

Programm Lebensgrundlage Umwelt
und ihre Sicherung (BWPLUS)

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

Einsatz von tomographischen Verfahren in Horizontalbohrungen

von

G. Teutsch und P. Dietrich

Universität Tübingen
Lehrstuhl für Angewandte Geologie

Förderkennzeichen: PW 97.194

Die Arbeiten des Projekts "Wasser, Abfall, Boden" wurden mit Mitteln des Landes Baden-
Württemberg gefördert

August 2000

Einsatz von tomographischen Verfahren in Horizontalbohrungen

G. Teutsch & P. Dietrich

Geologisches Institut, Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Tübingen

Zusammenfassung

Eine genaue Kenntnis der Untergrundstrukturen sowie Grundwasserfließbedingungen ist eine wesentliche Voraussetzung für die Planung und Durchführung von effektiven in-situ Sanierungsmaßnahmen. Da der geologische Aufbau des Untergrundes i.a. sehr komplex ist, fällt es oft schwer, Aussagen über ein Untersuchungsgebiet allein durch die Auswertung der aus vertikalen Bohrungen gewonnenen Informationen zu treffen. Geeignete Methoden zur hochauflösenden Erkundung des Bereichs zwischen vorhandenen Bohrungen sind geotomographische Verfahren. Bisher beschränkte sich ihr Einsatz jedoch auf vertikale Bohrungen, wodurch Untersuchungen nur über kurze Entfernungen mit einem vertretbarem Zeit- und Kostenaufwand möglich waren. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde deshalb die Geotomographie insbesondere hinsichtlich der Messausrüstung für den Einsatz in Horizontalbohrungen weiterentwickelt. Mit der Durchführung verschiedener Tests konnte die Einsetzbarkeit der weiterentwickelten Messausrüstung in Horizontalbohrungen nachgewiesen werden. Des Weiteren wurden eine quantitative Interpretationsmethode entwickelt, die es erlaubt, die geophysikalisch-tomographischen Messergebnisse gemeinsam mit den hydrogeologischen Daten auszuwerten. Diese Methode wurde unter Verwendung von synthetischen Modellen validiert, die aus Aufschlussuntersuchungen abgeleitet wurden. Um die Nutzungsmöglichkeiten der Verwendung von Horizontalbohrungen für Erkundungszwecke einschätzen zu können, erfolgte im Rahmen des Projekts auch ein Kostenvergleich zu der auf Vertikalbohrungen gestützten Standorterkundung.

The application of tomographic methods in horizontal wells

G. Teutsch & P. Dietrich

Summary

An exact knowledge of the subsurface structures and local groundwater flow conditions is an essential prerequisite for the planning and implementation of efficient in-situ remediation measures. As the geology of the subsurface is usually complex in nature, a reliable interpretation of the subsurface at an area of interest based only on vertical borehole data is hardly possible. High resolution geotomographic methods are a powerful tool for investigations of the subsurface between existing boreholes. Geotomography was so far applied in vertical boreholes only. Due to the costs and effort involved, the application of geotomography was generally limited to short distances. Therefore, the tomographic methods were developed within a research project for their application in horizontal wells. A special emphasis has been placed in this research project on the development of geotomographical measuring equipment for application in horizontal wells. Several field tests demonstrated the applicability of the new prototype equipment for its use in horizontal wells. In addition, an innovative interpretation method has been developed that allows a simultaneous interpretation of geophysical-tomographical experimental data in conjunction with available hydrogeological data. This new method was validated using synthetical models deduced from detailed outcrop investigations. In order to be able to assess the advantages of the use of horizontal wells for subsurface investigations, a cost-benefit comparison with respect to previous site investigation based on vertical boreholes was also performed.

<u>1</u>	<u>Einleitung</u>	1
<u>2</u>	<u>Vorteile der Verwendung von Horizontalbohrungen</u>	2
<u>3</u>	<u>Weiterentwicklung der Ausrüstung für geotomographische Messungen in Horizontalbohrungen</u>	5
<u>3.1</u>	<u>Weiterentwicklung der Ausrüstung für die seismische Tomographie</u>	6
<u>3.2</u>	<u>Anpassungen für die geoelektrischen Messungen</u>	8
<u>3.3</u>	<u>Test und Auswahl von Transportsystemen</u>	9
<u>4</u>	<u>Erstellung einer Horizontalbohrung für Forschungszwecke</u>	10
<u>5</u>	<u>Durchführung von tomographischen Messungen in der Horizontalbohrung</u>	14
<u>5.1</u>	<u>Durchführung seismischer tomographischer Messungen</u>	14
<u>5.2</u>	<u>Durchführung der geoelektrischen Tomographie zur Strukturerkundung</u>	16
<u>5.3</u>	<u>Durchführung der geoelektrischen Tomographie zur Erkundung der Fließbedingungen</u>	17
<u>6</u>	<u>Quantitative hydrogeologische Interpretation der tomographischen Messungen</u>	20
<u>7</u>	<u>Kostenvergleich Horizontalbohrungen - Vertikalbohrungen</u>	24
<u>8</u>	<u>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</u>	28
	<u>Literaturverzeichnis</u>	29

1 Einleitung

Für verschiedene hydrogeologische und geotechnische Aufgabenstellungen, wie z.B. die Planung und Durchführung von in-situ Sanierungsmaßnahmen, ist eine detaillierte Erkundung der Untergrundstrukturen und der Fließbedingungen erforderlich. Die Erkundung stützt sich in der Regel auf die Gewinnung von Informationen mittels Bohrungen und Sondierungen (BUTLER 1997, PRINZ 1991, SCHREINER & KREYSING 1998). Aussagen zu den Bereichen zwischen den Bohrungen werden i.a. nur durch Interpolationen abgeleitet. Um die oft sehr heterogene Struktur eines Grundwasserleiters zu erfassen, verwenden alternative Ansätze zur Beschreibung der Bereiche zwischen den Bohrungen Methoden der angewandten Geostatistik, welche auf der räumlichen Auswertung der Bohrlochinformationen basieren (ATKIN & SIEMENS 1988, ISAAKS & SRIVASTAVA 1989). Die so gewonnenen Parameter ermöglichen eine stochastische Beschreibung der Strömungs- und Transportprozesse unter den spezifischen Standortbedingungen (DAGAN 1989). Die Durchführung von umfangreichen Felduntersuchungen in verschiedenen hydrogeologischen Testfeldern, wie z.B. in Borden (MACKAY et al. 1986), in Cape Cod (LEBLANC et al. 1991) und auf der "Horkheimer Insel" (PTAK et al. 1996) zeigen jedoch, dass für eine solche geostatistische Charakterisierung ein sehr umfangreicher Aufwand an Bohrungen und Messungen zur Bestimmungen der geostatistischen Parameter der hydraulischen Durchlässigkeitsverteilung erforderlich ist.

Mit der i.a. nur geringen Anzahl von verfügbaren Bohrungen können jedoch bei einem komplexen geologischen Aufbau des Untergrundes die für Transport- und somit Sanierungsprozesse relevanten Strukturen verfehlt oder oft nur unzureichend erfasst werden. Deshalb ist der Einsatz von Verfahren zur Erkundung des Bereiches zwischen Bohrungen erforderlich. In der Hydrogeologie werden hierfür insbesondere Pumpversuche (KRUSEMAN & DE RIDDER 1990) und Tracerverfahren (KÄSS 1992, KRANJC 1997) eingesetzt. Die Interpretation der mit diesen Verfahren gewonnen Daten beschränkt sich jedoch i.a. auf die Bestimmung mittlerer Kennwerte der gesuchten hydrogeologischen Parameter. Eine räumlich detailliertere Bestimmung der Parameterverteilung basierend auf einer Auswertung der Daten von Pumpversuchen und von Zeitreihen der Grundwasserstände, z.B. im Zusammenhang mit der Kalibrierung von Grundwassermodellen, ist oft nur unter vereinfachenden Annahmen über den Aufbau des Grundwasserleiters möglich (SUN 1994).

Eine alternative Möglichkeit zur Gewinnung von räumlich kontinuierlichen Informationen zum Aufbau von Boden und Grundwasserleitern ist der Einsatz geophysikalischer Verfahren. Wie ein in den Jahren 1993-1996 durchgeführtes PWAB- Projekt (PW 93-133, TEUTSCH et al. 1996) gezeigt hat, eignen sich für die hochauflösende Erkundung von sanierungsrelevanten Strukturen und Fließwegen tomographische Verfahren. Diese Verfahren ermöglichen es, räumlich differenziert relevante Parameter (Geometrie geologischer Strukturen, petrophysikalische Kennwerte) zwischen Bohrungen zu bestimmen. Aufgrund der limitierten Reichweite der Verfahren und der bei größeren Bohrlochabständen geringer werdenden Struktur- und Detailauflösung konnten bis-

her allerdings unter Verwendung von vertikalen Bohrungen nur kleinräumige Bodenbereiche (ca. 20-30m) mit einem vertretbarem Zeit- und Kostenaufwand untersucht werden. Um die tomographischen Verfahren auch über längere Profile kostengünstig für die Erkundung des Untergrundes und für die Überwachung von Sanierungsmaßnahmen anwenden zu können, erfolgte im Rahmen des PWAB-Projekts PW-97 194 die Weiterentwicklung und Erprobung der tomographischen Messtechnik für den Einsatz in Horizontalbohrungen. Um die quantitative hydrogeologische Interpretation der Ergebnisse der tomographischen Messergebnisse zu verbessern, wurde des weiteren in dem Projekt eine Interpretationsmethode entwickelt, die es erlaubt, die geophysikalisch-tomographischen Messergebnisse gemeinsam mit den hydrogeologischen Daten auszuwerten. Um die ökonomischen Vorteile der Verwendung von Horizontalbohrungen für Erkundungszwecke gegenüber der Verwendung von Vertikalbohrungen einschätzen zu können, erfolgte im Rahmen des Projekts auch ein Kostenvergleich dieser unterschiedlichen Erkundungsansätze.

Beginnend mit einer Erläuterung der Vorteile, die sich aus der Verwendung von Horizontalbohrungen für die Durchführung tomographischer Messungen ergeben (Abschnitt 2), soll in den folgenden Abschnitten die im Rahmen des Projekts durchgeführten Weiterentwicklungen der tomographischen Messtechnik (Abschnitt 3) sowie die Arbeiten zur Erstellung der für Testzwecke notwendigen Horizontalbohrung kurz vorgestellt werden (Abschnitt 4). Des weiteren werden die Ergebnisse von Feldmessungen mit den tomographischen Meßmethoden (Abschnitt 5) sowie die neuentwickelten Methode zur quantitativen hydrogeologischen Interpretation tomographischer Messungen (Abschnitt 6) dargestellt. Daran anschließend erfolgt für ein ausgewähltes Beispiel im Abschnitt 7 ein Kostenvergleich zwischen einer auf vertikale Bohrungen und einer auf eine Horizontalbohrung gestützten Erkundung. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse und allgemeine Schlussfolgerungen zur Verwendung von Horizontalbohrung für die Sanierungsvorerkundung sind in Abschnitt 8 zu finden.

2 Vorteile der Verwendung von Horizontalbohrungen

Die Horizontalbohrtechnik wird seit Ende der zwanziger Jahre bereits in der Erdölindustrie eingesetzt. Sie wurde damals entwickelt, um die Erschließungskosten von Lagerstätten zu reduzieren. Die Nutzung der Horizontalbohrtechnik für die Erschließung und vor allem für die Sanierung des Grundwassers begann erst gegen Ende der achtziger Jahre, nachdem die Horizontalbohrtechnik für das grabenlose Verlegen von Rohren und Leitungen weiterentwickelt und erfolgreich eingesetzt wurde (CHARLES MACHINE WORKS 1996, GORANSON 1992, KABACK et al. 1989). Diese weiterentwickelte Bohrtechnik erlaubt je nach Untergrund die Verlegung von Leitungen und Rohren über eine Länge von bis zu 400 m und in eine Tiefe bis zu 50 m. Für die Grundwassersanierung bieten die mit dieser Technik herstellbaren Horizontalfilterbrunnen u.a. folgende Vorteile (DOE 1997, SAWYERS & LIEUALLEN-DULAM 1998):

- Horizontalbohrungen können auch unter Bebauungen und in anderen für Vertikalbohrungen nicht zugänglichen Bereichen, z.B. unter Altlasten, installiert werden, wo sich Quellen für den Schadstoffeintrag ins Grundwasser befinden.
- Auf Grund der i.a. geringen vertikalen Mächtigkeit und der großen laterale Ausdehnung von Schadstofffahnen, kann mit entsprechend der Schadstofffahne ausgerichtete Horizontalbohrungen eine effektivere in-situ Sanierung durchgeführt werden als mit Vertikalbohrungen.
- Mit Horizontalbohrungen kann auch mit einem geringeren Aufwand als mit Vertikalbohrungen der Abstrom einer Altlast hydraulisch gesichert werden.

Diese Vorteile führen dazu, dass trotz teilweise höherer Bohrkosten als bei Vertikalbohrungen bei in-situ Sanierung mittels Horizontalbohrungen signifikante Kosteneinsparungen gegenüber herkömmlichen Sanierungsverfahren möglich sind. Deshalb werden z.B. in den USA seit 1995 weit über hundert Horizontalbohrungen pro Jahr für Sanierungszwecke errichtet (KABACK & OAKLEY 1999).

Wie für die Grundwassersanierung eröffnet die Horizontalbohrtechnik auch der Anwendung der geotomographischen Verfahren neue Möglichkeiten. Die Eignung von tomographischen Verfahren zur Erkundung von sanierungsrelevanten Strukturen und Fließwegen konnte innerhalb des PWAB-Projekts PW 93-133 an verschiedenen Standorten bereits demonstriert werden (TEUTSCH et al. 1996). Der Einsatz dieser Verfahren war bisher jedoch auf vertikale Bohrungen beschränkt, wodurch nur über kurze Entfernungen (20 - 30 m) tomographische Untersuchungen mit einem vertretbarem Zeit- und Kostenaufwand möglich waren. Die Verwendung von Horizontalbohrungen würde dagegen erlauben, kostengünstiger als bisher hochauflösende tomographische Messungen kontinuierlich entlang von ausgedehnten Profile (100 - 200 m) durchzuführen. Aufgrund der gegenüber der Verwendung von Vertikalbohrungen veränderten Messgeometrie, die u.a. zu einer besseren Strahlüberdeckung im Untersuchungsbereich führt, könnte durch tomographische Messungen unter Verwendung von Horizontalbohrungen auch eine bessere Auflösung als bisher in der Erkundung von Untergrundstrukturen erreicht werden (siehe Abb. 1).

Durch die Verwendung von Horizontalbohrungen, die z.B. quer zur Grundwasserfließrichtung im Abstrom von kontaminierten Bereichen installiert werden, könnten des weiteren durch die Kombination geoelektrischer Messungen mit der Einleitung von Salztracern räumlich kontinuierliche Aussagen zu den hydraulischen Bedingungen über einen ausgedehnten Querschnitt getroffen werden. Insbesondere ermöglicht diese Anwendung von tomographischen Messungen eine zuverlässigere Detektion bevorzugter natürlicher Fließwege als dies mit Vertikalbohrungen möglich ist (siehe Abb. 2). Die Kenntnis dieser Fließwege ist insbesondere für passive Sanierungsverfahren von Interesse.

Des weiteren könnte der Einsatz der tomographischen Verfahren in Horizontalbohrungen für die Bewertung von Schadensfällen unter bereits bebautem Gelände und in Festgesteinsaquiferen eine kostengünstige Alternative zu herkömmlichen Verfahren sein. Weitere potentielle Anwendungsmöglichkeiten für die Kombination der geotomographischen Verfahren mit

Einsatz tomographischer Verfahren in Horizontalbohrungen

Horizontalbohrungen wären die Überwachung von Sanierungsmaßnahmen und die Bewertung von Sanierungserfolgen.

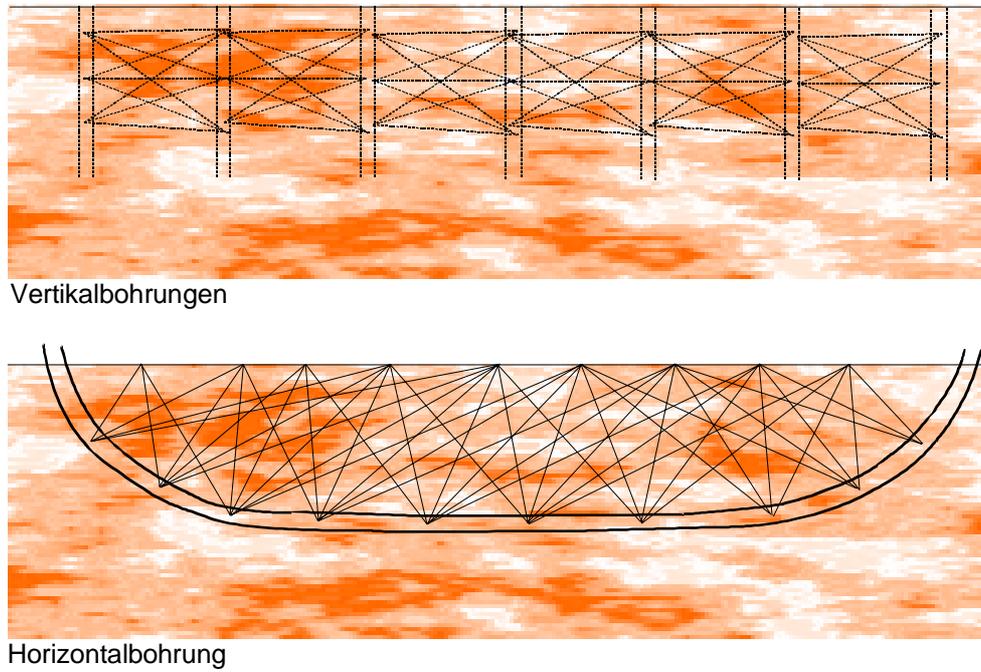


Abbildung 1: Prinzipskizze zur Veranschaulichung der durch die Verwendung unterschiedlicher Bohrungstypen geänderten Strahlüberdeckung bei tomographischen Messungen.

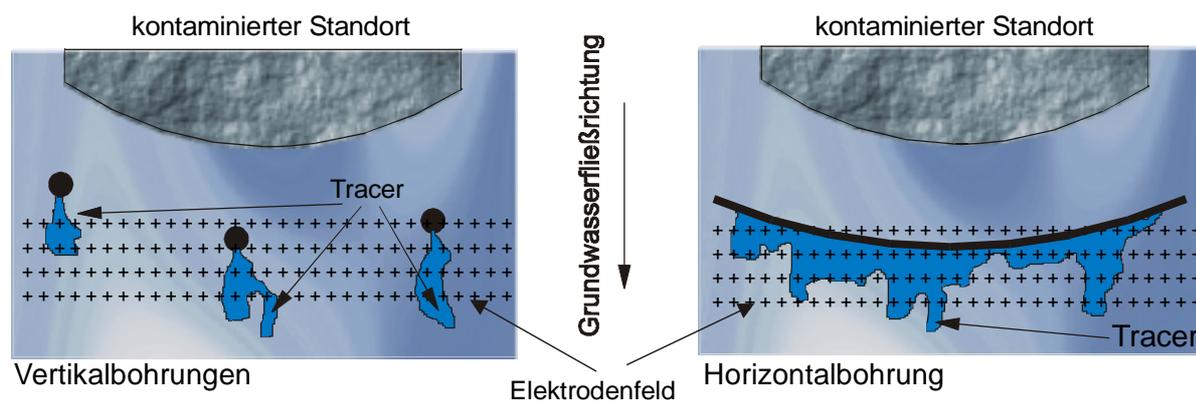


Abbildung 2: Durchführung von geoelektrischen Messungen in Kombination mit Salztracerversuchen zur Ermittlung der Grundwasserfließbedingungen unter Verwendung von Vertikalbohrungen oder einer Horizontalbohrung.

3 Weiterentwicklung der Ausrüstung für geotomographische Messungen in Horizontalbohrungen

Die Möglichkeiten der vor Projektbeginn zur Verfügung stehenden tomographischen Messausrüstung waren auf einen Einsatz in vertikalen Bohrlöchern ausgerichtet. Die technische Herausforderung bei der Anpassung der tomographischen Messausrüstung für den Einsatz in Horizontalbohrungen ergab sich daraus, dass auf Grund der fehlenden Schwerkraftwirkung beim Einbringen der Messausrüstung sowohl die genaue Positionierung der Signalgeber und Signalaufnehmer als auch der Transport von Messketten mit einer großen Anzahl von Signalaufnehmern, z.B. 24 und mehr für eine effektive Durchführung der seismischen Tomographie, wesentlich schwieriger ist als in Vertikalbohrungen. Des weiteren wurde bei der Untersuchung der Machbarkeit tomographischer Messungen in Horizontalbohrungen als potentielle Probleme der Schlemmeintrag, die Verbindungsnahte zwischen den einzelnen Rohrtouren und die mögliche Ungleichmäßigkeit der Rohrhinterfüllung festgestellt (siehe Abb. 3). Die beiden ersten Probleme stehen im Zusammenhang mit einem sicheren Transport der Messausrüstung durch die Bohrung. Wenn diese Probleme nicht gelöst werden, kann es über ein Verklemmen der Ausrüstung beim Transport durch die Bohrung zu einer Beschädigung oder gar zu einem Verlust der Messausrüstung in der Bohrung kommen. Im Falle eines Verlustes kann die Horizontalbohrung für andere Zwecke, z.B. Pump- oder Drainagemaßnahmen, nur noch eingeschränkt oder gar nicht genutzt werden. Das dritte Problem, eine mögliche ungleichmäßige Bohrhinterfüllung ist für die seismische Tomographie von Bedeutung, da dies zu Ankopplungsproblemen und somit zu einer schlechten Signalqualität führen kann.

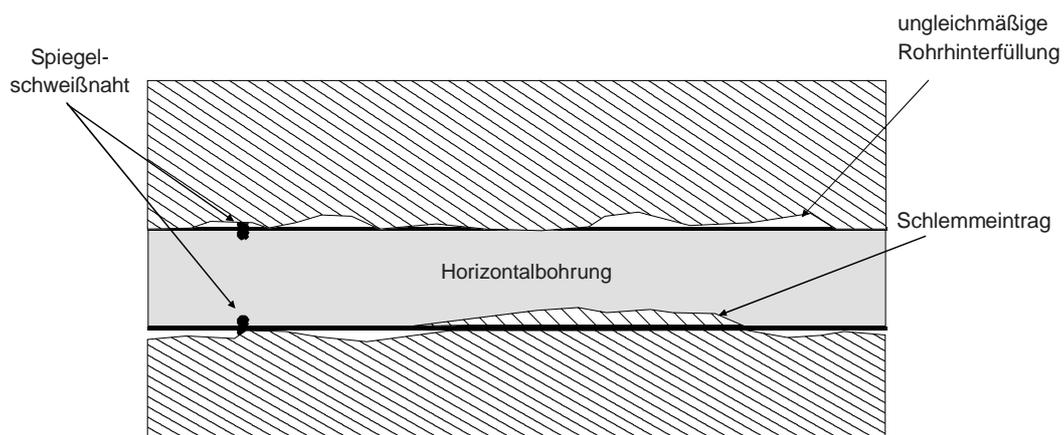


Abbildung 3: Potentielle Probleme für die Durchführung von tomographischen Messungen in Horizontalbohrungen

Die genannten Probleme sind jedoch im Zusammenhang mit der Erstellung und einer Wartung der Bohrung lösbar. Die in die Rohrtour reinragenden Spiegelschweißnähte müssen im Falle des geplanten Einsatzes geotomographischer Methoden bei der Herstellung der Rohrtour für den

Endausbau einer Horizontalbohrung mit speziellen Schälgeräten entfernt werden. Eine nachträgliche Entfernung in der komplett ausgebauten Rohrtour ist bisher nicht möglich. Wenn die inneren Spiegelschweißnähte nicht mehr vorhanden sind, kann das durch Schlemmeintrag innerhalb der Bohrung abgelagerte Material durch Firmen, die normale Abwasserkanäle reinigen, entfernt werden. Das Problem einer ungleichmäßigen Rohrhinterfüllung tritt i.a. nur in stark verfestigten Sedimenten und relativ selten auf. Unter diesen Standortbedingungen kann eine gleichmäßige Rohrhinterfüllung durch eine Verkiesung der Bohrung erreicht werden. Eine Verkiesung ist jedoch grundsätzlich mit einer Vergrößerung des benötigten Bohrdurchmessers verbunden, was bei Horizontalbohrungen zu einer wesentlichen Kostensteigerung führen kann (SASS 1995).

3.1 Weiterentwicklung der Ausrüstung für die seismische Tomographie

Ziel der Arbeiten zur Weiterentwicklung der Messausrüstung für die seismische Tomographie war es, die Messungen sowohl vom Horizontalbohrloch zur Erdoberfläche als auch umgekehrt durchführen zu können. Das bedeutete, dass sowohl Signalaufnehmer als auch eine seismische Signalquelle für den Einsatz in der Horizontalbohrung benötigt wurden.

Besondere Herausforderungen waren bei der Entwicklung der aus den Signalaufnehmern bestehenden Messketten zu bewältigen. Diese Herausforderungen bestanden zum einen darin, dass die Abstände zwischen den einzelnen Aufnehmer variabel sein sollten, um auch in unterschiedlich langen Bohrungen effektiv messen zu können. Zum anderen sollten die Signalaufnehmer auch für unterschiedliche Bohrlochdurchmesser geeignet sein. Zunächst waren Geophonen als Signalaufnehmer vorgesehen, um auch eine richtungsabhängige Aufnahme der Signale zu ermöglichen. Um eine gerichtete Ankopplung der Geophone an die Bohrlochwand zu erreichen wurden verschiedene Trägersysteme entwickelt und getestet (siehe Abb. 4 (a) und (b)). Die durchgeführten Tests zeigten jedoch, dass insbesondere bei langen Horizontalbohrungen eine exakte Ausrichtung der Geophone nicht zu gewährleisten ist. Des Weiteren entstand durch das erforderliche Anpressen der Geophone ein zusätzliches Risiko für den Transport durch die Horizontalbohrung, welches durch die Gefahr einer unzureichenden Rückstellung der Geophone nach Abschalten des Anpressdrucks verursacht wird.

Auf Grund dieser Resultate wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Geomesstechnik (Bad Salzdetfurth) für die Registrierung der seismischen Signale ein neuartiges, aus Hydrophonen bestehendes Meßsystem entwickelt. Im Gegensatz zu den Geophonen erfassen die Hydrophone (siehe Abb. 4 (c)) die seismischen Signale richtungsunabhängig. Damit entfällt die Notwendigkeit der Ankopplung der Signalaufnehmer, wodurch auch keine Dimensionierung der Ausrüstung auf den Innendurchmesser der Horizontalbohrung mehr erforderlich ist. Es muss nur noch gewährleistet werden, dass die Bohrung im Bereich der Hydrophone vollständig wassererfüllt ist. In ungesättigten Bereichen kann dies durch die Verwendung von innen mit Wasser befüllbaren Schlauchpackern erreicht werden. Bei dem neuentwickelten Meßsystem verfügt des Weiteren jedes der Hydrophone über eine eigene, separate Datenleitung. Dies ermöglicht es, dass die

Hydrophone in einem an die konkreten Untersuchungsbedingungen angepassten Abstand zu einer Messkette zusammengebaut werden können.

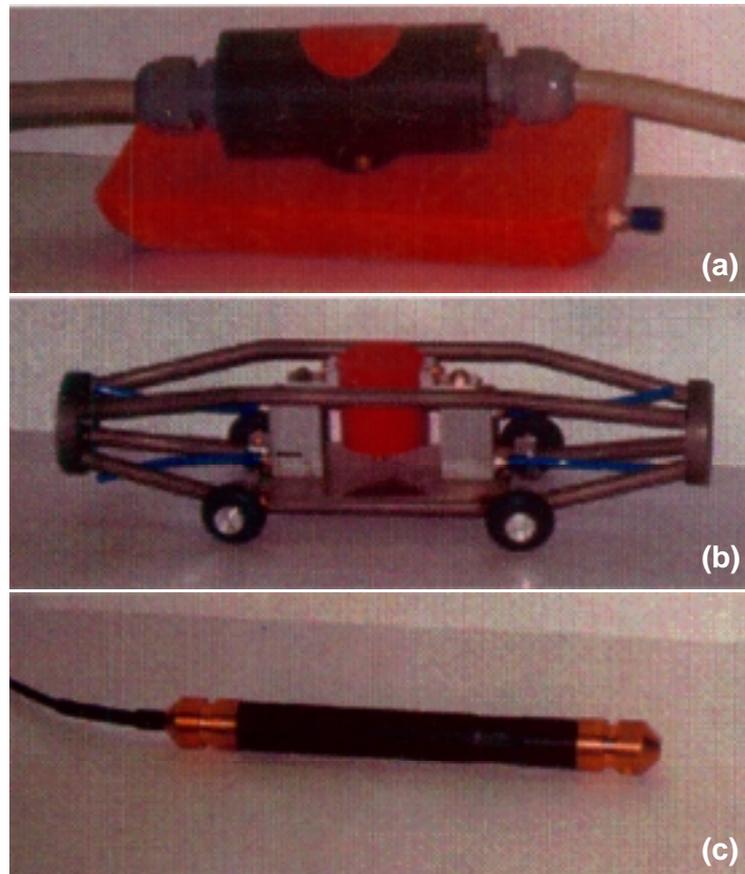


Abbildung 4: Entwicklungsstufen der seismischen Aufnehmer. Erster (a) und zweiter (b) Prototyp für die Verwendung von Geophonelementen zur Registrierung von seismischen Signalen in einer Horizontalbohrung. (c) Hydrophon.

Das Auflösungsvermögen der seismischen Tomographie hängt neben der Messgeometrie wesentlich von der Wellenlänge der seismischen Signale ab, d.h. je geringer die Wellenlänge ist, desto höher ist die Auflösbarkeit geologischer Strukturen. Zur Erzeugung hochfrequenter Schallsignale wurde deshalb in Zusammenarbeit mit der Firma Geomesstechnik eine seismische Quelle entwickelt, die sich in der Horizontalbohrung und an der Erdoberfläche zur Anregung von seismischen Signalen einsetzen lässt. Das Basissystem der seismische Quelle ist ein Sparker, bei dem ein elektrischer Entladungsvorgang zur Erzeugung der Schallsignale verwendet wird. Bei der Entladung werden Signale mit Frequenzen von bis zu 2000 kHz generiert. Im Feldeinsatz verbindet ein Koaxialkabel die obertägige Messapparatur entweder mit einer Entladungskammer, die in der Horizontalbohrung positioniert wird oder einer Entladungskammer, die auf der Erdoberfläche aufgestellt wird.

3.2 Anpassungen für die geoelektrischen Messungen

Im Vergleich zur seismischen Tomographie werden für die geoelektrische Tomographie relativ geringe technische Anforderungen an die Signalgeber und -aufnehmer gestellt, da es sich in diesem Fall nur um Elektroden handelt. Bei der Anpassung der geoelektrischen Messausrüstung für den Einsatz in Horizontalbohrungen stand dagegen mehr die Bewertung und Auswahl von geeigneten Elektrodenanordnungen für die Durchführung von Tracertests in Kombination mit geoelektrischen Messungen im Vordergrund. Hierzu wurde das im PWAB-Forschungsprojekt PW 93-133 entwickelte Konzept der Sensitivitätsanalyse verwendet (TEUTSCH et al. 1996).

Durch die Anwendung dieses Konzeptes wurde die Notwendigkeit von Bohrlochelektroden für ein langfristiges Monitoring von Salztracerausbreitungen festgestellt. Für geoelektrische Messungen zur Strukturerkundung reichen dagegen Packerelektroden aus, die im Filterbereich der Horizontalbohrung zu platzieren sind. Die Bohrlochelektroden müssen dagegen bereits bei der Erstellung einer Bohrung als Elektrodenstränge außen an den Rohrtouren der Horizontalbohrung angebracht werden. Ein Elektrodenstrang besteht dabei aus einem mehradrigen Messkabel, das an vorgesehenen Stellen mit einzelnen Metallelektroden versehen ist. Die einzelnen Metallelektroden sind als Ringelektroden anzufertigen, um einen allseitigen Kontakt an das Bodenmaterial außerhalb der Rohrtouren zu gewährleisten. Die Elektrodenabstände können flexibel, entsprechend der geforderten Auflösung, realisiert werden. Parallel zu den Elektrodensträngen können auch Einleitschläuche für eine spätere punktuelle Tracereinleitung oder Grundwasserprobenahme mit an der Rohrtouren angebracht werden (siehe Abb. 5 und 6).

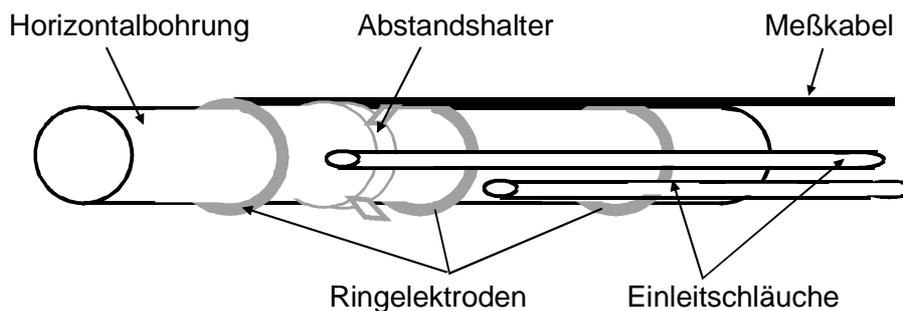


Abbildung 5: Prinzipskizze zur Ausrüstung von Horizontalbohrungen für die Durchführung von geoelektrischen Messungen in Kombination mit Salztracerversuchen.



Abbildung 6: Installation von Elektrodensträngen und Einleitschläuchen beim Ausbau der Horizontalbohrung.

3.3 Test und Auswahl von Transportsystemen

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Anpassung der tomographischen Messausrüstung an die Verwendung in Horizontalbohrungen war die Auswahl und der Test von geeigneten Transportsystemen zur Einbringung der Messausrüstungen in die Bohrung. Prinzipiell stehen drei verschiedene Transportsysteme zur Einbringung von Ausrüstungen in Horizontalbohrungen zu Verfügung. Dies sind Kanalroboter, Seile bzw. Seilwindensysteme und Kunststoffeinschiebänder (auch als Röhrenaal oder Röhrenschlange bezeichnet). Nach eingehenden Untersuchungen sind die drei verschiedenen Transportsysteme hinsichtlich ihrer Eignung für die Einbringung der geotomographischen Messausrüstungen wie folgt zu beurteilen.

Kanalroboter sind für die Einbringung der geotomographischen Messausrüstungen eher ungeeignet. Für diese Einschätzung sind folgende Gründe anzuführen:

- Für die Kanalroboter wird in der Regel ein größerer Innendurchmesser der Horizontalbohrung als für die tomographische Messausrüstung benötigt. Dies bedeutet das bei der Verwendung von Kanalrobotern eine größerer Bohrdurchmesser erforderlich wird, was in der Regel zu einer Kostensteigerung bei der Erstellung der Horizontalbohrung führt.
- Die Verwendung von Kanalrobotern führt zu Begrenzungen bei den zur Erreichung der Zieltiefe notwendigen Gefällen und Steigungen in der Horizontalbohrung. Dadurch kann eine Verlängerung der Bohrung erforderlich sein, was sich wiederum auf die Kosten auswirkt.
- Nur größere Kanalroboter verfügen über eine ausreichende Zugkraft zur Einbringung der Messausrüstung.

Seile bzw. Seilwindensysteme eignen sich für die Einbringung der geotomographischen Messausrüstungen in Horizontalbohrungen, bei denen beide Enden von der Oberfläche zugänglich sind. Die Einbringung der Seile kann durch hydraulisch getriebene Rohrschlitten erfolgen. Im Falle von Horizontalbohrungen, die nicht wieder auftauchen, sind Seile bzw. Seilwindensysteme auf Grund der relativ komplizierten Implementierung der dann erforderlichen Umlenkpacker weniger zweckmäßig.

Kunststoffeinschiebebänder zeichnen sich durch ihre Länge (bis zu 300 m), Biessamkeit (sie können auf Haspeln mit ein bis zwei Metern Durchmesser aufgespult werden), hohe Torsions- und Zugfestigkeit aus. Deshalb sind sie bei allen Formen von Horizontalbohrungen, die kleiner als 300 m lang sind, für die Einbringung der geotomographischen Messausrüstungen eignet.

Auf Grund dieser Einschätzungen sind Seile bzw. Seilwindensysteme sowie Kunststoffeinschiebebänder für die Einbringung der geotomographischen Messausrüstungen in die Horizontalbohrungen zu bevorzugen.

4 Erstellung einer Horizontalbohrung für Forschungszwecke

Um die im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelten tomographischen Messausrüstungen und Messkonzepte erproben und gegebenenfalls weiterentwickeln zu können, war es erforderlich eine Horizontalbohrung für Forschungszwecke zu errichten. Als Standort für diese Forschungsbohrung wurde auf Grund der verfügbaren Infrastruktur das Naturmessfeld Lauswiesen bei Tübingen ausgewählt. Das Naturmessfeld Lauswiesen befindet sich auf dem Gelände des ehemaligen Pumpwerks Pfrondorf in einer Neckarbiegung. Das Gelände ist umzäunt und verfügt über ein Pumpenhaus mit Netzanschluss. Diese Bedingungen sind insbesondere wichtig für die Durchführung von geoelektrischen Messungen in Kombination mit Salztracerversuchen, die mehrere Tage andauern. Auf dem Naturmessfeld wurden bereits 1996 im Rahmen einer Diplomarbeit (Sack Kühner 1996) mehrere Grundwassermessstellen eingerichtet und verschiedene hydrogeologische Untersuchungen durchgeführt. Die Lage der Grundwassermessstellen sowie die mit den hydrogeologischen Untersuchungen ermittelten Fließrichtungen können der Abbildung 7 entnommen werden. Auf Grund seiner Nutzung für die Ausbildung und für eine Reihe von verschiedenen Forschungsprojekten weist das Naturmessfeld Lauswiesen einen guten Erkundungsstand auf. Dies ermöglicht eine direkte Bewertung der mit neuen Verfahren ermittelten Untergrundparametern und somit auch eine Bewertung dieser Verfahren.

Für die Errichtung der Horizontalbohrung wurde das in der Abbildung 7 dargestellte Profil ausgewählt. Die Platzierung der Horizontalbohrung zwischen vorhandenen Messstellen ermöglicht auch eine weiterführende Nutzung der Bohrung für die Entwicklung neuer hydraulischer Verfahren und Tracermethoden. Ausgehend von einem Startpunkt war eine Lauflänge von ca. 70 m bis 80 m geplant. Angepasst an die hydraulischen Verhältnisse im Neckartal, sollte die Bohrung

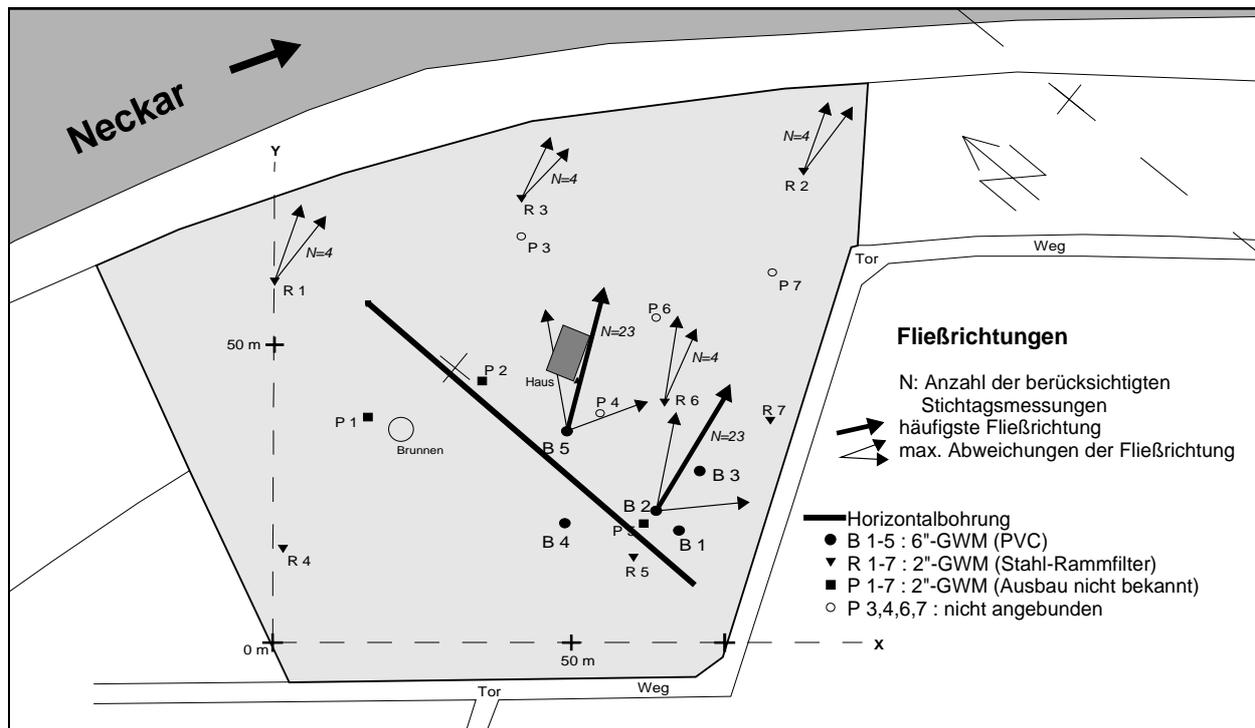


Abbildung 7: Lageplan der Bohrungen im Naturmessfeld Lauswiesen.

eine maximale Tiefe von etwa 8 m erreichen. Entsprechend dieser Konzeption wäre damit ein etwa 40 bis 50 m langer Abschnitt der Bohrung im grundwassererfüllten Bereich.

Lockergesteinsgrundwasserleiter stellen aufgrund ihrer meist sandig-kiesigen Sedimente besondere Anforderungen an die Horizontalbohrtechnik. Das während des Bohrens angetroffene Geröll muss entweder verdrängt oder zerkleinert werden. Überschreitet die Größe der Körner einen bestimmten Durchmesser, kann mit herkömmlichen Bohrgeräten, die für das grabenlose Verlegen von Rohrleitungen verwendet werden, nicht mehr gearbeitet werden. Dies führt zu einem beträchtlichen Anstieg der Kosten einer Horizontalbohrung. In Sedimenten mit einem geringen Tonanteil muss zudem der Bentonitanteil der Bohrspülung wegen der notwendigen Schmierung des Bohrkopfs erhöht werden. Dies kann allerdings eine spätere Nutzung der Horizontalbohrung für hydraulische Tests und Tracertests beeinträchtigen, da für diese Tests eine gute hydraulische Anbindung an den Grundwasserleiter notwendig ist. Des Weiteren kann der hohe Bentonitanteil zu Feinstsedimenteinträgen in den Filterbereich der Horizontalbohrung führen und damit dessen Wirksamkeit beeinträchtigen. Gemeinsam mit einer Horizontalbohrfirma (Fa. Kopf AG, Sulz a. Neckar) wurde deshalb ein technisches Konzept entwickelt, um einerseits die tomographischen Messungen in Horizontalbohrungen durchführbar zu machen und andererseits hydraulische und Tracertests zu ermöglichen. Das technische Konzept zur Erstellung der Horizontalbohrung soll im folgenden kurz erläutert werden.

Der Bohrvorgang zur Errichtung einer Horizontalbohrung verläuft so, dass zunächst eine sogenannte Pilotbohrung mit einem Durchmesser der Bohrlanze von ca. 50 mm entlang des vorgese-

henen Verlaufs durchgeführt wird. Erreicht der Bohrkopf der Pilotbohrung den Zielpunkt wird ein spezieller Aufweitkopf aufgesetzt, der im Rückwärtsgang die Bohrung aufweitet. Je nach Bodenverhältnissen und gefordertem Enddurchmesser muss dieser Arbeitsvorgang gegebenenfalls wiederholt werden. Beim letzten Aufweitgang wird eine Vollrohrtour als Schutzrohr für die weiteren Installationsarbeiten mit eingezogen. Nach Beendigung der Bohrarbeiten erfolgt der Einzug einer speziell für die tomographischen Messungen vorbereiteten Rohrtour (siehe Abschnitt 3.2 sowie Abb. 5 und 6). Nachdem die Rohrtour in das Schutzrohr eingezogen wurde, wird das Schutzrohr gezogen. Die Filterstrecke der im Boden verbleibenden Rohrtour ist so zu positionieren, dass sie innerhalb des wassergesättigten Bereiches liegt. In die fertiggestellte Horizontalbohrung wird ein Seil eingezogen, an dem später die Messausrüstungen befestigt und durch die Horizontalbohrung transportiert werden kann. Die Bentonitsuspension und Feinmaterial, das aus dem Aquifer in die Horizontalbohrung einschlemmt, werden unmittelbar nach Installation der Bohrung durch Hochdruckreinigungen entfernt werden. Spätere Feinmaterialeinträge können durch Firmen, die normale Abwässerkanäle reinigen, ausgespült werden. Die Horizontalbohrung wird abschließend exakt eingemessen.

Ein erster Versuch der Umsetzung des Konzepts erfolgte im Frühjahr 1998. Die Errichtung der Pilotbohrung sollte durch einen Bohrtrupp der Firma Flowtex (Ettlingen) durchgeführt werden. Die Errichtung der Pilotbohrung wurde nach zwei Bohransätzen jedoch durch den Bohrtrupp der Firma Flowtex abgebrochen, weil sich mit dem vorhandenen Bohrgerät die Bohrung nicht entsprechend der vorgegebenen Trasse steuern ließ. Die Ursache hierfür war eine Unterschätzung der durch den Grobkiesanteil der Lockersedimente bedingten Schwierigkeiten bei der Steuerung der Pilotbohrung.

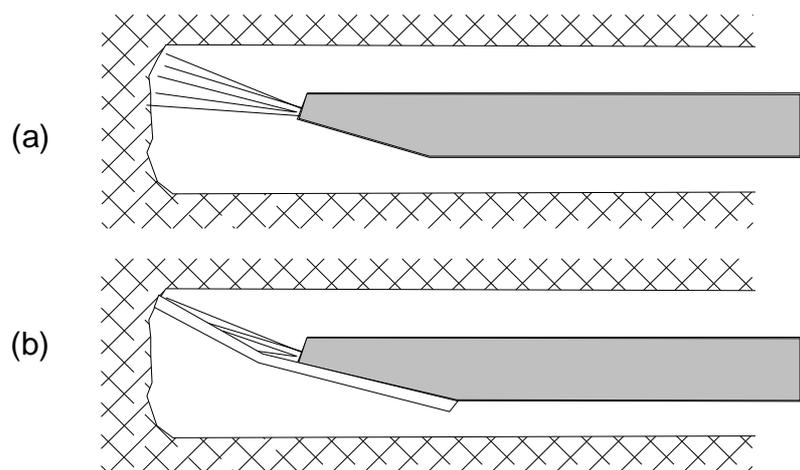


Abbildung 8: Unterschiedliche Systeme zum Lösen des Lockersediments bei einer Pilotbohrung. (a) Lösen des Bodens ausschließlich mittels Düsenstrahl (Patente durch FlowMole und durch FlowTex / KSK), (b) Lösen des Bodens durch eine Bohrplatte mit unterstützendem Spülungsstrahl (Patent Ditch Witch/GRI)

Die Verlaufssteuerung bei der Errichtung einer Horizontalbohrung erfolgt je nach Bohrverfahren (siehe Abb. 8) über eine an einer Abschrägung an der Vorderseite des Bohrkopfes angebrachte Bohr- oder Steuerplatte, die vor Bohrbeginn exakt nach oben ausgerichtet wird. Wird das Bohrgestänge ohne Rotation vorgeschoben, so wird die Bohrung entgegengesetzt zu der Ausrichtung der abgeschrägten Platte abgelenkt. Die Möglichkeiten eine Horizontalbohrung auf diese Weise zu steuern, können jedoch durch den Grobkiesanteil der Lockersedimente stark eingeschränkt werden. Die Schwierigkeiten lassen sich teilweise durch größere Bohrgeräte bzw. Bohrgeräte, bei denen sich ein Schlaghammer für die Steuerung zugeschalten lässt, verringern.

Die Firma Flowtex konnte leider nicht dazu gewonnen werden, einen neuen Bohrversuch mit einem anderen Bohrgerät zu unternehmen, was auf Grund des Renommées der Firma Flowtex auch die Gewinnung anderer Firmen zur Erstellung der Pilotbohrung erschwerte. Es konnte auch kein alternativer Standort für die Horizontalbohrung gefunden werden. Das zweite zur Verfügung stehende Naturmessfeld, die "Horkheimer Insel", konnte z.B. ebenfalls wegen z.T. hoher Grobkiesanteile in den Lockersedimenten nicht genutzt werden (PTAK et al. 1996, SACK-KÜHNER 1996).

Mit Unterstützung der Firma Kopf AG (Sulz a. N.) konnte die Firma Daberkow & Ringenberg Spezialtiefbau GmbH (Strasburg) für die Durchführung eines weiteren Versuchs zur Errichtung der Pilotbohrung gewonnen werden. Dieser Versuch erfolgte im Spätsommer 1998. Dabei wurden mehrere Bohrversuche durchgeführt, um eine Pilotbohrung entsprechend dem geplanten Verlauf zu errichten. Die Verläufe der einzelnen Bohrversuche können der Abbildung 9 entnommen werden. Zwar konnte bei diesen Bohrversuchen eine bessere Steuerung als bei denen im Frühjahr 1998 erreicht werden, doch es gelang nicht eine Pilotbohrung entlang der geplanten Trasse durchzuführen. Auf Grund des fortgeschrittenen Stadiums des Projektes sowie der Notwendigkeit einer freiverfügbaren Horizontalbohrung für die Erprobung der im Rahmen des Projektes entwickelten tomographischen Messausrüstungen und Messkonzepte wurde deshalb entschieden, eine Horizontalbohrung zu installieren, die sich im mittleren Bereich relativ flach unter dem Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels befindet. Dies würde es erlauben, alle geplanten praktischen Tests durchzuführen. Lediglich eine sinnvolle tomographische Auswertung der seismischen Messungen und damit auch die Durchführung der kombinierten Interpretation der tomographischen Ergebnisse konnte dann nicht mehr für den Standort gewährleistet werden.

Nach der Neufestlegung der Trasse konnte die Pilotbohrung erfolgreich durchgeführt werden und das mit der Firma Kopf AG für die Installation der Horizontalbohrung entwickelte Konzept umgesetzt werden. Für die geoelektrischen Messungen in Kombination mit Salztracerversuchen wurden dabei Elektrodenstränge mit einem Elektrodenabstand von einem Meter und Einleiterschläuche für eine Probenahme bzw. Tracerzugabe im Abstand von 2 m eingebaut. Nach Abschluss der Installationsarbeiten und einer Reinigung der Bohrung erfolgte abschließend eine exakte Tiefeneinmessung der Horizontalbohrung mittels einer Schlauchwaage.

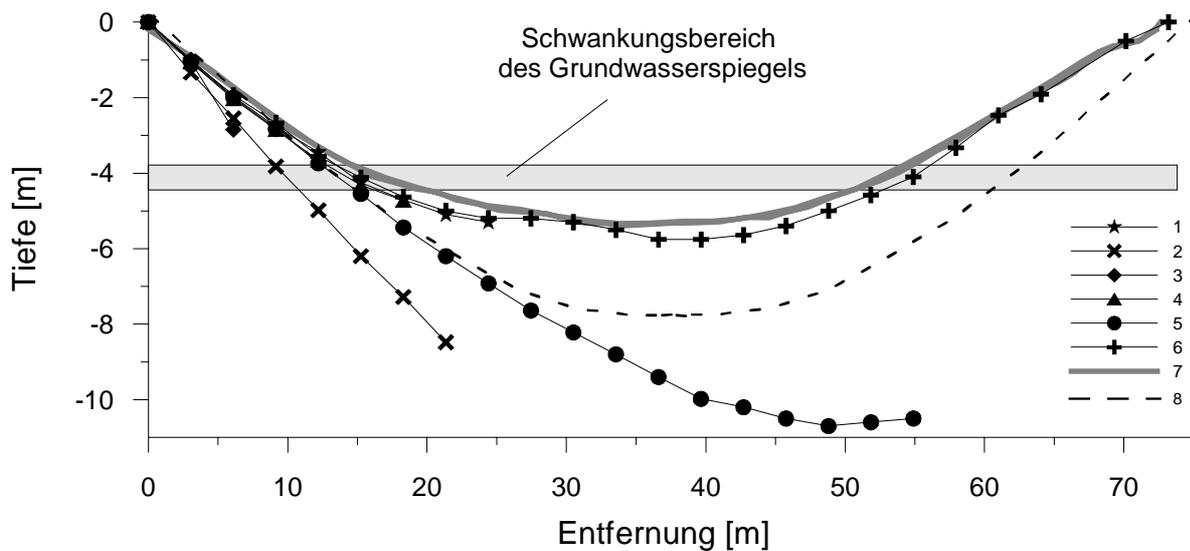


Abbildung 9: Verläufe der Bohrversuche zur Errichtung einer Pilotbohrung (1-6) im Spätsommer 1998, der endgültige Verlauf der Horizontalbohrung (7) sowie der ursprünglich geplante Verlauf der Horizontalbohrung (8).

5 Durchführung von tomographischen Messungen in der Horizontalbohrung

Nach Erstellung der Horizontalbohrungen wurde die weiterentwickelte Messtechnik für tomographische Messungen sowie verschiedene Messkonzepte zur Verwendung der Horizontalbohrung erprobt. Ausgewählte Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im folgenden dargestellt.

5.1 Durchführung seismischer tomographischer Messungen

Für die Durchführung der seismischen tomographischen Messungen wurden zwei verschiedene Messkonzepte getestet. Dies war zum einen die Anregung von akustischen Signalen in der Horizontalbohrung mittels des Bohrloch-Sparkers und die Registrierung dieser Signale an der Erdoberfläche unter Verwendung von Geophonen. Zum anderen wurde untersucht, wie gut auch eine Schallanregung an der Erdoberfläche und die Registrierung der Signale in der Horizontalbohrung funktioniert. Die Zweckmäßigkeit der verschiedenen Messkonzepte hängt von der jeweiligen Aufgabenstellung ab. So ist z.B. in einer flachen Horizontalbohrungen im Grundwasserleiter, deren Abstand zur Erdoberfläche gering ist, die Anregung der Schallsignale in der Horizontalbohrung vorteilhaft, da die Schallwellen über die kurzen Laufwege im Grundwasser eine geringe Dämpfung erfahren. Demgegenüber bietet sich die Anregung der Schallsignale an der Erdoberfläche an solchen Stellen an, an denen die Mächtigkeit der Bodenzone über der Horizontalbohrung groß ist und eine hohe Schallenergie übertragen werden soll.

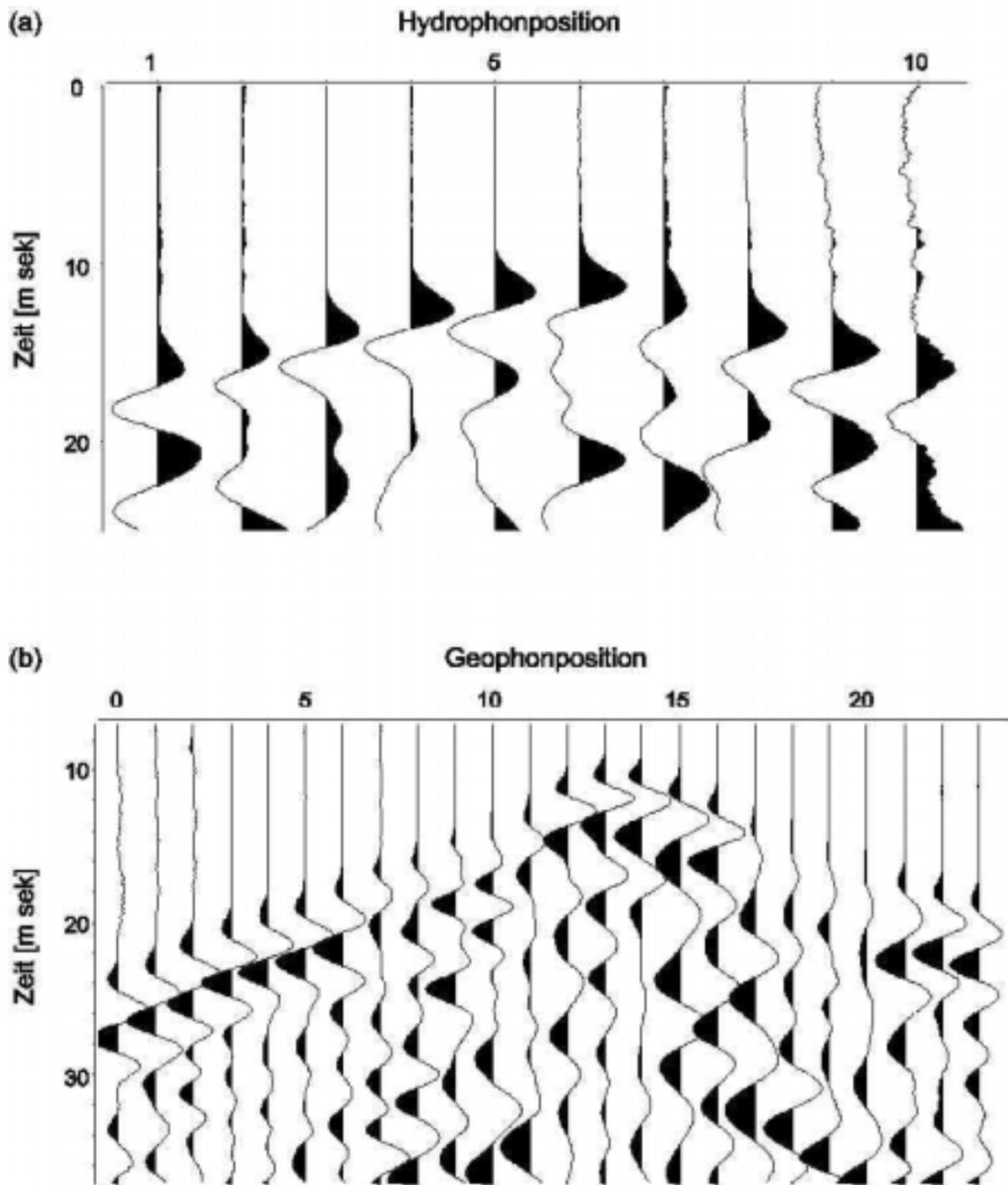


Abbildung 10: Beispiele von Signalen, die bei der Durchführung seismischer tomographischer Messungen unter Verwendung einer Horizontalbohrung aufgezeichnet wurden. a) Signalanregung an der Erdoberfläche und Signalaufzeichnung mittels Hydrophonen in der Horizontalbohrung, b) Signalanregung mittels Bohrlochsparker in der Horizontalbohrung und Signalaufzeichnung mittels Geophonen an der Erdoberfläche.

Einsatz tomographischer Verfahren in Horizontalbohrungen

In der Abbildung 10 sind Beispiele für die bei der Erprobung der unterschiedlichen Messkonzepte aufgezeichneten Signale dargestellt. Beide Aufzeichnungen weisen eine sehr gute Signalqualität auf.

Nach Abschluss der seismischen Messungen und der Bestimmung der Laufzeiten aus den aufgezeichneten seismischen Signalen wurde eine tomographische Inversion der Laufzeiten versucht. Trotz einer Weiterentwicklung der vorhandenen Inversionsstrategien gelang es nicht, ein zuverlässiges Tomogramm der seismischen Geschwindigkeitsverteilung zu rekonstruieren. Die Ursache hierfür besteht darin, dass bei der tatsächlich erreichten Tiefe der Horizontalbohrung und den vorherrschenden Geschwindigkeitskontrasten zwischen gesättigter und ungesättigter Zone die Abweichung zwischen den tatsächlichen Strahlverläufen und den für die tomographische Inversion idealisierten Strahlverläufen zu groß ist (siehe Abb. 11).

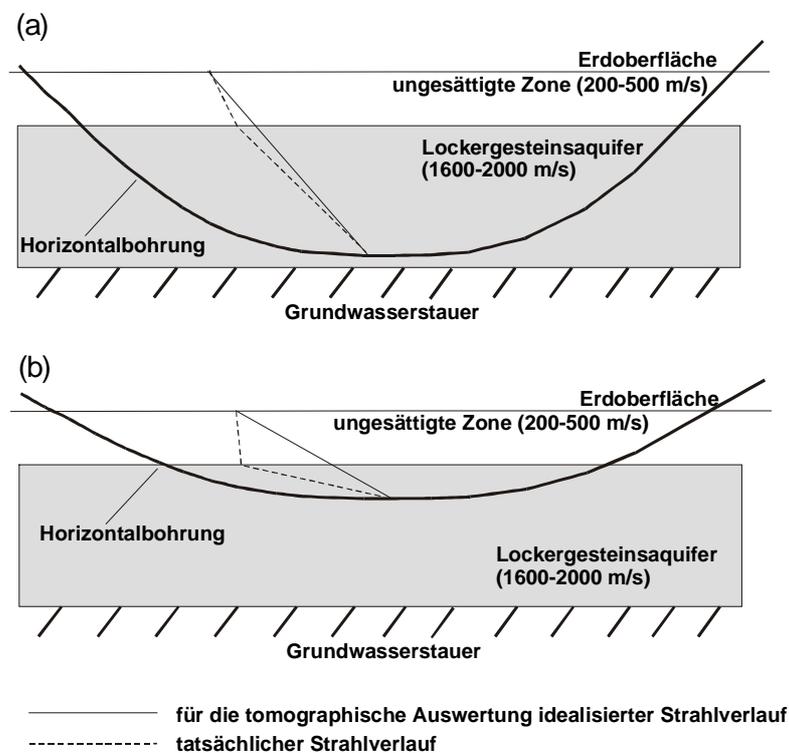


Abbildung 11: Ursache für die nicht mögliche tomographische Auswertung der unter Verwendung der Horizontalbohrung durchgeführten seismischen Messungen. a) ursprünglich geplante Erkundungssituation, b) nach Installation der Horizontalbohrung vorhandene Erkundungssituation.

5.2 Durchführung der geoelektrischen Tomographie zur Strukturerkundung

Neben der seismischen Tomographie wurde auch die Möglichkeit der Verwendung der Horizontalbohrung für die geoelektrischen Tomographie zur Strukturerkundung getestet. Im Gegensatz zur seismischen Tomographie stellt der Unterschied in den petrophysikalischen Parametern

zwischen der gesättigten und der ungesättigten Zone für die geoelektrische Tomographie kein besonderes Problem dar. Des Weiteren ist wegen der den geoelektrischen Messungen zu Grunde liegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten die Auswertung der Daten nicht auf den Bereich zwischen den Bohrungen beschränkt. Das Ergebnis der Testmessungen im Naturmessfeld Lauswiesen ist in Abbildung 12 dargestellt.

Wie das Ergebnis zeigt, weist der untersuchte Bereich in den geoelektrischen Parametern keine starke laterale Gliederung auf. Dadurch ist der Vorteil der Verwendung einer Horizontalbohrung für eine Strukturerkundung mittels geoelektrischer Tomographie gegenüber einer Erkundung von der Oberfläche oder unter Verwendung von Vertikalbohrungen an diesem Beispiel nicht so offensichtlich. Die Ergebnisse numerischer Untersuchungen zeigen jedoch sehr deutlich den Vorteil der Verwendung einer Horizontalbohrung zur Strukturerkundung. Dieser besteht vor allem in einem wesentlich höheren lateralen Auflösungsvermögen im Bereich der wassergesättigten Zone als dem mit geoelektrischen Oberflächenmessungen oder geoelektrischen Messungen unter Verwendung von Vertikalbohrungen erreichbaren Auflösungsvermögen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die erreichbare Auflösung der geoelektrischen Messungen vor allem vom Abstand zwischen dem zu erkundenden Bereich und den für die Messungen verwendeten Elektroden abhängt.

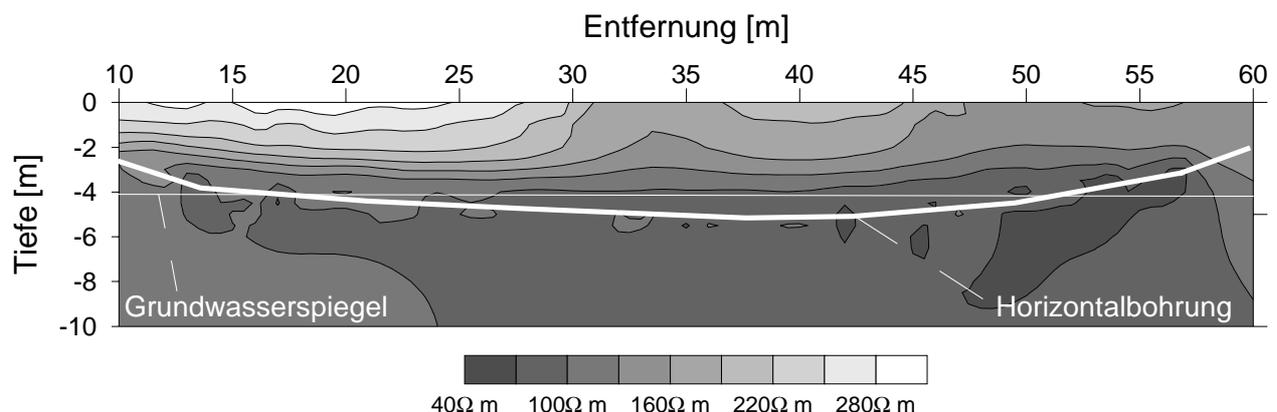


Abbildung 12: Ergebnis geoelektrischer tomographischer Messungen, die unter Verwendung einer Horizontalbohrung durchgeführt wurden.

5.3 Durchführung der geoelektrischen Tomographie zur Erkundung der Fließbedingungen

Mittels geoelektrischer Messungen können bei einer Kombination mit der Einleitung einer Tracerlösung auch Aussagen über die in-situ Fließbedingungen gewonnen werden. Diese Verfahrenskombination wird im folgenden als geoelektrische Tracerversuche bezeichnet. Grundlage für die besondere Eignung der geoelektrischen Tracerversuche für die Erkundung der Fließbedingungen ist die starke Abhängigkeit der elektrischen Eigenschaften der Locker- und Festgesteine von den elektrischen Eigenschaften des Porenfluids.

Als Tracerlösung können bei den geoelektrischen Tracerversuchen Wässer verwendet, die sich in ihrer Leitfähigkeit vom Grundwasser deutlich unterscheiden. Dabei kann es sich z.B. um eine aufbereitete Salztracerlösung oder aber auch um normales Leitungswasser handeln. Die letztere der beiden genannten Möglichkeiten ist deshalb von besonderem Interesse, weil bei der Verwendung von Leitungswasser zum einen keine Dichteeffekte bei der Ausbreitung der Tracerlösung zu berücksichtigen sind. Zum anderen können bei Verwendung von Leitungswasser mit einem sehr geringen Aufwand geoelektrische Tracerversuche über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden. Dadurch kann der Aussagebereich der geoelektrischen Tracerversuche über längere Fließstrecken ausgedehnt werden.

Im Gegensatz zur Einleitung des Tracers über vertikale Bohrungen erfolgt bei einer Erkundung der Fließbedingungen unter Verwendung einer Horizontalbohrung die Einleitung über einen Bereich mit großer lateraler Ausdehnung (Abb. 2). Dadurch ist die Erkundung von bevorzugten natürlichen Drainagebereichen bzw. der bevorzugten Fließwege nicht mehr von der Positionierung der Bohrung abhängig.

In der Abbildung 13 ist ein ausgewähltes Ergebnis von einem unter Verwendung der Horizontalbohrung im Testfeld Lauswiesen durchgeführten geoelektrischen Tracerversuch dargestellt. Bei dem Tracerversuch erfolgte über einen Zeitraum von 6 Stunden die Einleitung von 100 m^3 Salztracerlösung. Die Salztracerlösung hatte eine Leitfähigkeit von durchschnittlich 8 mS/cm . Für das unbeeinflusste Grundwassers wurden während des Versuchs elektrische Leitfähigkeiten zwischen $0,89 \text{ mS/cm}$ und $0,97 \text{ mS/cm}$ ermittelt. Aus dem dargestellten Ergebnis lässt sich bezüglich des parallel zur Horizontalbohrung definierten Profils eine bevorzugte Tracerausbreitung im Bereich zwischen 22 m und 26 m ableiten (Profilmullpunkt beim Einstich der Horizontalbohrung). Dies ist als Indikation für einen bevorzugten natürlichen Fließweg in diesem Bereich zu interpretieren.

Neben der Erkundung von bevorzugten natürlichen Fließwegen eignen sich geoelektrische Tracerversuche auch zur Untersuchung der Effektivität von hydraulischen in-situ Sanierungsmaßnahmen. Für derartige Sanierungsmaßnahmen können auch Horizontalbohrungen besonders effektiv und kostengünstig verwendet werden (FOURNIER & PRESSLY 1996, DOE 1997, PLUMMER 1995). Im Falle der Untersuchung der Effektivität von hydraulischen in-situ Sanierungsmaßnahmen ist u.a. die räumliche Charakterisierung von Fließbedingungen von Interesse. Um dies mit der Durchführung von geoelektrischen Tracerversuchen zu erreichen, sind die für die Sanierung verwendeten Bohrungen mit Elektroden auszurüsten. Das Ergebnis einer Untersuchung zur Charakterisierung der Fließbedingungen zwischen mehreren Vertikalbohrungen ist in Abbildung 14 dargestellt. Als Tracerlösung wurde in diesem Fall Leitungswasser verwendet, welches eine geringere Leitfähigkeit (durchschnittlich $0,7 \text{ mS/cm}$) aufwies als das Grundwasser (ca. 1 mS/cm). In den dargestellten Ergebnissen lässt sich deutlich die Ausprägung bevorzugter Fließwege erkennen. Das bei dem Beispiel an Hand einer Erkundung der Fließbedingungen zwischen Vertikalbohrungen vorgestellte Konzept kann auch für Untersuchungen zwischen Horizontalbohrungen verwendet werden.

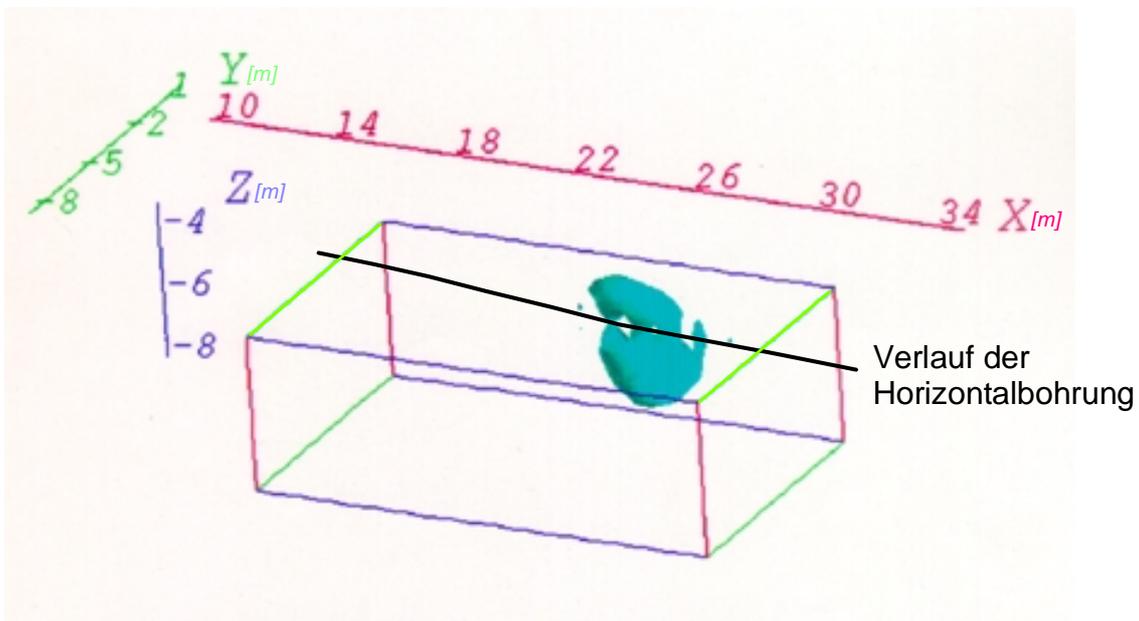


Abbildung 13: Ergebnis eines geoelektrischen Salztracerversuchs unter Verwendung der Horizontalbohrung im Testfeld Lauswiesen. Es ist eine ausgewählte Fläche der Änderung der Widerstandsverteilung gegenüber der Widerstandsverteilung vor Beginn des Tracerversuchs für den Zeitpunkt von 72 Stunden nach Beginn der Tracereinleitung dargestellt.

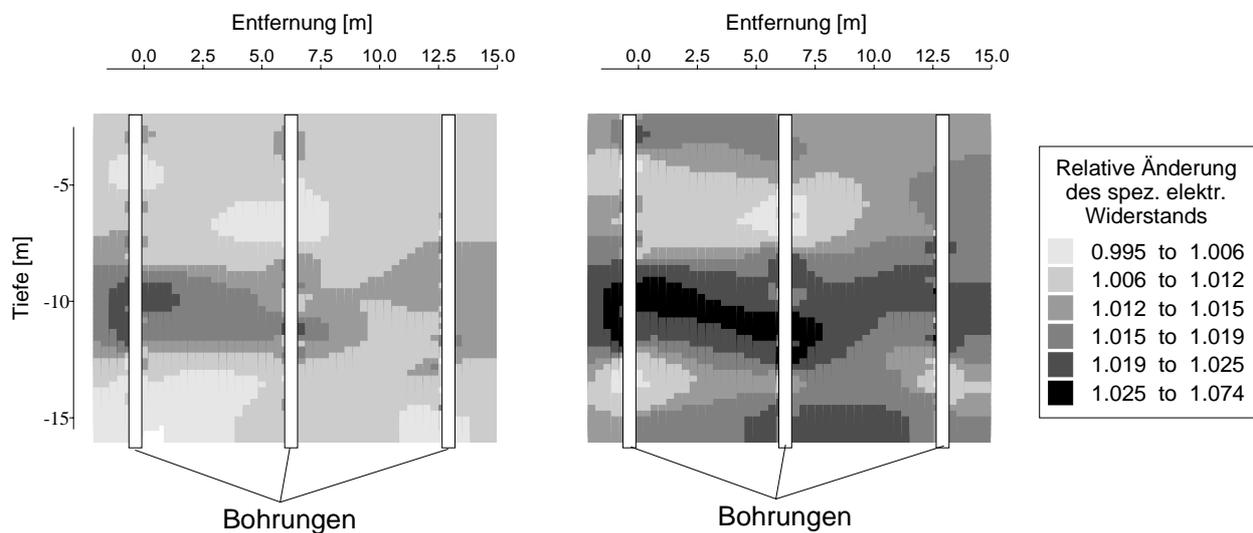


Abbildung 14: Erkundung der Fließbedingungen zwischen Vertikalbohrungen durch die geoelektrische Beobachtung der Ausbreitung von eingeleitetem Leitungswasser. Die Einleitbohrung ist in den Ergebnisdarstellungen die linke Bohrung. Abgebildet sind die Veränderungen in der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstands bezüglich des Ausgangszustands nach (a) einem Tag und (b) zwei Tagen Einleitung von Leitungswasser.

6 Quantitative hydrogeologische Interpretation der tomographischen Messungen

Um den Anforderungen der Hydrogeologie bei der Erkundung des Untergrundes im Bereich von Altlasten mittels geophysikalischer Verfahren gerecht zu werden, ist neben der hochauflösenden Strukturerkennung auch zunehmend die quantitative Umsetzung der ermittelten geophysikalischen Parameter in die benötigten hydrogeologischen bzw. geotechnischen Parameter erforderlich. Bisherige Ansätze zur Umsetzung der Parameter basierten oft auf Modellannahmen für den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Parametern, welche die standortspezifischen Besonderheiten in den petrophysikalischen Parameterbeziehungen nicht ausreichend berücksichtigten. Weitere Probleme bei der Umsetzung der Parameter sind mehrdeutige Beziehungen zwischen den geophysikalischen Parametern und den hydrogeologischen bzw. geotechnischen Parametern sowie durch die Inversionsalgorithmen bedingte Unschärfen bei der Ermittlung der geophysikalischen Parameterverteilung.

Zur quantitativen hydrogeologischen Interpretation der tomographischen Messungen wurde deshalb im Rahmen des Projektes eine auf den Methoden der multivariaten Statistik basierende Interpretationsmethode entwickelt. Diese Interpretationsmethode erlaubt die Kombination der aus tomographischen Messungen flächenhaft gewonnenen geophysikalischen Informationen mit den nur an Bohrungen oder Sondierungspunkte vorliegenden hydrogeologischen bzw. geotechnischen Parametern. Sie basiert auf der Verwendung des Verfahrens der Clusteranalyse (k-means Clustering; MCQUEEN, 1967). Das Ergebnis der Interpretation ist eine deterministische Beschreibung des Untergrundes durch verschiedene Cluster, ein sogenanntes "Lithogramm" (FECHNER & DIETRICH 1997). Jedes Cluster wird dabei für jeden verwendeten petrophysikalischen Parameter durch einen Mittelwert und eine Varianz charakterisiert. Diese statistische Beschreibung ermöglicht eine Quantifizierung der durch die Messungen, Inversion bzw. Standortspezifika bedingten Unsicherheiten bei der Umsetzung der geophysikalischen Parameter in die gesuchten hydrogeologischen bzw. geotechnischen Parameter. Die ermittelten Parameterverteilungen eignen sich für weiterführende Prognoserechnungen.

Die Anwendbarkeit des Verfahrens soll im folgenden an einem synthetischen Beispiel verdeutlicht werden, bei dem die seismische und elektrische Tomographie zur Erkundung des Bereichs zwischen angenommenen "Bohrungen" verwendet wurde. Um bei den numerischen Untersuchungen ein möglichst realistisches Modell zu verwenden, wurde zur Modellgenerierung ein Aufschluss in der ungesättigten Zone als Aquiferanalog verwendet (Abb. 15). Die hydrogeologischen Parameter der einzelnen Elementtypen wurden in Laborexperimenten bestimmt. Die Zuordnung geophysikalischer Parameter erfolgte in Anlehnung an Literaturwerte. Die den einzelnen Elementen zugeordneten Parameter sind in Tabelle 1 aufgelistet.

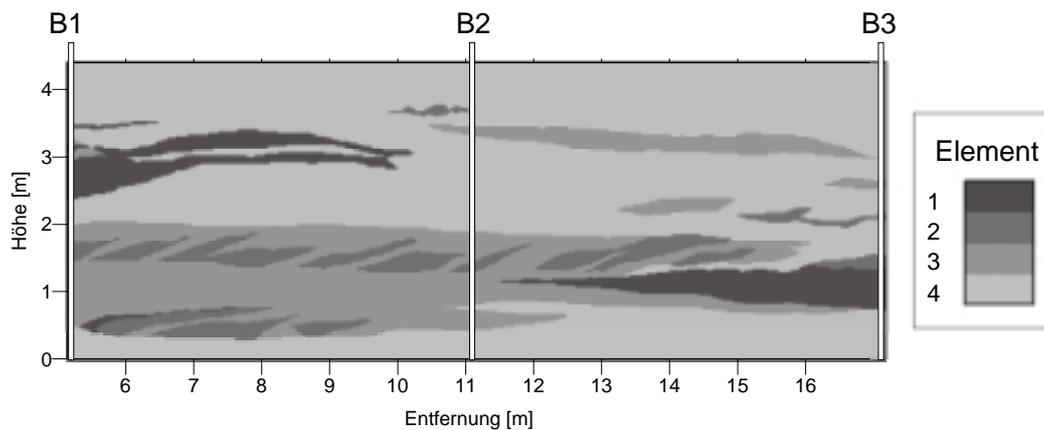


Abbildung 15: Auf Aufschlussuntersuchungen basierendes synthetisches Modell eines Lockergesteinsaquifers.

Tabelle 1: Hydrogeologische und geophysikalische Parameter der Strukturelemente des synthetischen Modells.

	Element 1	Element 2	Element 3	Element 4
Hydraulische Durchlässigkeit (m s^{-1})	1.1×10^{-3}	2.0×10^{-2}	3.96×10^{-3}	5.37×10^{-4}
Gleichgewichtssorptionskoeffizient	20	138	87	87
Seismische Geschwindigkeit (m s^{-1})	1750	1900	2000	2100
Spez. elektrischer Widerstand (Ohm m)	43	100	120	195

Basierend auf dem Modelldatensatz erfolgten Vorwärtsrechnungen zur Simulation der Messungen für die seismische und elektrische Tomographie. Bei der seismischen Tomographie erfolgten die Berechnungen für einen Schuss- und Messpunktstand von 0,2 m in den Bohrungen mit der Methode von MOSER (1991). Für die Inversion der seismischen Messungen wurde der SIRT-Algorithmus verwendet. Zur Simulation der geoelektrischen Messungen wurden Elektrodenpositionen in den Bohrungen und an der Erdoberfläche mit einem Abstand von 0,2 m angenommen. Es wurden dabei die Messwerte für alle Dipol-Dipol-Anordnungen mit einem Konfigurationsfaktor kleiner 1000 m und eine Dipollänge von 0,8 m berechnet. Die Inversion der Messungen erfolgte mit der Methode der iterativen Backprojektion. Die Ergebnisse der tomographischen Messungen sind in Abbildung 16 a) und b) dargestellt.

Die für die hydrogeologische Interpretation notwendigen hydrogeologischen Parameter wurden im Falle der hydraulischen Durchlässigkeit über numerisch simulierte Flowmetermessungen ermittelt. Der Gleichgewichtssorptionskoeffizient, der für die Stofftransportrechnungen erforder-

Einsatz tomographischer Verfahren in Horizontalbohrungen

lich ist, wurden durch Mittelung der Modellparameter über Intervalle von 0,2 m an den Bohrungen bestimmt.

Die mit den Modellrechnungen bestimmten geophysikalischen und hydrogeologischen Parameter wurden unter Verwendung der k-means Clusteranalyse interpretiert (Abb. 16 (c) und Tabelle 2). Das Ergebnis der Clusteranalyse zeigt in den gefundenen Strukturen große Ähnlichkeiten zu dem für die Vorwärtsrechnungen verwendeten Modelldatensatz. Auf Grund der Mittelung bei der Bestimmung der hydrogeologischen Parameter an den Bohrungen und des limitierten Auflösungsvermögens der geophysikalischen Verfahren ist das Ergebnis der Clusteranalyse als eine Verteilung der effektiven Parameter in einer geringeren Auflösung als der des Ausgangsmodells zu betrachten. Ein direkter Vergleich der Parameterverteilungen von Ausgangsmodell und Ergebnis der Clusteranalyse ist deshalb nicht als unbedingt zweckmäßig. Da das Ziel der hydrogeologischen Untersuchungen an einem Standort oft Aussagen zur Grundwassergefährdungsabschätzung sind, erscheint zur Beurteilung des Ergebnisses der Clusteranalyse ein Vergleich basierend auf Stofftransportrechnungen geeigneter. In Abbildung 17 sind die Ergebnisse der Stofftransportrechnungen mit dem Ausgangsmodell und die Ergebnisse der Rechnungen mit der durch die Clusteranalyse ermittelten Parameterverteilung gegenübergestellt. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass mit der über die Clusteranalyse bestimmten Parameterverteilung sowohl der nicht retardierte als auch der retardierte Stofftransport gut prognostiziert werden kann. Dies wiederum bestätigt die Eignung der entwickelten Interpretationsmethodik.

Tabelle 2: Mittelwert (m) und Standardabweichung (s) der hydrogeologischen und geophysikalischen Parameter der ermittelten Cluster.

	Cluster 1		Cluster 2		Cluster 3		Cluster 4		Cluster 5	
	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s
Hydraulische Durchlässigkeit k ($-\ln k$)	6.76	0.17	7.30	0.36	5.37	0.61	7.31	0.37	5.63	0.52
Gleichgewichtssorptionskoeffizient	23.4	7.06	87.2	4.43	97.9	15.4	83.4	12.1	86.9	9.94
Seismische Geschwindigkeit (m s^{-1})	1985	18.7	2089	11.0	2043	13.1	2095	11.4	2050	15.3
Spez. elektrischer Widerstand (Ohm m)	108.6	17.1	187.5	14.7	107.4	15.4	120.3	18.9	150.8	14.7

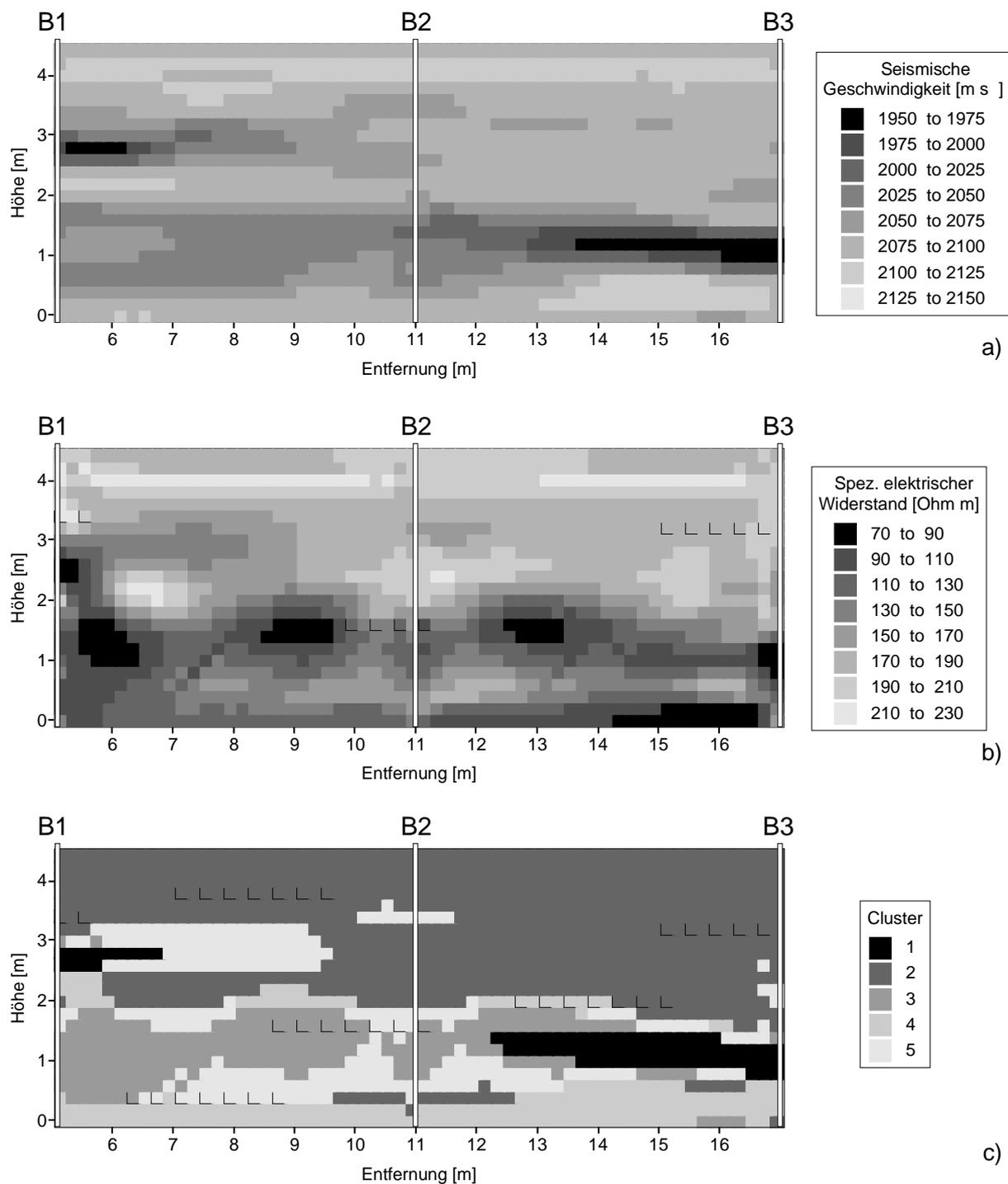


Abbildung 16: Ergebnisse der seismischen (a) und geoelektrischen Tomographie (b) sowie das Ergebnis der Clusteranalyse (c).

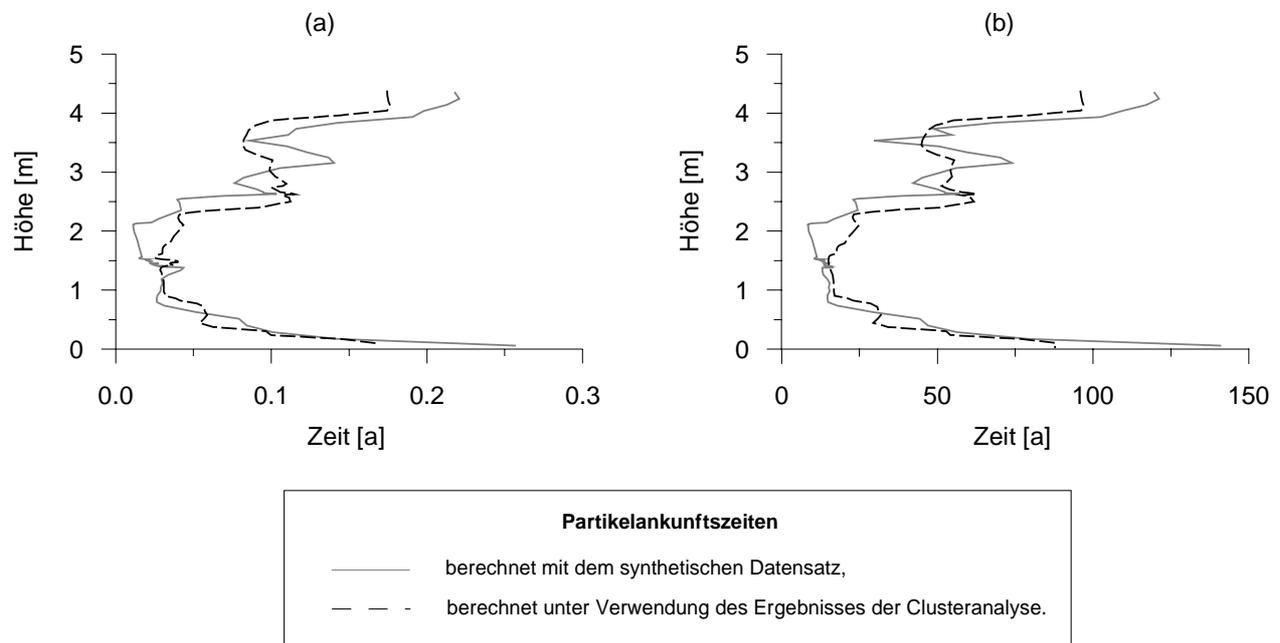


Abbildung 17: Vergleich der mit dem synthetischen Modell und der mit dem Ergebnis der Clusteranalyse berechneten Partikelankunftszeiten.

7 Kostenvergleich Horizontalbohrungen - Vertikalbohrungen

Um die möglichen Kostenvorteile der Verwendung einer Horizontalbohrung gegenüber der Verwendung von Vertikalbohrungen bei einer Erkundung von Untergrundstrukturen und Fließbedingungen beurteilen zu können, werden im folgenden die Kosten für die beiden Erkundungsansätze (Verwendung von Vertikalbohrungen vs. Verwendung einer Horizontalbohrung) für ein ausgewähltes Erkundungsbeispiel gegenübergestellt. Bei diesem Vergleich ist zu beachten, dass bei einer Erkundung über eine Horizontalbohrung eine wesentlich höhere Informationsdichte und eine bessere laterale Auflösung in Bezug auf Strukturen und hydraulische Bedingungen erreicht werden kann (siehe Abbildung 1 und 2). Des weiteren hängt bei der Verwendung einer Horizontalbohrung der Erfolg der Kartierung bevorzugter Fließwege durch geoelektrische Tracerversuche im Gegensatz zur Erkundung über vertikale Bohrungen nicht von der Lage der einzelnen Bohrungen ab.

Bei dem Kostenvergleich der beiden Erkundungsansätze sollen im folgenden die Kosten für die Bohrungen, die Kosten für die seismische Tomographie und die Kosten für die geoelektrischen Messungen getrennt von einander betrachtet werden. Die gesonderte Betrachtung der Bohrkosten begründet sich daraus, dass zum einen i.a. bereits Bohrungen von Voruntersuchungen vor-

handen sind. Zum anderen können sowohl die Vertikalbohrungen als auch die Horizontalbohrungen auch noch für andere Untersuchungen oder Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen genutzt werden. Beides bedeutet, dass die Bohrkosten i.a. nicht nur der tomographischen Erkundung zuzurechnen sind. Die Unterscheidung zwischen den Kosten für die seismische Tomographie und den Kosten für die geoelektrischen Messungen erfolgt dagegen aus dem Grund, dass an einem zu erkundenden Standort nicht unbedingt immer beide Erkundungsverfahren eingesetzt werden müssen.

Für die Vergleiche wurden zum Untersuchungsstandort folgende Annahmen getroffen:

- zu erkundenden Abstrombreite einer Altlast – 150 m,
- Aquiferbasis – 14 m unter Geländeoberkante,
- Mächtigkeit der ungesättigten Deckschichten – 4 m.

Entsprechend dieser Annahmen wäre für die tomographischen Messungen entweder eine Horizontalbohrung von 200 m Länge oder 11 Vertikalbohrungen in einem Abstand von 15 m zweckmäßig. Der Unterschied zwischen der zu erkundenden Abstrombreite und der Länge der Horizontalbohrung ergibt sich dabei aus der benötigten Anlaufänge der Horizontalbohrung zur Erreichung des Bereichs über der Aquiferbasis. Die Anzahl von 11 Vertikalbohrungen zur Abdeckung der Abstrombreite ist dagegen darauf zurückzuführen, dass bei einer für die seismische Tomographie zur Verfügung stehenden Mächtigkeit der gesättigten Zone von 10 m bei einem Abstand von ca. 15 m noch eine befriedigende laterale Auflösung erreicht werden kann.

Die Kosten für die Erstellung von Bohrungen hängen wesentlich von den am Standort vorliegenden Lockergesteinen ab. Dies gilt insbesondere für die Erstellung der Horizontalbohrung. Um die Variabilität der Bohrkosten zu veranschaulichen, sind in der Abbildung 18 die Bohrkosten als Funktion des Bohrmeterpreises dargestellt. Bei dieser Darstellung wurden zusätzliche Fixkosten berücksichtigt, die sich aus der Bohrüberwachung durch das betreuende Ingenieurbüro von DM 1980,- für die Horizontalbohrung (18 Stunden je DM 110) und von DM 7.260,- für die Vertikalbohrungen (11 x 6 Stunden je DM 110) ergeben. Die Abbildung 18 veranschaulicht, dass die Kosten zur Errichtung der 200 m langen Horizontalbohrung mit dem Bohrmeterpreis stärker ansteigen als die Kosten für die 11 Vertikalbohrungen. Für einen schwer bohrbaren Untergrund bedeutet dies in der Regel, dass die Kosten für eine Horizontalbohrung deutlich die Kosten für die vertikalen Bohrungen übersteigen können. Bei einem gut bohrbaren Untergrund, wie z.B. Sande mit einer normalen Lagerungsdichte, können dagegen die Kosten für eine Horizontalbohrung unter denen für die 11 Vertikalbohrungen liegen, weil bei solchen Bedingungen der Bohrmeterpreis für die Horizontalbohrung dann deutlich unter den Bohrmeterpreis für die Vertikalbohrungen sinken kann.

Einsatz tomographischer Verfahren in Horizontalbohrungen

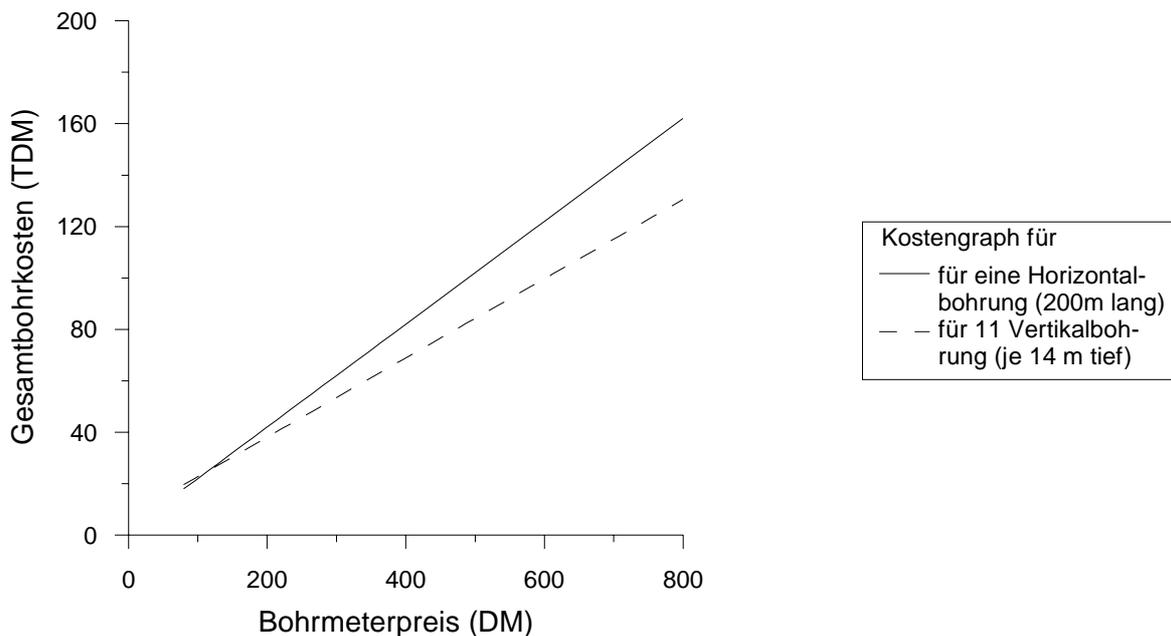


Abbildung 18: Gegenüberstellung der Kosten für die Errichtung der Vertikalbohrungen oder einer Horizontalbohrung für die angenommenen Untersuchungsbedingungen.

Bei der Betrachtung der Kosten für die tomographischen Messungen sind im Gegensatz zu den Bohrkosten kaum standortspezifische Besonderheiten zu beachten. Deshalb kann für diese Kosten ein besserer Vergleich zwischen den beiden Erkundungsansätzen erfolgen. In den Tabellen 3 und 4 sind die Kosten dargestellt, wie sie sich für die Anwendung der beiden tomographischen Methoden unter den angenommenen Standortbedingungen abschätzen lassen.

Für die Berechnung der Kosten für die seismischen Tomogramme wurde ein Meterpreis verwendet, da sich der Aufwand in der Regel nach den verfügbaren Bohrungslängen richtet. Der Meterpreis ist dabei abhängig vom Erkundungsansatz. Dies ist darauf zurückzuführen, dass auf Grund der Art und Weise der Datengewinnung und der Messgeometrien ein geringer Aufwand für das Datenprocessing bei den Messungen zwischen der Horizontalbohrung und der Geländeoberfläche notwendig ist als bei den Messungen zwischen den Vertikalbohrungen.

Bei den geoelektrischen Verfahren richten sich die Kosten im wesentlichen nach dem Auswerteaufwand und nach der Versuchsdauer, da das für die Erkundung bzw. die Beobachtung der Tracerausbreitungen erforderliche Messprogramm mit den heutzutage verfügbaren Messgeräten automatisiert werden kann. In den hier vorgestellten Kostenschätzungen wurde berücksichtigt, dass bei den geoelektrischen Tracerversuchen unter Verwendung der Vertikalbohrungen der Zeitaufwand durch eine Parallelisierung der einzelnen Tracerversuche reduziert werden kann. Der erhebliche Preisunterschied in den Einzelkosten für die Tomogramme ist vor allem darauf zurückzuführen, dass bei den Messungen unter Verwendung der Horizontalbohrung wesentlich mehr Daten gleichzeitig anfallen und dann verarbeitet werden müssen als bei der Erkundung unter Verwendung der Vertikalbohrungen.

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Kosten für unterschiedliche Konzepte zur Durchführung der seismischen Tomographie für die Strukturerkundung eines 150 m breiten Abstroms einer Altlast.

Kostenvergleich: Seismische Tomographie				
			mit V-Bohrung	mit H-Bohrung
	Menge	Einzelkosten (DM)	Kosten (DM)	Kosten (DM)
Aufbau + Instrumentierung				
	10 Tomogramme	1.000	10.000	
	1 Tomogramm	2.000		2.000
Seismischen Tomographie				
	10 Tomogramme (10m Aquifermächtigkeit)	DM 250/lfdm	25.000	
	1 Tomogramm (150 m Abstrombreite)	DM 200/lfdm		30.000
Gesamtkosten			35.000	32.000

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Kosten für unterschiedliche Konzepte zur Durchführung geoelektrischer Messungen im 150 m breiten Abstrom einer Altlast.

Kostenvergleich: Geoelektrische Messungen				
			mit V-Bohrung	mit H-Bohrung
	Menge	Einzelkosten (DM)	Kosten (DM)	Kosten (DM)
Aufbau + Instrumentierung				
	10 geoelektrische Messungen	1.000	10.000	
	1 geoelektrische Messung	4.000		4.000
a) geoelektrische Strukturerkundung				
	10 Tomogramme	2.500	25.000	
	1 Tomogramm	9.000		9.000
b) Geoelektrischer Tracerversuche zur Fließbewegung- und Fließrichtungsbestimmung				
	10 geoelektrische Tracerversuche	4.500	45.000	
	1 geoelektrischer Tracerversuch	20.000		20.000
Gesamtkosten			a) 35.000 b) 55.000	a) 13.000 b) 24.000

Aus der Betrachtung der Tabellen 3 und 4 wird ersichtlich, dass sich Kosteneinsparungen bei der Nutzung von Horizontalbohrungen durch den im Vergleich zur Verwendung von Vertikalbohrungen deutlich reduzierten Aufbau- und Instrumentierungsaufwand ergeben. Beim Einsatz der seismischen Tomographie ergeben sich bei der Verwendung der Horizontalbohrung jedoch trotz geringeren Meterpreise höhere Kosten für die Erstellung des einzelnen, langen Tomogramms als bei der Erstellung eines Tomogrammprofils unter Verwendung der Vertikalbohrungen. Diese Mehrkosten sind jedoch geringer als die durch den Aufbau und die Instrumentierung eingesparten Kosten. Somit fallen für die angenommenen Standortbedingungen insgesamt weniger Kosten für die seismische Tomographie bei der Nutzung einer Horizontalbohrung als bei der Verwendung von Vertikalbohrungen an. Der Kostenvergleich der beiden Erkundungsansätze fällt bei der Analyse der Kosten der geoelektrischen Verfahren noch wesentlich günstiger für die Verwendung der Horizontalbohrung aus.

Zusammenfassend ist auf Grund der Kostenvergleiche festzustellen, dass durch die Verwendung einer Horizontalbohrung die Kosten für die geophysikalischen Untersuchungen z.T. deutlich gesenkt werden können. Demgegenüber steht jedoch, dass die Erstellung der Horizontalbohrung in Abhängigkeit von den Standortbedingungen höhere Kosten verursachen kann als die Errichtung der benötigten Vertikalbohrungen. Somit hängt der Kostenvorteil einer Standorterkundung unter Verwendung einer Horizontalbohrung im wesentlichen von den erforderlichen Bohrkosten ab.

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen des PWAB-Forschungsprojektes PW 97 194 wurden die seismische und geoelektrische Tomographie für den Einsatz in Horizontalbohrungen weiterentwickelt. Dies beinhaltete vor allem die Weiterentwicklung der tomographischen Messtechnik für den Einsatz in Horizontalbohrungen sowie eine Weiterentwicklung der Messkonzepte. Zur Erprobung der neuen Messtechnik und Messkonzepte wurde im Naturmessfeld Lauswiesen bei Tübingen eine Horizontalbohrung für Forschungszwecke eingerichtet. Dabei zeigte sich, dass ein späterer Einsatz der geotomographischen Verfahren in Horizontalbohrungen zur Standorterkundung wesentlich von der Durchführbarkeit der Horizontalbohrung bis in die gewünschten Zieltiefe abhängt. Mit der Durchführung verschiedener Tests konnte die Einsetzbarkeit der weiterentwickelten Messausrüstung sowohl für Messungen zwischen einer Horizontalbohrung und der Oberfläche als auch für Messungen zwischen zwei Horizontalbohrungen nachgewiesen werden.

Durchgeführte Experimente und numerische Untersuchungen zeigten, dass durch die Verwendung von Horizontalbohrungen für die Durchführung tomographischer Messungen die laterale Auflösung gegenüber einer Erkundung unter Verwendung von Vertikalbohrungen verbessert wird. So können z.B. bevorzugte Fließwege in Lockergesteinsaquiferen bei einer Durchführung von geoelektrischen Tracerversuchen unter Verwendung von Horizontalbohrungen besser detektiert werden als bei einer Tracereinleitung über Vertikalbohrungen.

Des Weiteren wurde im Rahmen des Forschungsprojekts eine Interpretationsmethode entwickelt, die es erlaubt, die geophysikalisch-tomographischen Messergebnisse gemeinsam mit den hydrogeologischen Daten auszuwerten. Durch die Anwendung der Methode kann die quantitative hydrogeologische Interpretation der Ergebnisse der tomographischen Messergebnisse wesentlich verbessert werden. Die Eignung der neuen Interpretationsmethode konnte an Hand von synthetischen Modelluntersuchungen nachgewiesen werden. Für die Untersuchungen wurden dabei aus Aquiferanalogstudien abgeleitete Modelle verwendet.

Um die Zweckmäßigkeit der Verwendung von Horizontalbohrungen für tomographische Erkundungen bewerten zu können, wurden auch Kostenvergleiche der zwei unterschiedlichen Erkundungsansätze, Verwendung von Vertikal- oder Horizontalbohrungen, durchgeführt. Diese Kostenvergleiche ergaben bei einer alleinigen Betrachtung der durch die tomographischen Messungen entstehenden Kosten, dass durch die Verwendung von Horizontalbohrungen teilweise deutlich Einsparungen erreicht werden können. Werden jedoch die Kosten für die Erstellung der Bohrungen mit einbezogen, dann hängt der Kostenvorteil einer Standorterkundung unter Verwendung von Horizontalbohrungen im wesentlichen von den erforderlichen Bohrkosten ab. In Abhängigkeit von den Standortbedingungen kann sogar die Erkundung über Vertikalbohrungen trotz des Kostennachteils bei den tomographischen Messungen günstiger sein. Eine Abwägung der Kostenvorteile sollte deshalb immer standortspezifisch erfolgen. Bei der standortabhängigen Betrachtung sollte auch berücksichtigt werden, inwiefern die Bohrungen noch für andere Untersuchungen oder Maßnahmen genutzt werden.

In den Fällen wo eine Erkundung unter Verwendung von Vertikalbohrungen gar nicht möglich ist, wie z. B. unter weit ausgedehnten Bebauungen, Deponien oder Altlasten, erübrigt sich der Kostenvergleich, da hier nur eine Erkundung über Horizontalbohrungen möglich ist. Abschließend sei darauf hingewiesen, dass außer für eine Standorterkundung zur Bewertung des Gefährdungspotentials bzw. der Sanierungsmöglichkeiten einer Grundwasserkontamination sich die Kombination der geotomographischen Verfahren mit Horizontalbohrungen auch für die Überwachung von Sanierungsmaßnahmen, die Bewertung von Sanierungserfolgen sowie für die Vorerkundung von bergbaulich geplanten Untertagestrecken (z.B. Tunnel- oder Deponierungsanlagen) eignen kann.

Literaturverzeichnis

ATKIN, H., H. SIEMENS (1988): Praktische Geostatistik. – 304 S. Springer Verlag.

BUTLER, J.J. Jr (1997): The design, performance and analysis of slug tests. – 252 S. Lewis Pub.

CHARLES MACHINE WORKS, Inc. (1996): The Green Book, Horizontal Directional Drilling Systems: A New Dimension for Remediation. CMW-950. Published by The Charles Machine Works, Inc., Perry, Oklahoma.

Einsatz tomographischer Verfahren in Horizontalbohrungen

DAGAN, G. (1989): Flow and transport in porous formations. - 465S. Springer Verlag.

DOE – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (1997): Horizontal wells – Innovative technology summary report. - 17 S.

FECHNER, TH., P. DIETRICH (1997): Lithologic inversion of tomographic data. - Proc. of III. EEGS-Meeting, Aarhus, 355-358.

FOURNIER, L. B., N.C. Pressly, (1996): Horizontal Wells Offer Economic Advantage at John F. Kennedy International Airport. - Horizontal News **2** (1), 1-3.

GORANSON, C. (1992): Applicability of Petroleum Horizontal Drilling Technology to Hazardous Waste Site Characterization and Remediation. - LBL-33957, UC-000. Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, California.

ISAAKS, E.H., R.M. SRIVASTAVA, (1989): Applied geostatistics. - 561S. Oxford University Press.

KABACK, D. S., B.B: LOONEY, J.C. COREY, L.M. WRIGHT, J.L. STEELE (1989): Horizontal Wells for In-Situ Remediation of Groundwater and Soils. – In: Proceedings NWWA Outdoor Action Conference, Orlando, Florida, 121-135.

KABACK, D., D. OAKLEY (1999): Horizontal Environmental wells in the United States: A Catalog. Published by the Colorado Center for Environmental Management for the Department of Energy Office of Science and Technology.

KÄSS, W. (1992): Geohydrologische Markierungstechnik - 519 S. Borntraeger.

KRANJC, A. (Ed.) (1997): Tracer hydrology 97. - 450 S. Balkema.

KRUSEMAN, G.P., N.A. DE RIDDER (1990): Analysis and evaluation of pumpng test data. - 2. Edition, 377 S. ILRI publication 47.

LEBLANC, D.R., S.P: GARABEDIAN, K.M. HESS, L.W. GELHAR, R.D: QUADRI, K.G: STOLLENWERRK, W.W. WOOD (1991): Large-scale natural gradient tracer test in sand and gravel, Cape Cod; Massachusetts - 1. Experimental design and observed tracer movement. - Water Resources Research **27**, 895-910.

MACKAY, D.M., D.L. FREYBERG, P.V. ROBERTS (1986): A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer - 1. Approach and overview of plume movement. - Water Resources Research **22**, 2017-2029.

MCQUEEN, J. (1967): Some methods for classification and analysis of multivariate observations. - 5-th Berkeley Symposium on mathematics, Statistics and Probability 1, 281-298.

Moser, T. (1991): Shortest path calculation of seismic rays. – Geophysics **56**, 59-67.

PLUMMER, C. (1995): Horizontal Versus Vertical Well Performance. - Horizontal News **1** (2), 1-3.

PRINZ, H. (1991): Abriß der Ingenieurgeologie. - 466 S. Enke Verlag, Stuttgart.

PTAK, T. H. Schad, B. Hofmann, G. Teutsch, H. Kobus (1996): Untersuchungen im Testfeld Horkheimer Insel - Methoden zur Erkundung und zur Simulation von Strömung und Transport in heterogenen Aquiferen. – 152 S. Berichte Umweltforschung Baden-Württemberg, FZKA-PWAB 17.

SACK-KÜHNER, B. (1996): Einrichtung des Naturmeßfeldes "Lauswiesen Tübingen" – Erkundung der hydraulischen Eigenschaften, Charakterisierung der Untergrundheterogenität und Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Erkundungsverfahren. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Tübingen.

SASS, I. (1995): Brunnen und Filter für die Sanierung von Untergrundkontaminationen. – 162 S. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe.

SAWYER, C. S., K. K. LIEUALLEN-DULAM (1998): Productivity comparison of horizontal and vertical groundwater remediation well scenarios. - Ground Water **36**, 98-103.

SCHREINER, M., K. KREYSING (1998): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten Band 4 - Geotechnik Hydrogeologie. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. – 577 S. Springer Verlag.

SUN, N.-Z. (1994): Inverse Problems in Groundwater Modeling. – 337 S. Kluwer Academic Publishers.

TEUTSCH, G. , TH. FECHNER, P. DIETRICH (1996): Erprobung und Weiterentwicklung eines kombinierten tomographischen Verfahrens zur Erkundung von Strukturen und Fließvorgängen im Untergrund - Abschlußbericht PWAB 93-133. - 29 S.