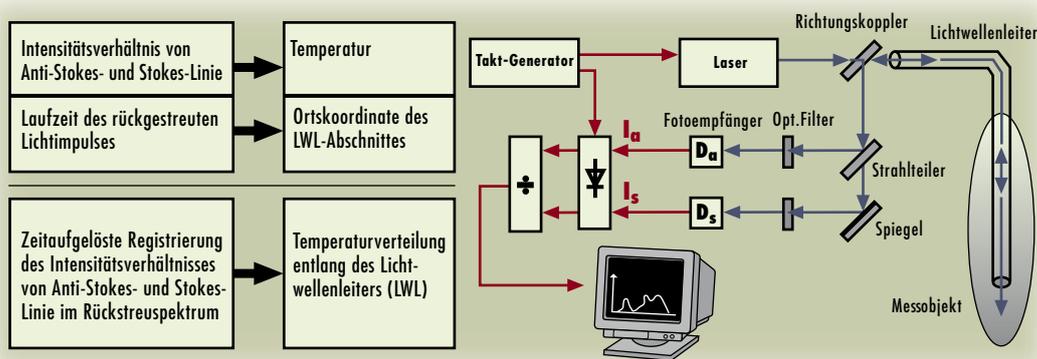


Bild 11: Prinzipdarstellung des faseroptischen Temperaturmessprinzips (Quelle: GESO Jena)

## Thermalbad Bitterfeld ?

Dass unter Großstädten und Industrieflächen anomale Grundwassertemperaturen beobachtet werden können, ist so selten nicht. Auch der Großraum Bitterfeld hat warme Füße. Das quartäre und tertiäre Temperaturfeld zeigt gegenüber den regional unbeeinflussten Werten Erhöhungen von bis zu 5 Kelvin. Am Standort SAFIRA ist der enge Zusammenhang zwischen Temperaturfeldanomalien und Grundwasserkontamination bekannt. So wundert es nicht, dass Temperaturmessungen auch hier ein großes Interesse finden. Normalerweise werden Temperaturen mittels Bohrlochmesstechnik als sogenannte »Logs« aufgezeichnet. Für Spezialuntersuchungen oder Langzeitaufzeichnungen eignet sich der Einsatz eines faseroptischen Temperaturmesssystems. Zu diesem Zwecke wird ein Glasfaserkabel schleifenförmig in den Ringraum zwischen Verrohrung und »Gebirge« permanent eingebracht. Über das gesamte Kabel werden die teilweise temperatursensitiven Streulichtkomponenten (Anti-Stokes und Stokes-Linie) von pulsformig eingekoppeltem Laserlicht registriert. Im Ergebnis dieser Raman-Streulichtprofilierung können hochempfindlich und ortsauflösend thermische Phänomene im Untergrund detektiert werden. Der Vorteil dieser Messtechnologie besteht darin, dass zeitgleich das gesamte Bohrprofil erfasst werden kann, ohne die Störeffekte einer im Bohrloch bewegten Messsonde in Kauf nehmen zu müssen. Derartige Messsysteme wurden in drei Bohrungen am Standort Bitterfeld eingebaut. Während der Pumpversuche in verschiedenen Messstellen wurden Temperaturdauerbeobachtungen durchgeführt. Dabei konnte ein anisotropes Strömungsverhalten des Grundwasserstromes im Aquifer – durch die Pumpversuche in verschiedene Richtungen erzwungen – beobachtet werden.

## Zusammenfassung

Zur Vorerkundung des Standortes SAFIRA waren zahlreiche Bohraufschlüsse und Analysen am Bohrkern und Grundwasser erforderlich, die im Verbund mit geophysikalischen Messungen eine detaillierte zweidimensionale Strukturierung des Untergrundes ermöglichten. Dabei konnten methodische Fortschritte erzielt werden, die eine komplexe Beschreibung der Untergrundsituation unter den standorttypischen Umweltbedingungen erlauben. Die Kombination physikalisch unterschiedlich wirkender Messprinzipien eröffnet ein weitreichendes Forschungsfeld und lässt immer detailliertere hydrogeologische und zum Teil auch kontaminationsbezogene Aussagen zu. Der Einsatz moderner faseroptischer Temperaturmesssysteme hat sich vor Ort bewährt und bietet Möglichkeiten der Dauerbeobachtung innerhalb des gesamten Monitoringprogrammes.

### Literatur

- [1] Knödel et. al (1997) Handbuch zur Erkundung von Deponien und Altlasten, Band 3, Springer Verlag



## *English Abstract*

*Please wait  
»you« will be placed*

H.-Reinhard Gläser

In addition to comprehensive knowledge of the pollution situation and appropriate methods for pollutant degradation, successful onsite reclamation technologies require carefully choosing the investigation site. Identifying a suitable site for subsurface investigations entailed plenty of geological and geophysical measurement. Therefore numerous boreholes were drilled down to the Tertiary lignite seam and expanded to form groundwater measuring points.

The underground pilot plants installed employ a double pipe system which extends horizontally towards the groundwater stream, directly above the Bitterfeld lignite seam. High concentrations of both organic and inorganic soil and groundwater pollutants have been discovered on the base layers of Weichsel Cold Stage gravel here. The aquifer sands and gravel are partly penetrated by silty or clay deposits. To compare the success of the five pilot plants using different methods of groundwater treatment, the hydraulic conditions in the subsurface must be known exactly.

Although questions concerning stratification conditions, the degree of homogeneity and hydraulically relevant parameters such as density, hydraulic conductivity and porosity can theoretically be tackled using a dense drilling programme, this is very expensive. Therefore, tomographic investigations were carried out instead as hole-to-hole measurements.

Geological information derived by core analysis can be used to calibrate such tomographic measurements, along with bore-hole radar and seismic measurements. An optimal pattern of well spacing enables the nearly complete two-dimensional description of the stratigraphic sequence in the zone in front of the pilot plants.

A team of engineers and scientists from several universities, the UFZ's Department of Hydrogeology and also commercial companies were involved in site exploration and investigation.