Konsortium Gläserner Kanal

HOCHTIEF Construction AG – Deutsche Montan Technologie GmbH – Gesellschaft zur Erforschung der Kanalisationstechnik mbH

Quantitative Inspektion von Abwasserkanälen und -leitungen mittels geophysikalischer Verfahren

Statusbericht November 2001

Projektträger:

Stadtentwässerungsbetriebe Köln, AöR
Willy-Brandt-Platz 2
50679 Köln

Auftraggeber:

Ministerium für Umwelt und Naturschutz,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen
Schwannstraße 3
40476 Düsseldorf

Konsortium Gläserner Kanal

HOCHTIEF Construction AG – Deutsche Montan Technologie GmbH – Gesellschaft zur Erforschung der Kanalisationstechnik mbH

Projekt: Quantitative Inspektion von Abwasserkanälen und -leitungen mittels geophysikalischer Verfahren

Titel Statusbericht

Ergebnisse über die geophysikalischen Untersuchungen in einer Versuchsstrecke (begehbarer Kanal) auf dem IKT-Gelände in Gelsenkirchen

Bearbeiter Dipl.-Ing. T. Kabbe
Dipl.-Ing. A. Redmann
Dr. B. Lehmann, Dr. D. Orlowsky, Dr. R. Elsen, Dipl.-Geophys. H.J. Rübel

Datum: 29.11.2001

Dieser Bericht besteht aus 79 Seiten, 23 Abbildungen und 36 Anlagen.

Technische Geschäftsführung: HOCHTIEF Construction AG / GS CEW Köln
Neusser Straße 155
50733 Köln

Kaufmännische Geschäftsführung:
IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur
Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen

Partner geophysikalische Erkundungen: Deutsche Montan Technologie GmbH
Mines & More Division
Exploration & Geosurvey
Am Technologiepark 1

Konsortium Gläserner Kanal

HOCHTIEF Construction AG – Deutsche Montan Technologie GmbH – Gesellschaft zur Erforschung der Kanalisationstechnik mbH

45307 Essen

Inhaltsverzeichnis

Seite

1 EINLEITUNG UND ALLGEMEINE ERLÄUTERUNGEN 6

1.1 Versuchsobjekt 8

1.2 Festlegung von Untersuchungszielen 9

1.3 Ziele der Messungen vor Bodeneinbau 11

1.4 Allgemeine Vorüberlegung 11

2 EINGESETZTE VERFAHREN 13

2.1 Seismik 13
2.1.1 Reflexions- und Refraktionsseismik 13
2.1.2 Analyse von geführten Wellen (Oberflächenwellen, Tunnelwellen) 16
2.1.3 Anwendung im Kanal 18

2.2 Ultraschallverfahren 19
2.2.1 Grundlagen 19
2.2.2 Folgerungen für die Prüfung von mineralischen Baustoffen 22
2.2.3 Verfahrensbeschreibungen 23
2.2.3.1 Durchschallungsverfahren 23
2.2.3.2 Ultraschall-Echo 24
2.2.3.3 Impactecho 24
2.2.4 Einsatz und Durchführung 25

2.3 Radar 26
2.3.1 Prinzip der Methode 26
2.3.2 Anwendungsmöglichkeiten 27

2.4 Gravimetrie 28
2.4.1 Geoelektrik 29

2.5 Induktionsverfahren zur Bestimmung der Leitfähigkeiten 30
2.5.1 Prinzip der Induktionsverfahren 30
2.5.2 Anwendungsmöglichkeiten 32

2.6 Tomographie 33

2.7 Bohrlochmessungen 37
2.7.1 FullWave Sonic (FWS; 20 kHz Ultraschallbohrlochsonde) 37
2.7.2 Dual Induction (DIL) 39

2.8 Thermographie 40

3 DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN 42

3.1 Messvorbereitungen 42

4 ZUSAMMENFASSUNG DER BISHER ERZIELTEN ERGEBNISSE UND BEWERTUNG DER EINZELNEN MESSVERFAHREN 50

4.1 Vorbemerkungen ... 50

4.2 Bauwerk ... 50
4.2.1 Geometrie ... 50
4.2.1.1 Wanddicke ... 50
4.2.1.2 Bewehrung ... 51
4.2.2 Materialfestigkeiten ... 52
4.2.2.1 Beton ... 52
4.2.2.2 Bewehrung ... 53
4.2.2.3 Mauerwerk ... 53
4.2.3 Unterschiedliche Fugenausbildung ... 53
4.2.3.1 Arbeitsfuge Betonkanal ... 53
4.2.3.2 Dehnungsfuge Betonkanal ... 54
4.2.3.3 Zusammenfassung Fugenausbildung ... 55
4.2.4 Schäden ... 55
4.2.4.1 Risse innen ... 55
4.2.4.2 Risse außen ... 55
4.2.4.3 Anomalien ... 55

4.3 Baugrund ... 56
4.3.1 Boden ... 56
4.3.1.1 Bodenparameter ... 56
4.3.1.2 Schichtwechsel ... 57
4.3.2 Verbau ... 57
4.3.2.1 Spundwand ... 57
4.3.2.2 Trägerbohlwand ... 59
4.3.2.3 Seitliche Abgänge ... 60
4.3.3 Anomalien ... 60
4.3.3.1 Findling ... 60
4.3.3.2 Hohlraum ... 60
4.3.3.3 Baum ... 61
4.3.3.4 Kabel / Leitungen ... 61

4.4 Weitere Ergebnisse ... 61
4.4.1 Geschwindigkeitsmessungen im Kanal und an Bohrkernen ... 62
4.4.2 Untersuchung der Rohrverbindungen zwischen den Stahlbetonrohren bzw. Bauteilen ... 62
4.4.3 Messungen mit dem Sonic-Log ... 63
4.4.4 Messungen mit dem Induction-Log ... 65

5 FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG ... 68

5.1 Allgemein ... 68

5.2 Analyse von Oberflächenwellen ... 68

5.3 Aufbau einer Ultraschallsonde (40 kHz) ... 70

5.4 Erhöhung der Digitalisierungsrate von 32 kHz auf 128 kHz ... 71

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK ... 72

7 REFERENZEN ... 76

8 ANLAGEN- UND ABBILDUNGSVERZEICHNIS ... 77

1 Einleitung und allgemeine Erläuterungen

Stand der Inspektionstechnik von Abwasserkanälen/-leitungen sind heutzutage optische Verfahren, die z.B. im Rahmen der vorgeschriebenen Überwachung eingesetzt werden. Ihre Ergebnisse bilden die Grundlage für z.T. sehr hohe Sanierungsinvestitionen kommunaler und privater Netzbetreiber. Optische Inspektionen liefern unzureichende Informationen, was zu kostspieligen Fehlentscheidungen führen kann. So sind optische Verfahren, z.B. nicht in der Lage, hinter und in die Kanalwand zu sehen, den Verdichtungsgrad der Leitungszone und Hohlräume bzw. Risse an der Außenwand festzustellen. Ein frühzeitiges Erkennen gerade dieser Eigenschaften kann aber knappe Haushaltsmittel in beträchtlichem Umfang einsparen und die Umwelt besser schützen.

Für die Entwicklung bzw. Adaption von geophysikalischen Verfahren wurde eigens ein 40 m langer, begehbarer, unterirdischer Kanal (DN 2200) aus Ort- und Stahlbeton sowie aus Mauerwerk auf dem IKT-Versuchsgelände in Gelsenkirchen mit gezielt eingestellten Eigenschaften errichtet. Um den Kanal herum sind verschiedene Bodenarten mit Zonen unterschiedlicher Verdichtung sowie Anomalien eingebaut. Geophysikalische Verfahren wurden in diesem Versuchskanal auf ihre Eignung für die Kanalinspektion untersucht. Die neuen Inspektionsverfahren sollen quantitative Aussagen u.a. über die Geometrie, die Werkstoffeigenschaften und die Bettungssituation eines Kanals erlauben. Erreicht werden sollte dies durch den gezielten Einsatz von geophysikalischen Methoden, insbesondere der Seismik, dem Radar, dem Ultraschall und der Bohrlochgeophysik. Neben der Anwendung der Methoden in einer Kanalumgebung sollten auch spezielle Auswertetechniken entwickelt bzw. adaptiert werden.

Basierend auf den bisher weltweit durchgeführten Untersuchungen bei der nicht optischen Kanalinspektion von Abwasserkanälen wurde festgestellt, dass die Erkundung hinter der Kanalwand mit geophysikalischen Verfahren grundsätzlich möglich ist, aber noch Entwicklungsbedarf sowohl bei der Instrumentierung als auch bei den anschließenden Datenbearbeitungstechniken und Interpretation der Ergebnisse besteht. Im ersten Schritt dieses Forschungsvorhabens sollte in einer Voruntersuchung aufbauend auf dem Stand von Wissenschaft und Technik untersucht werden, welche geophysikalischen Messverfahren generell bei Untersuchungen von Abwasserkanälen zur Anwendung kommen können. Als Lösungsweg bietet sich u.a. die Übertragung von Bohrlochmessverfahren auf den Anwendungsbereich der Erkundung der Kanalbettung und -umgebung an. Die Eignung dieser Verfahren zum Einsatz in Kanälen wurde in Vorversuchen u.a. auf dem Gelände des Bergwerks Blumenthal-Haard in Oer-Erkenschwick getestet. Nach Abschluss dieser Voruntersuchungen konnte eine erste Auswahl von Messverfahren zur intensiveren Betrachtung erfolgen (s. Bericht über Voruntersuchungen). Im Laufe der Untersuchungen im Versuchskanal auf dem Gelände des IKT in Gelsenkirchen wurden weitere Methoden (z.B. Thermographie) in das Versuchsprogramm aufgenommen. Ein weiterer Schwerpunkt des Vorhabens ist Bestimmung von Einflüssen unterschiedlicher Kanalbedingungen auf die Messergebnisse und die Entwicklung von Auswerteverfahren, die es ermöglichen, zukünftig quantitative Aussagen über Wanddicke, Werkstoffeigenschaften und die Bettungssituation von Abwasserkanälen zu gewinnen. Der Vorteil solcher neuen Inspektionsverfahren für Kanalnetzbetreiber ist es, eine Entscheidung für die Auswahl

eines Sanierungsverfahrens auf einer gegenüber bisherigen Vorgehensweisen deutlich verbesserten Grundlage treffen zu können. Hierdurch könnten Kanalsanierungen zukünftig erheblich wirtschaftlicher geplant und realisiert werden.

Ziel des Vorhabens ist es, das optische Verfahren zur Inspektion von Abwasserkanälen durch zeitgemäße geophysikalische Methoden zu ergänzen, die einerseits Aussagen über das Werkstoffverhalten der Leitung selbst wie auch den Zustand der umgebenden Leitungszone ermöglichen. Die wirkungsvolle Kombination von akustischen und elektromagnetischen Verfahren, wie sie in der Werkstoffprüfung und in der geophysikalischen Erkundung des Untergrundes bereits lange Stand der Technik sind, sollen dem Kanalsanierer diagnostische Mittel zur Verfügung stellen, das er zur exakten Beurteilung von Schäden an der Leitung und in der Leitungszone benötigt.

Im Detail sollten die Ausbreitungsgeschwindigkeiten elastischer Wellen zur Bestimmung der Betonqualität und mögliche Risse, Fehlstellen, etc. gemessen und auswertet werden. Die Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen ist notwendig, um aus der Reflexionsmessung die Wanddicke zu bestimmen. Ein weiterer Arbeitsschritt ist die Messung der Reflexionen akustischer Wellen vom Kanalrohr und von den umliegenden Böden. Aus den Laufzeiten der akustischen Signale kann man Aussagen über die Wandstärke, Lagerungsdichte der Bettung und Anomalien außerhalb des Kanals gewinnen. Eine Dichtemessung sollte in Verbindung mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen zur Bestimmung der Betonqualität verwendet werden. Die Messung der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen, die Messung der Leitfähigkeit mit dem Induktionsverfahren und die Messung von der Erdoberfläche aus sollten die Erkundung des Kanals und der Umgebung ergänzen.

1.1 Versuchsobjekt

Die Durchführung der geophysikalischen Versuche erfolgten in einem, durch HOCHTIEF auf dem IKT-Gelände erstellten ca. 40 m langen begehbaren Kanal (**Anlage 1.1, 1.2 und 2**). Der begehbare Kanal besteht auf 19 m aus Stahlbetonrohren DN 2200. Die verbleibende Länge wurde hauptsächlich als Ortbetonkanal Profil 1800/2000 hergestellt. Der Zugang zum Kanal ist über einen Start- und einen Endschacht möglich. Der Kanal wurde in einer 6 m tiefen, geböschten Baugrube verlegt. Die Baugrube wurde teilweise mit Spritzbeton wasserundurchlässig ausgekleidet, um eine Wanne für die mögliche Simulation veränderlicher Grundwasserstände herzustellen. Der Kanal hat eine Überdeckung von 2,5 m. Damit werden reale Verhältnisse für die Erprobung der Oberflächenverfahren geschaffen. Die Erkundungstiefe von bis zu 6 m entspricht der üblichen Tiefenlage von Kanälen. Außerdem sichert die Überdeckung den Kanal gegen den Auftrieb, der durch die Grundwassersimulation auf den Kanal wirkt. Die **Abbildung 1** zeigt einige Bilder aus der Bauphase der Versuchsstrecke.

Abbildung 1: Aufbau der Versuchsstrecke „Gläserne Kanal“ auf dem Gelände des IKT

Im Bereich der Leitungszonen wurden verschiedene Anomaliebereiche eingebaut. Hierzu zählen eine Wasserleitung, Strom- bzw. Telekommunikationskabel, Wurzelwerk, Hohlräume, Findlinge usw.. Die Lage der Störungszonen wurde eingemessen und in einem Plan (**Anlage 1.1** und **1.2**) eingezeichnet. In der Versuchsstrecke IKT wurden für eine erste Messreihe die anstehenden Bodenarten mit unterschiedlichen Schluffanteilen sowie anthropogenen Auffüllungen eingebaut. Der Einbau des Versuchsbodens erfolgte lagenweise. Dabei wurden die Lagerungsdichte und der Wassergehalt für jede Schicht messtechnisch erfasst. Bei dem Umbau für die nachfolgenden Messungen wurden in weiten Teilen die anstehenden Bodenarten gegen Sand- und Kiesböden ausgetauscht (**Anlage 1.2**).

Von großer Bedeutung für die Aussagekraft und Zuverlässigkeit geophysikalischer Messungen sind die Methodik der Messkampagne und die geeignete Anordnung der Messapparatur. Da geophysikalische Messergebnisse ihrer Natur nach mehrdeutig sind und eine hohe Komplexität der Wechselwirkungen zwischen anregendem Signal und dem Antwortverhalten des Messobjektes besteht, bedarf es einerseits einer geeigneten Auswahl und Anordnung der Messverfahren und andererseits aufwendiger Auswertungs- und Interpretationsverfahren, um die gewünschte Information zu erhalten. Wichtig ist eine genaue Kalibrierung der Messgeräte und eine Eichung der Messwerte. Da der Aufbau der Leitungszone, die Lage und Ausdehnung von Anomalien sowie die Werkstoff-parameter der eingebauten Rohre innerhalb der Versuchsstrecke genau bekannt sind, bilden die erhaltenen Messergebnisse Referenzwerte für die späteren in-situ-Versuche.

Als Endziel sollten die Messverfahren ausgewählt werden, mit denen es generell möglich ist, den Kanal und sein Umfeld detailliert zu beschreiben. Ein weiterer Schritt ist die Anpassung der Messgeräte und der Datenbearbeitung an das spezielle Umfeld „Kanal“. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Schritte findet man im Forschungsantrag.

1.2 Festlegung von Untersuchungszielen

Vor Beginn der Messungen wurde eine Liste mit möglichen Untersuchungszielen aufgestellt. Diese stellt aufgrund der komplexen physikalischen Kontraste ein hochgestecktes Ziel für die Untersuchungen dar. Im wesentlichen wird hierbei unterschieden zwischen den Fragestellungen, die zum einen das Bauwerk Kanal betreffen und zum anderen die Erkundung der Umgebung des Kanals ermöglichen. Der Schwerpunkt liegt hierbei im wesentlichen in der Erkundung des umgebenden Bodens hinsichtlich von Auflockerungszonen bzw. Hohlräumen, aber auch Kabeln, Leitungen sowie in der Erkundung der Eigenschaften im Kanal. Folgende Untersuchungsziele wurden entsprechend des Aufbaus des Kanals benannt:

A. Bauwerk
- A.1 Geometrie
  - A.1.a Wanddicke
    - (a) Absolut
    - (b) Veränderungen (z.B. Versprung oder über den Umfang)
    - (c) Betonauflager Rohre 5/6 erkannt
    - (d) Betonauflager Rohre 5/6 geometrisch quantifiziert
    - (e) Schichtgrenze geklinkerte Sohle erkannt
    - (f) Tiefenlage Schichtgrenze geklinkerte Sohle absolut
    - (g) Betonauflager seitlich unter Mauerwerkskanal erkannt
    - (h) Betonauflager seitlich unter Mauerwerkskanal quantifiziert
  - A.1.b Bewehrung
    - (a) Abstand der Bewehrung absolut
    - (b) Abstand der Bewehrung Veränderungen
    - (c) Durchmesser der Bewehrung absolut
    - (d) Durchmesser der Bewehrung Veränderungen
    - (e) Tiefenlage(n) der Bewehrung absolut
    - (f) Tiefenlage(n) der Bewehrung Veränderungen
  - A.2 Materialfestigkeiten
  - A.2.a Beton
    - (a) Betonfestigkeiten absolut
    - (b) Betonfestigkeiten Veränderungen > 5N/mm²
  - A.2.b Bewehrung
    - (a) Stahlfestigkeit absolut
  - A.2.c Mauerwerk
    - (a) Steinfestigkeiten absolut
    - (b) Steinfestigkeiten Veränderungen
- A.3 Unterschiedliche Fugenausbildung
  - A.3.a Arbeitsfuge Betonkanal
    - (a) ohne Fugenband erkannt
    - (b) Fugenblech erkannt
    - (c) Fugenblech Tiefenlage bestimmt
    - (d) Fugenband erkannt
    - (e) Fugenband Tiefenlage bestimmt

- A.3.b Dehnungsfuge Betonkanal
  - (a) Fugenband erkannt
  - (b) Fugenband Tiefenlage bestimmt
- A.4 Schäden
  - A.4.a Risse innen
    - (a) Breite
    - (b) Tiefe
  - A.4.b Risse außen
    - (a) Breite
    - (b) Tiefe
  - A.4.c Anomalien
    - (a) Verschobene Dichtringe
    - (b) Kiesnest
    - (c) Stahlkeile im Auflagerbeton
    - (d) Transportanker
    - (e) Sanierung Schäden Betonrohr (insbesondere Loch)

B. Baugrund
- B.1 Boden
  - B.1.a Bodenparameter
    - (a) Wichte
    - (b) Reibungswinkel
    - (c) Kohäsion
    - (d) Horizontaler Bettungsmodul
  - B.1.b Schichtwechsel
    - (a) Wechsel Bodenarten erkannt
    - (b) Wechsel Verdichtung erkannt
- B.2 Verbau
  - B.2.a Spundwand
    - (a) Etwas erkannt
    - (b) Als Spundwand erkannt
    - (c) Abstand Spundwand bestimmt
    - (d) Verlauf bestimmt
  - B.2.b Trägerbohlwand
    - (a) Etwas erkannt
    - (b) Stahlträger erkannt
    - (c) Unterschied mit und ohne Verbauholz
    - (d) Als Trägerbohlwand erkannt
    - (e) Abstand Trägerbohlwand bestimmt
    - (f) Verlauf Trägerbohlwand bestimmt
  - B.2.c Seitliche Abgänge
    - (a) Etwas erkannt
    - (b) Material erkannt
    - (c) Verlauf erkannt
- B.3 Anomalien
  - B.3.a Findling
    - (a) Etwas erkannt
    - (b) Als Findling erkannt
    - (c) Abstand Findling bestimmt
    - (d) Größe Findling bestimmt
  - B.3.b Hohlraum
    - (a) Etwas erkannt
    - (b) Als Hohlraum erkannt
    - (c) Abstand Hohlraum bestimmt

(d) Größe Hohlraum bestimmt

B.3.c Baum
(a) Etwas erkannt
(b) Als Stamm/Holz erkannt
(c) Als Wurzel erkannt
(d) Lage bestimmt

B.3.d Kabel, Leitungen
(a) Etwas erkannt
(b) Als Kabel/Leitung erkannt
(c) Abstand Kabel/Leitung erkannt
(d) Lage bestimmt

1.3 Ziele der Messungen vor Bodeneinbau

Bei den Messungen vor dem Bodeneinbau im Versuchskanal auf dem IKT-Gelände sollten unterschiedliche physikalische Parameter des Kanals und seines Umfeldes erfasst werden. Als messbare Größen wurden die folgenden Parameter erkannt:

- Ausbreitungsgeschwindigkeiten elastischer Wellen.
- Reflexionseigenschaften unterschiedlicher Materialien für elastische Wellen.
- Elektrische Leitfähigkeiten.
- Reflexionseigenschaften unterschiedlicher Materialien für elektromagnetische Wellen.

Mit den Ausbreitungscharakteristiken von elastischen Wellen befassen sich die Seismik und die Ultraschalltechnik, die unterschiedliche Frequenzbereiche der elastischen Wellen und verschiedene Auswertetechniken verwenden. Hierbei kamen eine Vielzahl von unterschiedlichen Aufnahme- und Auswerteverfahren zum Zuge, die in Kapitel 2 des vorliegenden Berichtes „Eingesetzte Verfahren“ kurz beschrieben werden. Zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeiten dienen die geophysikalischen Methoden Geoelektrik (Gleichstromverfahren) und Induktionsverfahren (Wechselstromverfahren). Zur Analyse der Ausbreitungscharakteristiken von elektromagnetischen Wellen wurde das Radarverfahren verwendet.

1.4 Allgemeine Vorüberlegung

Damit die oben aufgeführten Untersuchungsziele erreicht werden können, ist eine Grundvoraussetzung, dass diese sich in den physikalischen Eigenschaften unterscheiden. Daher sind im folgenden, Erfahrungswerte aufgelistet, die dies verdeutlichen:

Anomalie / Material	Geschwindigkeit v_p [m/s]	Dichte [g/cm³]	spez. Widerstand [ohm m]
Beton	4000	1,8 – 2,5	> 10³
Lehm	500 – 1900	0,76 – 1,57	30 – 100
Mischboden	500	1,8 – 2,2	20 – 1000
Schotter	100 – 600	2,3 – 2,8	50 - 10^4
Sand	100 – 600	1,8 – 2,0	50 - 10^4
Kies	180 – 550	1,95 – 2,2	50 - 10^4
Trümmer	100 – 600	1,8 – 2,0	10^2 - 10^4
Hohlraum	340	1,3	∞
Findling	4000 – 5000	2,3 – 2,9	> 10³
Mauerwerk	3650		500 – 5000
Spundwand (Eisen)	5800	7,9	< 1
Bohlenwand (Holz)	3000 – 5000	0,65	10 – 1000
Wasser	1480	1,0	10 - 300

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften der wichtigsten Untersuchungsobjekte, die in der Versuchsstrecke vorkommen

Die geophysikalischen Verfahren reagieren auf Unterschiede bei den physikalischen Eigenschaften. Häufig lassen sich die geophysikalisch georteten Strukturen nur qualitativ bewerten. Ein Objekt ist härter oder weicher als ein anderes bzw. besitzt andere Eigenschaften bei der Leitfähigkeit. Die obigen Werte werden auch beeinflusst von dem Wassergehalt im Boden.

2 Eingesetzte Verfahren

2.1 Seismik

2.1.1 Reflexions- und Refraktionsseismik

Bei seismischen Messungen werden elastische Wellen mit Hilfe von künstlichen Erschütterungen im Untergrund erzeugt (**Abbildung 2**). In Tunneln werden diese Wellen an den Tunnelfirsten, -ulmen oder im Liegenden generiert. Die Wellen laufen durch die verschiedenen Bodenschichten, werden an Schichtgrenzen, Materialveränderungen oder Inhomogenitäten reflektiert und von den als Linie oder Fläche angeordneten seismischen Aufnehmern (Geophone) in Abhängigkeit von deren Entfernung zur Quelle registriert.

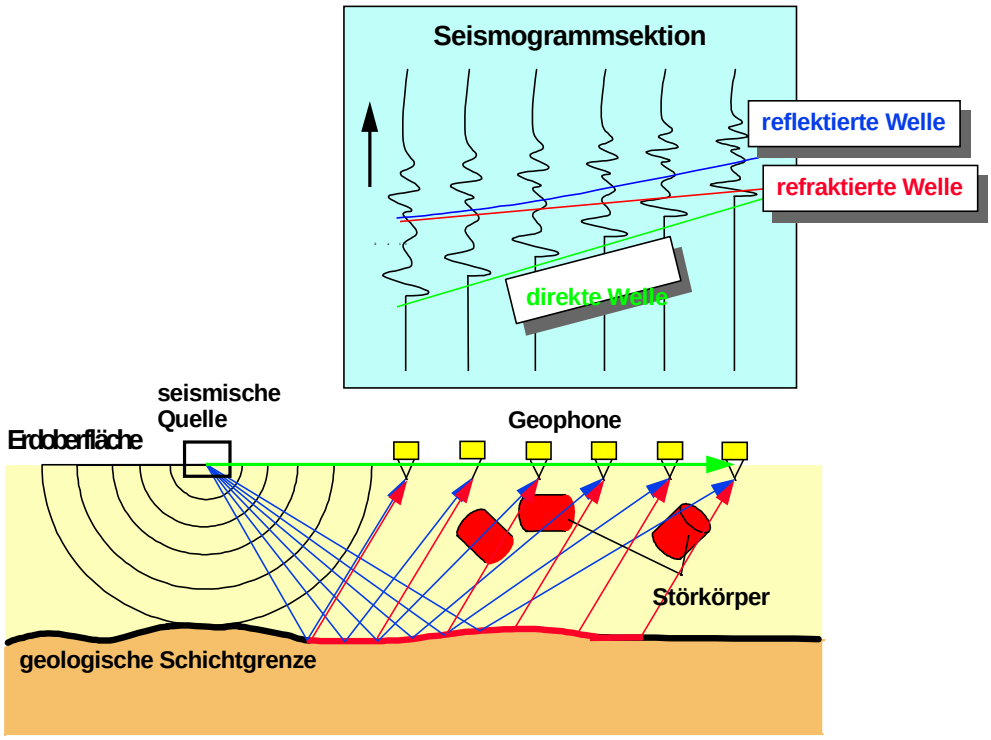


Abbildung 2: Prinzipskizze seismischer Messungen

Das Verfahren der Reflexionsseismik beruht auf der Auswertung von reflektierten seismischen Wellen, die künstlich angeregt und nach dem Durchlaufen des Untergrundes aufgezeichnet werden. An Grenzflächen oder Inhomogenitäten im Untergrund, an denen sich die sog. seismische Impedanz des Materials (Produkt aus Geschwindigkeit und Dichte) ändert, wird ein Teil der Energie dieser Wellen reflektiert. Aus der Laufzeit dieser Wellen - von der Abstrahlung an der seismischen Quelle bis hin zur Registrierung durch das Geophon - kann, unter Verwendung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten, die aus dem Datenmaterial bestimmt werden, auf die Teufe oder die Entfernung der Quelle und des Aufnehmers zur reflektierenden Grenzschicht (zum reflektierenden Objekt) geschlossen werden. Der

Anteil der an einer Grenzschicht (an einem Objekt) reflektierten Energie ist abhängig vom Verhältnis der Impedanzen auf beiden Seiten der Grenze. Da die Impedanz durch die Geschwindigkeit und die Dichte eines Materials bestimmt wird, können mit dem Verfahren Grenzschichten (Objekte) erfasst werden, an denen sich mindestens eine dieser Größen deutlich verändert.

Um die Bestimmung der seismischen Geschwindigkeiten zu ermöglichen und das reflektierte Signal gegenüber dem Hintergrundrauschen hervorzuheben, wird die Registrierung eines Schusses stets mit mehreren Geophonen, die in regelmäßigen Abständen aufgestellt werden, aufgezeichnet. Die Form der sich daraus ergebenden Laufzeitkurve ist in **Abbildung 3** dargestellt. Im Zuge der reflexionsseismischen Bearbeitung werden die seismischen Spuren nach gemeinsamen Mittelpunkten, den sog. CMP[1], sortiert und anschließend nach dynamischen Korrekturen (Geschwindigkeits-korrekturen) aufeinanderaddiert. Die resultierende Sektion entspricht einer Registrierung, bei der sowohl Quelle als auch Geophon scheinbar am CMP positioniert sind. Da mehrere seismische Spuren jedem CMP zugeordnet sind, spricht man auch von einer Mehrfachüberdeckung. Vorteil einer Mehrfachüberdeckung gegenüber Einzelmessungen, wie bei Einspurverfahren (z.B. bei Ultraschallmessungen) ist eine verbesserte Aussagesicherheit bezüglich eines Messpunktes. Das Prinzip wird in **Abbildung 4** verdeutlicht.

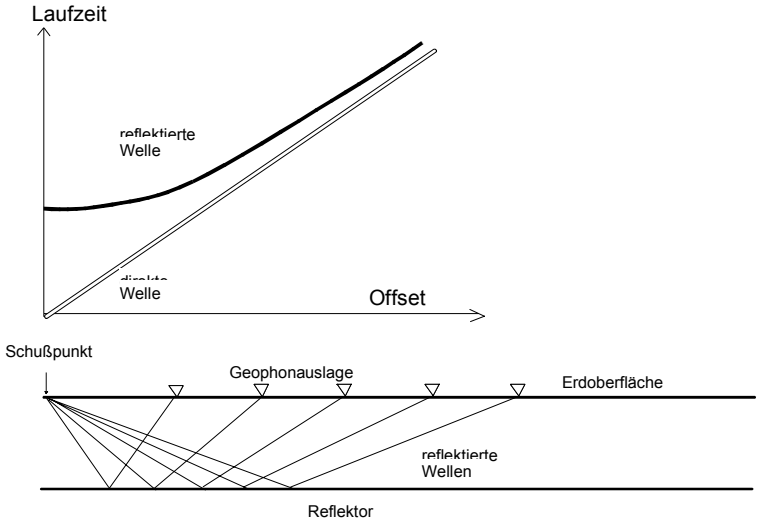


Abbildung 3: Schema der Laufwege und -zeiten reflektierter seismischer Wellen

[1] CMP – ‚Common Mid Point'

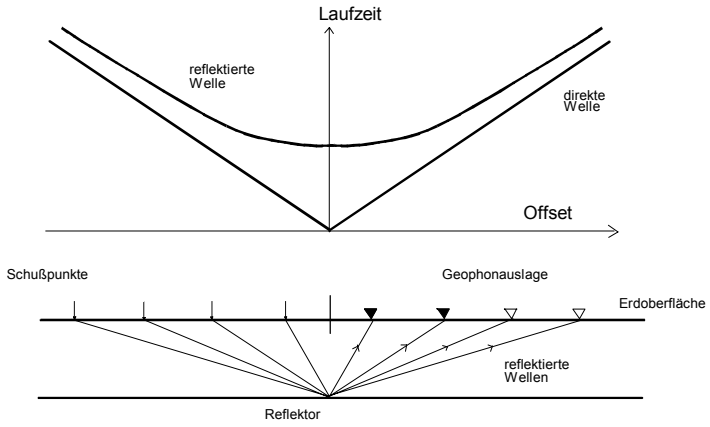


Abbildung 4: Schema der seismischen Laufwege und -zeiten bei einer CMP Sortierung

Die Datengewinnung erfolgt üblicherweise nach dem sogenannten „Roll-along/End-on“ Verfahren. Dies bedeutet, daß sich der Anregungspunkt am Anfang oder Ende einer aktiven Geophonauslage befindet und diese vor oder hinter sich herschiebt.

Das Endergebnis einer reflexionsseismischen Datenbearbeitung bezeichnet man als reflexionsseismische Stapelsektion. Die **Abbildung 5** zeigt beispielhaft eine derartige Sektion mit den interpretierten Reflexionshorizonten. Im Falle von nicht durchgängigen Reflektoren (reflektierende Objekte) beschränken sich die Reflexionsamplituden lediglich auf den Bereich, in dem ein Störkörper vorhanden ist. Mit Hilfe dieser Abbildungen können unter Verwendung von ermittelten Geschwindigkeiten die Orte von Reflexionshorizonten (horizontale Linien) und beispielsweise von Verwerfungen oder Störungen (vertikale farbige Linien) exakt abgeschätzt werden.

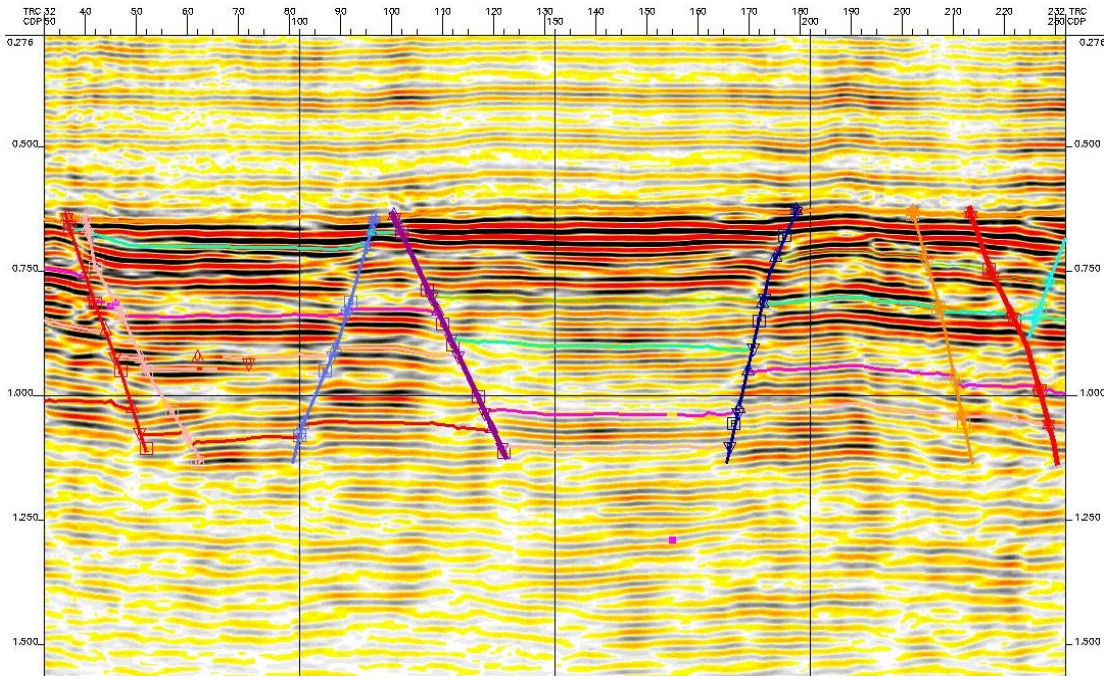


Abbildung 5: Beispiel einer seismischen Stapelsektion mit Interpretation

2.1.2 Analyse von geführten Wellen (Oberflächenwellen, Tunnelwellen)

Die Anregung von geführten elastischen Wellen mit Hilfe von künstlichen Erschütterungen im Untergrund oder an der Tunnelwand erfolgt in gleicher Weise wie bei der Reflexionsseismik (**Abbildung 2**). Im Gegensatz zur Reflexionsseismik, bei der vornehmlich P-Wellen (Schallwellen) oder S-Wellen (Scherwellen) und deren Reflexionen untersucht werden, dienen zur Erkundung von empfängernahen Bereichen (bis etwa 10 m Entfernung zum Empfänger) Oberflächenwellen oder Tunnelwellen. Die Wellen entstehen durch Interferenzen von P- und S-Wellen und breiten sich lediglich im Bereich der „Oberfläche“ aus. Unterschiedliche Frequenzen dieser geführten Wellen dringen in verschiedene Tiefenbereiche des Untergrundes ein und geben daher über unterschiedliche Regionen Auskunft. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der einzelnen Wellentypen hängen mit den elastischen Parametern des Untergrundes wie folgt zusammen:

$$\lambda = \rho(V_P^2 - 2V_S^2)$$
$$\mu = \rho V_S^2$$
$$K = \rho V_P^2 - \frac{4}{3}\mu = \lambda + \frac{2}{3}\mu$$
$$\sigma = (V_S^2 - \frac{1}{2}V_P^2) \Big/ (V_S^2 - V_P^2)$$
$$E = 2V_s^2 \ \rho(1+\sigma)$$

mit

λ -	Lamésche Konstante,
μ -	Schermodul (Lamésche Konstante),
K -	Kompressionsmodul,
σ -	Poisson'sche Zahl,
E -	dynamischer Elastizitätsmodul,
ρ -	Dichte,
V_P-	P-Wellengeschwindigkeit,
V_S-	S-Wellengeschwindigkeit.

In den Formeln ist zu erkennen, dass ein direkter Zusammenhang zwischen den Ausbreitungsgeschwindigkeiten der seismischen Wellen mit den elastischen Parametern und damit auch mit der Festigkeit des Untergrundes besteht. Aufgrund der Tatsache, dass P-Wellen die größte Ausbreitungsgeschwindigkeit besitzen, erscheinen sie als Ersteinsatz in den untersuchten Seismogrammen. S-Wellen hingegen besitzen geringere Ausbreitungsgeschwindigkeiten und geringere Amplituden und sind innerhalb der Seismogramme sehr schwer zu identifizieren.

Geführte Wellen sind dispersiv, dass bedeutet, ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ist eine Funktion der Frequenz. Obwohl geführte Wellen relativ langsam sind, können Geschwindigkeitsbestimmungen nach schmalbandigen Frequenzfilterungen sehr genau durchgeführt werden, da sie große Amplituden besitzen. Desweiteren geben unterschiedliche Wellenlängen (Frequenzen) der geführten Wellen Aufschluss über verschiedene Untergrundbereiche (bis maximal etwa 10 m Entfernung von der Empfängerlinie). Geschwindigkeitsverteilungen von unterschiedlichen Frequenzen geben Informationen über die „Festigkeit" des Materials in unterschiedlichen Entfernungen von der Empfängerlinie.

Die Analyse der geführten Wellen erfolgt im Einzelschuss und an Hand „Constant Offset" – Darstellungen (COD). Das sind Abbildungen der seismischen Wellenausbreitung, bei denen Schusspunkte und Geophone immer den selben Abstand besitzen. Die Ergebnisse der Constant-Offset-Darstellungen dienen zunächst als Indikatoren für eine „verschärfte" Analyse der Oberflächenwellen von Einzelschussdarstellungen in den jeweiligen Bereichen. Die Einzelschussanalyse umfasst eine Ermittlung von Dispersionseigenschaften, die Identifizierung von Streukörpern (Inhomogenitäten) im Untergrund und eine Erfassung der Amplitudenveränderung der Oberflächenwellen an Verdachtsorten.

Derartige Analysen von geführten Wellen wurden bisher lediglich in „Niedergeschwindigkeitsbereichen" (Schichtpakete, deren seismische Geschwindigkeit geringer ist als im umgebenden Material, z.B. Steinkohlenflöze im Sand-/Tonstein) und an der Erdoberfläche durchgeführt. Ein Betonkanal stellt einen „Hochgeschwindigkeitsbereich" dar, in dem die seismischen Geschwindigkeiten höher sind als im umgebenden Material. Dadurch bedingt, breiten sich die generierten Signale vornehmlich im Kanal selbst aus (Tunnel- oder Kanalwellen) und nur ein geringer Teil ihrer Energie wird in das umgebende Medium (Baugrund) übertragen. Ziel der seismischen Untersuchungen innerhalb des Tunnels ist es daher, den Frequenzanteil der registrierten Tunnelwellen herauszufiltern, der in den umgebenden Baugrund abgestrahlt und an Störkörpern reflektiert wird. Für derartige Messungen und Analysen liegen weltweit noch keine Erfahrungen vor, so dass eine Anpassung von oberirdischen Techniken und insbesondere die Entwicklung von neuen

Analyseverfahren zur Auswertung von Tunnelwellen (Kanalwellen) im Vordergrund der seismischen Untersuchungen innerhalb des Kanals stehen.

2.1.3 Anwendung im Kanal

Im Kanal kamen mindestens 24 aktive seismische Kanäle zum Einsatz (**Abbildung 6**). Die Ankopplung an die Kanalwand wurde durch kleine Bohrungen gewährleistet. Dieses Verfahren sollte nicht im Wasser durchgeführt werden. Die Länge der Profile und der Abstand zwischen den einzelnen Geophonen bestimmt die Eindringtiefe und das Auflösungsvermögen des Verfahrens. Die Anregung der seismischen Wellen kann mit verschiedenen Quellen erfolgen. Im Kanal wurden verschiedene Hämmer eingesetzt (200 g und 5 kg).

Abbildung 6: Anregung seismischer Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen. Einsatz der seismischen Verfahren im Kanal mit Hilfe von Beschleunigungsaufnehmern und der SUMMIT-Registrierapparatur.

Abbildung 7: Einsatz der Seismik von der Oberfläche aus, um Strukturen zwischen Oberfläche und Kanal zu erkunden (links: Hammerschlag, rechts: Luftschallseismik).

2.2 Ultraschallverfahren

Ultraschall-Prüfverfahren dienen als zerstörungsfreie Methode zur Untersuchung der Eigenschaften und des Gefüges von mineralischen Baustoffen (z.B. Bindemittel, Beton, Ziegel) und daraus erstellter Bauteile (Stahl- Spannbeton). Im Rahmen von Qualitätskontrollen oder bei Schadensanalysen können Ultraschallverfahren sowohl auf der Baustelle als auch im Labor eingesetzt werden. Ziele der Prüfverfahren sind:

- Bestimmung von Wanddicken.
- Ortung von Konstruktionselementen.
- Nachweis von Fehlstellen (z.B. zur Vorauswahl von zerstörend zu untersuchenden Bauteilen).
- Nachweis von zeitlichen Materialveränderungen (z.B. Hydrationsvorgängen).
- Ermittlung von Baustoffkennwerten (z.B. elastischen Parametern wie Schallgeschwindigkeit, E-Modul sowie darin enthaltene Einflussgrößen).

Schwerpunktmäßig vorgestellt und erläutert werden nur die Verfahren, die für die Untersuchungen an begehbaren Abwasserkanälen von Bedeutung sind und für die aus Praxis- und Laboreinsatz bereits ausreichende Erfahrungen vorhanden sind.

2.2.1 Grundlagen

Bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit Ultraschall werden im Bauteil durch einen an der Oberfläche angekoppelten Schallsender elastische Wellen angeregt. Nach dem Durchlaufen des Bauteils werden diese Wellen von einem Empfänger aufgenommen und hinsichtlich aller

Veränderungen analysiert die mit Eigenschaften oder Veränderungen des Baustoffs/Bauteils korrelierbar sind. Befinden sich Sender und Empfänger auf gegenüberliegenden Seiten des Bauteils spricht man von Durchschallungsverfahren; sind sie auf derselben Seite angeordnet von Ultraschallecho Verfahren. Die am häufigsten genutzte Wellenform ist die Longitudinalwelle (P-Welle). Sie heißt auch Dichte-, Druck- oder Kompressionswelle und hat die größte Ausbreitungsgeschwindigkeit. Alle Teilchen schwingen bei dieser Wellenform in Ausbreitungsrichtung. Weitere Wellenformen sind Transversal- (S-Welle), Dehn-, Biege- und Oberflächenwellen (vergl. Kapitel 2.1.2).

In der Ultraschall-Prüftechnik sind die Anregungszeiten der Schallsender zum Auslösen der mechanischen Wellen üblicherweise so klein, dass nur begrenzte Wellenzüge (Impulse) entstehen. Sie breiten sich mit einer für den Baustoff charakteristischen Schallgeschwindigkeit v aus. Die Schallgeschwindigkeit ist daher eine Stoffkonstante und lässt sich aus dem Laufweg l und der Laufzeit t zwischen Sender und Empfänger ermitteln:

$$v = l / t$$

Wichtige Kenngrößen bei der Ultraschallprüfung sind die Wellenlänge λ und die Frequenz f. Die Frequenz f ist die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, die vom Sender angeregt wird. Sie wird also allein vom Schallsender bestimmt. Ultraschallfrequenzen für die mineralische Baustoffprüfung werden in kHz (Kilohertz, 1 kHz = 1000 Hz) angegeben. Ultraschall beginnt definitionsgemäß bei Frequenzen f > 20 kHz. Die Wellenlänge λ ist der regelmäßige Abstand der Teilchen mit gleichem Schwingungszustand. Wellenlänge λ, Frequenz f und Schallgeschwindigkeit v sind folgendermaßen verknüpft:

$$\lambda = v / f$$

Die Wellenlänge λ im Baustoff kann daher durch Wahl des Schallsenders d. h. durch seine Prüffrequenz f festgelegt werden. Der Schallimpuls wird während seiner Ausbreitung in einem Baustoff zunehmend geschwächt. Ursachen dafür sind die Absorption im Material und die Streuung der Schallwellen an stoffeigenen Inhomogenitäten. Da die Schallschwächung durch Streuung mit steigender Frequenz stark zunimmt, ist die Größe der Wellenlänge von entscheidender Bedeutung:

- baustofftypische Inhomogenitäten - beispielsweise die Zuschläge des Betons - sollen den Impuls in der Ausbreitung so wenig wie möglich stören. Um das sicherzustellen, sollte λ deutlich größer als der Durchmesser derartiger Inhomogenitäten sein.
- Fehlstellen beeinflussen die Impulsausbreitung nur dann (und sind damit durch eine Ultraschallprüfung feststellbar), wenn die Wellenlänge λ kleiner oder etwa gleich dem Fehlstellenquerschnitt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Impulses ist.

Für Betone mit üblichen Sieblinien ergeben sich daraus Wellenlängen von λ = 2 bis 10 cm und größer, damit beispielsweise Zuschlagkörner die Messung so wenig wie möglich stören. Bei einer mittleren Schallgeschwindigkeit im Beton von v = 4.000 m/s ergeben sich somit Prüffrequenzen zwischen ca. 40 und 200 kHz, mit denen Bauteile von 1 m Dicke und mehr geprüft werden können. Bei höheren Frequenzen (und damit kleineren Wellenlängen), in stark absorbierenden Materialien wie Bitumen

oder Sand sowie in stark streuenden Materialien wie Betonen mit einem Größtkorn größer 32 mm nimmt die Schallenergie so stark ab, dass keine nennenswerten Bauteildicken mehr untersucht werden können. Trifft Ultraschall auf eine Grenzfläche zwischen zwei Materialien, wird ein Teil seiner Energie reflektiert. Der verbleibende Teil wird transmittiert, d.h. er breitet sich im zweiten Medium weiter aus. Je mehr sich die Materialien in Dichte und Schallgeschwindigkeit, also der akustischen Impedanz ($z = \rho * v$) unterscheiden, desto größer ist der reflektierte und um so geringer der transmittierte Anteil. An Grenzflächen zwischen mineralischen Baustoffen und Luft, wie sie beispielsweise bei Außenflächen, Hohlräumen und Rissen auftreten, wird Ultraschall nahezu vollständig reflektiert. Deshalb können Ultraschallwellen selbst dünne Luftschichten im Bauteil nicht durchdringen.

Bei Durchschallungsverfahren werden die transmittierten, bei Impuls-Echo-Verfahren die reflektierten Ultraschallwellen detektiert. Bei Echoverfahren ist dem Empfangssignal ein Strukturrauschen überlagert, das durch die Streuung (Reflexionen) der Ultraschallwellen am Materialgefüge entsteht. Es kann die Nutzsignale überdecken und dadurch eine Prüfung erschweren oder sogar unmöglich machen. Weitere Störsignale können durch Reflexionen unerwünschter Wellenarten, meist von Oberflächenwellen, entstehen.

Bei der Ausbreitung von Ultraschallimpulsen in Baustoffen verändert sich die Pulsform mit zunehmendem Schallweg. Dieser Effekt (Dispersion) hängt mit der frequenzabhängigen Schallschwächung des Materials zusammen. Wird er nicht berücksichtigt (wie z. B. bei praktisch allen Messgeräten der Schallgeschwindigkeit nach dem Impuls-Laufzeit-Verfahren), können systematische Fehler entstehen. Die angezeigte Schallgeschwindigkeit ist dann ein Kennwert des Materials unter ansonsten gleichbleibenden Bedingungen. Dies ist bei Messungen an unterschiedlichen Materialdicken sowie mit unterschiedlichen Messgeräten oder Prüfköpfen zu beachten.

Der Öffnungswinkel, mit dem die Ultraschallwelle vom Sender abgestrahlt wird, hängt vom Verhältnis Wellenlänge zu Senderdurchmesser ab. Bei den für mineralische Baustoffe erforderlichen großen Wellenlängen breitet sich die Ultraschallwelle dann fast kugelförmig vom Sender aus. Die für Stahl üblichen Suchverfahren zur Fehlerlokalisierung, die einen gebündelten Schallstrahl voraussetzen, lassen sich deshalb nicht direkt übertragen. Für einige Echo- Verfahren ist ein großer Öffnungswinkel aber von Vorteil. Die unterschiedlichen Wellenarten können sich nur dann in reiner Form ausbilden, wenn die Abmessungen der durchschallten Probe senkrecht zur Ausbreitungsrichtung wesentlich größer als die Wellenlänge λ sind. Insbesondere bei kleinen Bauteilabmessungen (z. B. Betonwürfel, Mörtelprismen, Ziegel) werden durch den Sender mehrere der genannten Wellenarten angeregt, so dass einer ermittelten Ausbreitungsgeschwindigkeit dann keine der aufgeführten Wellenarten mehr sicher zugeordnet werden kann. Die Ultraschallprüfung lässt in derartigen Fällen jedoch noch immer eine Differenzierung zwischen Baustoffen/Bauteilen durch Veränderungen des jeweils zur Prüfung verwendeten Schallmessparameters zu (Relativverfahren), wenn im Vergleich die gleichen Prüfköpfe, Prüffrequenzen. Geräteeinstellungen und auch gleiche Prüfkörpergeometrie vorliegen.

2.2.2 Folgerungen für die Prüfung von mineralischen Baustoffen

Bei der Ultraschallprüfung mineralischer Baustoffe/Bauteile liegen zusammenfassend folgende Sachverhalte vor:

- Die Prüffrequenzen liegen zwischen ca. 40 kHz und 200 kHz. Je feinkörniger das zu prüfende Material ist, umso höhere Prüffrequenzen können gewählt werden. In Abhängigkeit von der Schallgeschwindigkeit im Baustoff folgen aus den genannten Prüffrequenzen dann Wellenlängen im Bereich 1 bis 20 cm.
- Die Schallabstrahlung vom Sender in den Baustoff / das Bauteil hinein erfolgt ungerichtet.
- Die Prüfung und Beurteilung von mineralischen Baustoffen/Bauteilen durch Ultraschallverfahren erfolgt durch die Auswertung der Messgrößen Laufzeit, Amplitude und Frequenzspektrum des Impulses.
- Vor Auswahl und Einsatz eines Ultraschallverfahrens empfiehlt sich eine ausführliche Erörterung der Prüfaufgabe mit erfahrenen Fachleuten.

2.2.3 Verfahrensbeschreibungen

2.2.3.1 Durchschallungsverfahren

2.2.3.1.1 Ultraschall-Laufzeit

Zur Messung der Impulslaufzeit müssen ein Sende- und ein Empfangsprüfkopf auf gegenüber liegenden Flächen des untersuchten Bauteils/Probekörpers angekoppelt werden. Dazu ist i.d.R. das Einmessen eines deckungsgleichen Rasters von Messpunkten auf beiden Flächen erforderlich. Das zugehörige Prüfgerät ermittelt dann die Laufzeit t des Ultraschallimpulses auf seinem jeweils kürzest möglichen Weg durch das Bauteil vom Sende- zum Empfangsprüfkopf. Die Impulslaufzeit durch eine Baustoffprobe oder den untersuchten Abschnitt eines Bauteils/Bauwerks hängt von dem geometrischen Sender-Empfänger-Abstand sowie von der Art und den Herstellungseigenschaften des Baustoffs (flüssig, fest, Zusammensetzung, Verdichtung) und auch von seinem jeweiligen Erhaltungszustand (Fehlstellen, Risse usw.) ab.

2.2.3.1.2 Ultraschall-Intensität

Für diesen Einsatz gelten zunächst die gleichen Vorgaben wie beim Laufzeitverfahren. Neben der Laufzeit wird hier zusätzlich die Intensität des empfangenen Impulses ermittelt. Messgröße ist die Höhe der Schwingungsamplitude des Empfangsimpulses (eingebürgert hat sich dafür der Begriff Intensität, obwohl es sich physikalisch exakt um den Schalldruck handelt). Das Prüfgerät muss daher zusätzlich zur Ermittlung der Laufzeit eine Anzeige der Amplitude ermöglichen (Bildschirm, kalibrierter Verstärkungssteiler). Die Impulsintensität hängt von der Länge des Schallweges im Baustoff/Bauteil, von Materialeigenschaften/-zustand und entscheidend auch von der Ankopplung, also den speziellen Schallverlusten zwischen den Prüfköpfen und der Baustoff-/Bauteiloberfläche ab. Unabdingbare Voraussetzung für auswertbare Messungen ist daher in jedem Fall eine weitgehend reproduzierbare Ankopplung, damit das Nutzsignal nicht von Schallverlusten der Ankopplung überdeckt wird. Die Impulsintensität reagiert wesentlich empfindlicher auf Fehlstellen (Verdichtungsmängel, Hohlräume) als die Impulslaufzeit. Dieser Vorteil lässt sich aufgrund des großen Einflusses der Ankopplung auf die Intensität in der Praxis jedoch nur selten nutzen.

2.2.3.1.3 Ultraschall-Frequenzanalyse

Zur Prüfung mineralischer Baustoffe eingesetzte Ultraschallimpulse haben ein Frequenzspektrum zwischen etwa 20 kHz und 500 kHz. Mittels eines Frequenzanalysators können die Intensitäten der einzelnen Frequenzanteile eines Impulses –also sein Frequenzspektrum- ermittelt werden. Da jeder Baustoff die einzelnen Frequenzanteile in Abhängigkeit von seinem Zustand (z.B. Grad der Erstarrung/Erhärtung) unterschiedlich schwächt, bietet die Ultraschall-Frequenzanalyse eine Möglichkeit, Materialzustände mittels dieser Messgröße zu charakterisieren.

2.2.3.2 Ultraschall-Echo

Bei nur einseitiger Zugänglichkeit eines Bauteiles müssen Prüfverfahren eingesetzt werden, die nach dem Echoprinzip arbeiten. Ein angekoppelter Sendeprüfkopf leitet hierbei einen kurzen Ultraschallimpuls in das zu untersuchende Bauteil. Ein Empfangsprüfkopf, der auf der selben Bauteilfläche angekoppelt ist, detektiert die Bauteiloberflächen, Konstruktionselementen oder Fehlstellen (Reflektoren) reflektierten Impulsanteile (Echos). In vielen Fällen kann ein Prüfkopf auch gleichzeitig als Sender und Empfänger dienen. Durch Auswertung der Impulslaufzeit (sowie ggf. weiterer Messgrößen wie Intensität oder Frequenz) können Aussagen über die Tiefenlage und die Ausdehnung der Reflektoren getroffen werden. Vom Prinzip ermöglicht das Echoverfahren, den Abstand bis zur ersten Grenzschicht mit einem deutlichen Sprung in der Dichte oder der Schallgeschwindigkeit, d.h. in der Impedanz zu ermitteln. Ob es sich dabei um die Dicke des Bauteils, eine Ablösung, einen Riss, eine konstruktiv bedingte Trennschicht oder eine dichte Bewehrungslage handelt, kann den Daten nicht direkt entnommen werden. Zur Beurteilung sind zusätzliche Randinformationen notwendig. Das Echoverfahren ist gut anwendbar bei dichten homogenen Werkstoffen wie z.B. gebrannten Steinen. Wegen der unterschiedlichen Aufgabenstellung stehen verschiedene Verfahrensmodifikationen zur Auswahl, die sich hinsichtlich Prüfaufwand und Aussage z. T. deutlich unterscheiden. Die Auswahl der jeweils angemessenen Methode erfordert daher eine hohe Sachkenntnis.

Abbildung 8: Einsatz der Ultraschalltechnik im Kanal.

2.2.3.3 Impactecho

Das Impactecho-Verfahren (Schlagecho) arbeitet in Reflexion und nutzt im Gegensatz zu den vorstehend beschriebenen Verfahren sowohl Ultraschall als auch Hörschall. Für diese Verfahren gelten gleichermaßen die in Kapitel 2.1.1 dargelegten Zusammenhänge für die Ausbreitung mechanischer Wellen in Beton und Naturstein, insbesondere auch, was die Streueffekte der Zuschläge und die Erkennbarkeit von Fehlstellen betrifft. Niedrige Prüffrequenzen und damit große Wellenlängen reduzieren die Schallstreuung üblicher Zuschläge, vergrößern jedoch gleichzeitig die für die Erkennbarkeit notwendige Minimalausdehnung eines Defekts oder eines Einbauteils wie z.B. eines Spanngliedes. Anregung und Nachweis der mechanischen Wellen unterscheiden sich beim Schlagecho

von der in 2.2.1 beschriebenen Technik bei Ultraschalluntersuchungen. Die Schallerzeugung erfolgt durch einen mechanischen Stoß (z.B. Anprall einer Kugel), der Nachweis der reflektierten Welle erfolgt durch Beschleunigungsaufnehmer mit Punktkontakt zur Oberfläche des Untersuchungsobjekts. Damit entfallen die Probleme der Ankopplung flächenhafter Prüfköpfe, aber auch deren integrierender Effekt für die Heterogenität des Baustoffs Beton. Zuschlagkörner verhalten sich unter Stoßbelastung anders als benachbarte Mörtelbereiche. Das breite Frequenzspektrum der durch Stoss erzeugten mechanischen Wellen regt in der untersuchten Struktur Resonanzen an, wenn mindestens eine kennzeichnende geometrische Abmessung der Struktur in einer festen Beziehung zur Wellenlänge steht. Insbesondere ist dies der Fall bei Platten und durch oberflächenparallele Risse abgelöste Plattenschichten. Die in der Nachbarschaft des Anregungspunktes registrierte Oberflächenbeschleunigung wird daher auf Resonanzen und die zugehörigen Frequenzen untersucht. Die Interpretation der auftretenden Amplitudenmaxima als Funktion der Frequenz stützt sich grundsätzlich auf die Beziehung:

$$f_0 = v/2D_0,$$

wobei f_0 die Frequenz der Grundresonanz, v die Geschwindigkeit der Longitudinalwelle (P-Welle) im Baustoff und D_0 die Dicke des resonanten Bereichs bedeuten. Im Allgemeinen ist D_0, die Bauteildicke auch die gesuchte Größe.

2.2.4 Einsatz und Durchführung

Wesentliche Voraussetzung für die Ultraschallprüfung ist ein guter Schallübergang vom Sender in den Baustoff bzw. von dort wieder auf den Empfänger. Ideal für eine Prüfung sind daher möglichst glatte Bauteiloberflächen. Ist dies nicht der Fall, wird an den Prüfstellen ggf. eine Vorbehandlung der Oberfläche z.B. durch Anschleifen erforderlich. Deckbeschichtungen müssen i.d.R. vollständig entfernt werden. Besonders ist zu beachten, dass durch Luftspalte zwischen Prüfköpfen und Bauteiloberflächen praktisch keine Schallenergie übertragen wird. Daher ist die Verwendung eines deutlich besser schallübertragenden Koppelmittels notwendig, welches die durch Rauheit der Oberfläche zwangsläufig entstehenden Luftspalte ausfüllt. Bewährt haben sich hier z.B. Schnellzement, Vaseline oder Glyzerin sowie zusätzlich festes Anpressen der Prüfköpfe. Bei fast allen Verfahren werden Messungen von mehreren Prüfbereichen (punktweise oder kontinuierlich) miteinander verglichen und ausgewertet. Je gleichmäßiger die Ankopplung erfolgt, desto aussagesicherer ist das Prüfsignal. Viele Verfahren erhöhen die Aussagesicherheit zusätzlich durch eine Mittelung über viele Prüfstellen. Das Ergebnis und die Aussagefähigkeit der Ultraschallprüfungen hängen daher wesentlich von einer guten und gleichmäßigen Ankopplung ab. Die zur Sicherstellung einer guten Ankopplung erforderlichen Maßnahmen stellen jedoch kein Einsatzhindernis dar.

2.3 Radar

2.3.1 Prinzip der Methode

Das Radar-Verfahren (in der Literatur auch als Bodenradar, Georadar, EMR (elektromagnetische Reflexion), GPR (Ground Penetrating/probing Radar) oder RES (Radio Echo Sounding) bezeichnet) ist ein elektromagnetisches Verfahren, das auf ähnlichen Grundlagen wie die Reflexionsseismik und die Entfernungsmessung mit Sonar und Radar beruht. In der angewandten Geophysik gehört es zu den neueren Verfahren, die in einer ständigen technischen Weiterentwicklung begriffen sind. In seiner ursprünglichen Form nutzt es kurze elektromagnetische Impulse, die von der Oberfläche in den Untergrund abgestrahlt und nach der Reflexion an Schichtgrenzen und Objekten oder der Streuung an Einlagerungen wieder empfangen werden. Dabei werden die Laufzeiten und Amplituden der elektrischen Feldstärke E dieser Impulse aufgezeichnet. Reflexionen und Diffraktionen elektromagnetischer Wellen entstehen, wenn im Untergrund stärkere Kontraste in den elektrischen Materialeigenschaften auftreten. Dabei dominieren Änderungen der Dielektrizitätskonstante ε (DK) und der Leitfähigkeit σ. Das Sende- und Empfangssignal wird in der Regel durch breitbandige Dipolantennen abgestrahlt und empfangen. Die Arbeitsfrequenzen liegen etwa im Bereich von 10 MHz bis 1000 MHz, für Materialprüfungen auch darüber. Die Ankopplung geschieht durch eine starke Änderung der Richtwirkung bei Auflegen oder der Annäherung der Antennen an den Boden. Eine hohe Pulsfolge der Sendesignale ermöglicht quasikontinuierliche, profilhafte Messungen mit bewegter Antennenanordnung (**Abbildung 9**). Dabei sind Leistungen bis zu mehreren Kilometern pro Messtag möglich. Der Vorteil des Verfahrens liegt bei geeigneten Untergrundverhältnissen in der zerstörungsfreien Anwendung mit einer extrem hohen horizontalen und vertikalen Auflösung sowie der Möglichkeit, die Messergebnisse in Echtzeit auf einem Monitor oder Profilschreiber als Radargramm darzustellen. In vielen Fällen ist bereits im Gelände eine vorläufige Interpretation und Aussage zur Aufgabenstellung möglich.

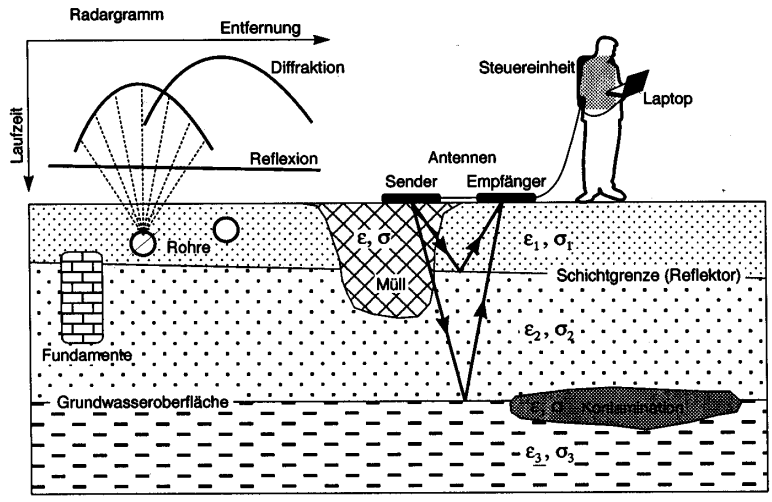


Abbildung 9: Prinzip des Radars

Die Arbeitsfrequenz, die meist als Mittenfrequenz eines durch die impulsförmige Anregung erzeugten breitbandigen Spektrums angegeben wird, lässt sich je nach der Aufgabenstellung und den Eigenschaften des Untergrundes in weiten Grenzen wählen. Wegen der kürzeren Wellenlängen besitzen hochfrequente Messungen ein höheres Auflösungsvermögen als niederfrequente Untersuchungen. Bei einem durchschnittlichen Wert der relativen Dielektrizitätskonstante $\varepsilon = 9$ für Lockergestein und Böden treten bei Frequenzen von 10-1200 MHz Wellenlängen λ von 10 m –bis 0,1 m auf. Für die Erkundung des Kanals und seiner Umgebung werden die Frequenzen 225 MHz, 450 MHz, 900 MHz und 1200 MHz eingesetzt. Profile werden mit Punktabständen zwischen 1 cm und 5 cm vermessen Die stärkere Beeinträchtigung hoher Frequenzen durch Absorption und Streuung führt jedoch zu einer entsprechenden Verringerung der Erkundungstiefe. Radarmessungen lassen sich vor allem bei hochohmigem Untergrund wie trockenen Sanden mit geringem Tonanteil oder Festgestein erfolgreich einsetzen.

Wie bei der Reflexionsseismik sind neben den Impulsverfahren auch Korrelations- und Frequenzbereichsverfahren in der Erprobung oder bereits im Einsatz. Radarmessungen können auch als Reflexions- und Tomographiemessungen in Einzelbohrungen oder als Zwischenfeldmessungen durchgeführt werden.

2.3.2 Anwendungsmöglichkeiten

- Ortung von Rohrleitungen, Kabeln und anthropogenen Einlagerungen (z. B. Fässer, Fundamente etc.),
- Hohlraumortung,
- Untersuchung von Sediment- und Bodenstrukturen, Abgrenzung von Anomalien und Homogenbereichen,
- Nachweis von Störungen, Klüften und Rissen im Festgestein,
- Auffinden von Tonlinsen, Eiskeilen, Torfvorkommen etc.,
- Ermittlung der Lage der Grundwasseroberfläche in Kies, Sand und Sandstein. Abbildung der Aquiferbasis (bei geringer Leitfähigkeit des Grundwassers),
- Strukturerkundung (zur Anlage von Untertagedeponien) im Salzbergbau,
- (Detektion organischer Schadstoffe oberhalb oder an der Grundwasseroberfläche),
- (Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes von Böden und Bauwerken).

Das Verfahren versagt, wenn an der Oberfläche gut leitende Substrate (feuchte Tone und Schluffe, Wässer mit Salzfracht, eisenhaltige Schlacken u. ä.. vorkommen.

Abbildung 10: Einsatz des Radars im Kanal

2.4 Gravimetrie

In der Gravimetrie wird das Schwerefeld der Erde vermessen, das durch eine ungleichmäßige Dichteverteilung im Untergrund und der Umgebung des Messpunktes gestört wird. Klassische Explorationsziele sind Salzstöcke, die eine wesentlich geringere Dichte aufweisen als die Umgebung, und Basaltkörper, deren Dichte deutlich erhöht ist.

In ingenieurgeophysikalischen Anwendungen geht es hauptsächlich um das Auffinden von Fundamenten, Gängen, Hohlräumen, usw.. Im Umweltbereich lassen sich mit der Gravimetrie beispielsweise Deponiekörper abzugrenzen, da solche Aufschüttungen meist eine deutlich geringere Dichte aufweisen als das 'gewachsene' Umgebungsmaterial. In der Gravimetrie wird zusätzlich oft der Vertikalgradient der Schwere bestimmt, um flacher liegende Störkörper gegenüber den tiefer liegenden hervorzuheben.

Abbildung 11: Gravimetrische Messungen im Versuchskanal auf dem IKT-Gelände

2.4.1 Geoelektrik

Bei den geoelektrischen Verfahren wird dem Untergrund über Elektroden ein schwacher Gleichstrom zugeführt. Mit Hilfe von Sonden wird das entstehende, stationäre Potentialfeld erfasst, das durch die Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund beeinflusst wird. Mit geeigneten Modellrechnungen lässt sich aus den Messwerten die Verteilung des wahren spezifischen Widerstands im Untergrund bestimmen. . Zusätzlich zum Widerstand wird auch der IP-Effekt gemessen. Hiermit wird die Fähigkeit des Bodens festgestellt, Strom zu „speichern“ (die Aufladbarkeit). Hiermit können Böden (z.B. Tone, Schluffe) unterschieden werden, die vom elektrischen Widerstand her gleich sind.

Geoelektrische Messungen werden als Tiefensondierung, Profilkartierung, Pseudosektion oder Tomographie ausgeführt. Damit erhält man Aussagen über die Schichtung unter dem Sondierungspunkt, Widerstandsänderungen entlang eines Profils oder Schnittbilder der Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund.

Geoelektrische Erkundungen liefern Bilder der Leitfähigkeitsverteilung auch bis in große Tiefen. Es werden geologische Schichtungen, Grundwasserleiter, Kontaminationen, Hohlräume und Bauwerke erfasst.

Abbildung 12: Einsatz der Geoelektrik über dem Kanal auf dem Gelände von IKT, Gelsenkirchen

2.5 Induktionsverfahren zur Bestimmung der Leitfähigkeiten

2.5.1 Prinzip der Induktionsverfahren

Induktionsverfahren können bodengebunden, vom Flugzeug aus oder in Bohrungen zur Untersuchung von Leitfähigkeitsstrukturen im Untergrund eingesetzt werden (Allgemein werden sie als EM-Verfahren bezeichnet). In Abhängigkeit von der Quelle des elektromagnetischen Feldes unterscheidet man passive und aktive Verfahren. Passive Verfahren, wie VLF/VLF-R nutzen weit entfernte Radiostationen als Sender. Zweispulen-Verfahren sind aktive Verfahren, die zur Erzeugung der elektromagnetischen Felder transportable Sender verwenden. Wegen der Arbeit mit Wechselstrom im Frequenzbereich von etwa 100 Hz -60 kHz ist auch die Bezeichnung Niederfrequenzmethoden, Wechselstromverfahren oder Frequenzbereichs-Elektromagnetik gebräuchlich.

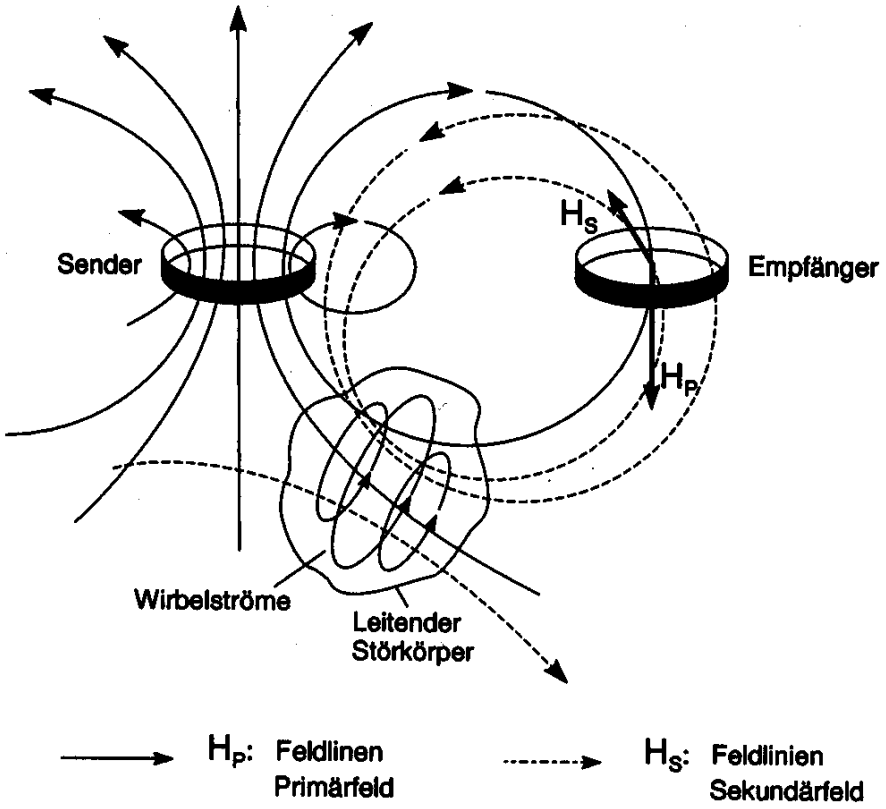


Abbildung 13: Prinzip von Wechselstromverfahren

Die **Abbildung 13** erläutert das Prinzip des Verfahrens. Durch die Induktionswirkung des Magnetfeldes eines in der Sendespule fließenden Wechselstroms entsteht im leitfähigen Untergrund ein Wirbelstromsystem. Das daran gekoppelte sekundäre magnetische Feld überlagert sich dem Primärfeld der Sendespule. Am Empfänger wird mit einer Luft- oder Ferritkernspule eine magnetische Komponente des resultierenden Gesamtfeldes registriert. Das mit dem Magnetfeld gekoppelte elektrische Feld wird bei den hier vorgestellten Zweispulen-Verfahren nicht gemessen. Die induktive Ankopplung ermöglicht Leitfähigkeitsmessungen auch unter solchen Geländebedingungen, für die der Einsatz von Gleichstromverfahren erschwert oder praktisch unmöglich ist. Das betrifft Bereiche, die mit Beton oder Asphalt versiegelt sind und Gebiete mit abschirmender hochohmiger Bedeckung wie trockene Sande, anstehendes Festgestein oder tiefgefrorenen Boden. Weitere Vorteile entstehen durch den relativ geringen Platzbedarf der Messanordnung. Bezogen auf eine bestimmte Erkundungstiefe kann der Abstand von Sende- und Empfangsspule relativ gering gewählt werden. Die kleinen Aufstellungsweiten und die induktive Ankopplung bieten eine Reihe von Vorzügen:

- Hohe Mobilität und großer Messfortschritt, geringer Personalbedarf bei der Messung,
- Reduzierung des Einflusses seitlicher Inhomogenitäten und kleiner oberflächennaher Leitfähigkeitsanomalien,

- Leitfähigkeitsänderungen können wegen des relativ geringen stromdurchflossenen Untergrundvolumens mit hoher Genauigkeit lokalisiert werden.

Elektromagnetische Zweispulen-Systeme werden zur Kartierung und zur Sondierung eingesetzt. Bei einer Kartierung bewegt man die tragbaren Sende- und Empfangsspulen in einem festen gegenseitigen Abstand durch das Messgebiet und erfasst laterale Leitfähigkeitsänderungen für eine oder mehrere Frequenzen des Sendestroms. Die Ermittlung der vertikalen Leitfähigkeitsverteilung mit einer Sondierung kann sowohl durch die Änderung des Spulenabstandes (geometrische Sondierung, Abstandssondierung) als auch über die Änderung der Frequenz (Frequenzsondierung, parametrische Sondierung) realisiert werden. Die Frequenzen und Spulenabstände müssen jeweils aufeinander abgestimmt gewählt werden. Die Mehrzahl der in der Erkundung verwendeten Zweispulen-Systeme wird bevorzugt für Kartierungszwecke eingesetzt. Durch bestimmte Vorkehrungen bei der Messung können mit einigen dieser Geräte auch vertikale Leitfähigkeitsprofile für einfache strukturelle Verhältnisse (Zweischichtfall) ermittelt werden.

2.5.2 Anwendungsmöglichkeiten

- Lokalisierung und Abgrenzung verdeckter Inhomogenitäten,
- Verfolgung von Kluft- und Störungszonen im Festgestein,
- Ermittlung der lateralen und vertikalen Verbreitung rolligen und bindigen Lockergesteins sowie von Festgesteinen,
- Ermittlung von Schichtmächtigkeiten,
- Erfassung und Beobachtung von Schadstoffausbreitungen (Schadstoff-Fahnen),
- Monitoring einer Schadstoffausbreitung durch Wiederholungsmessungen,
- Abgrenzung oberflächennaher Versalzungsbereiche,
- Lokalisierung vergrabener metallischer Objekte (Tanks, Fässer, Container),
- Ortung oberflächennaher Rohr- und Kabeltrassen sowie verdeckter Fundamente in Industriebrachen,
- Nachweis von Munition und Blindgängern,

2.6 Tomographie

Die seismische Tomographie liefert ein flächenhaftes Abbild von der Verteilung der Kompressions-Wellengeschwindigkeit und der Amplitudendämpfung und damit indirekt ein Abbild von der Verteilung gewisser Materialeigenschaften. Die schnittbildartige Erfassung der Daten erfolgt zerstörungsfrei. Tomographische Durchschallungsverfahren in der Geophysik basieren auf Entwicklungen in der Medizin und der zerstörungsfreien Materialprüfung (Röntgen- und Gamma-Strahlung, Ultraschall).

DMT Mines & More Division hat neben hochfrequenten reflexionsseismischen Anwendungen sowie Flözwellenmessungen schon erfolgreich eine Reihe tomographischer Einsätze durchgeführt und ist damit der einzige erfahrenere Anwender der seismischen Tomographie in Deutschland. Es liegen umfangreiche Erfahrungen im Bereich der Stadtsanierung (Ortung von Hohlräumen, Standfestigkeitsuntersuchungen, Untersuchung des Mauerwerkes), im Bereich des Bergbaus (Schwächezonen, Erzgänge), im Bereich der Trassenvorerkundung und der Endlagerung von radioaktiven Abfällen (Beurteilung der Gesteinsqualität) vor.

Aufgrund der abgeteuften Bohrungen wird je nach Aufgabenstellung eine VSP[2]- und/oder eine 'Crosshole'-Tomographie durchgeführt (**Abbildung 14**). Hierbei befinden sich die Quellpunkte in einem Bohrloch und die Empfänger im gegenüberliegenden Bohrloch sowie an der Oberfläche. Die Anzahl und der Abstand der Quell- und Empfängerpunkte ist abhängig von der Größe der zu suchenden Objekte.

Die **Abbildung 15** gibt für die Messgröße "Laufzeit" den Einfluss einer Anomalie bei einer Parallel-Durchstrahlung wieder. Hierbei könnte V_1 die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer seismischen Welle im ungestörten Gestein und V_2 die Ausbreitungsgeschwindigkeit in der z.B. aus Lockermaterialien bestehenden Anomalie sein. Deutlich erkennt man die entsprechenden Laufzeiteffekte. Laufzeiteffekte werden auch aufgrund der vorliegenden Geologie oder bei Vorliegen einer Schwächezone, die parallel zur Wellenausbreitung liegt, hervorgerufen.

Das Ziel der Tomographie ist es, ein flächenhaftes Abbild von der Verteilung der Kompressions-Wellengeschwindigkeit oder der Amplitudendämpfung und damit indirekt ein Abbild von der Verteilung gewisser Materialeigenschaften auf Schnitten durch ein Volumen abzuleiten, in das man zur Probennahme nicht eindringen kann oder will. Ein Untersuchungsbereich wird dabei aus allen Richtungen möglichst gleichmäßig durchstrahlt. Für den Weg durch das Medium benötigen die Wellen z.B. eine Laufzeit, die, außer von der vorgegebenen Entfernung, von der Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Welle im Medium abhängt. Diese Geschwindigkeit ist von den Eigenschaften (Zusammensetzung, Struktur, Auflockerung) des Gesteins abhängig.

[2] '**v**ertical **s**eismic **p**rofiling'

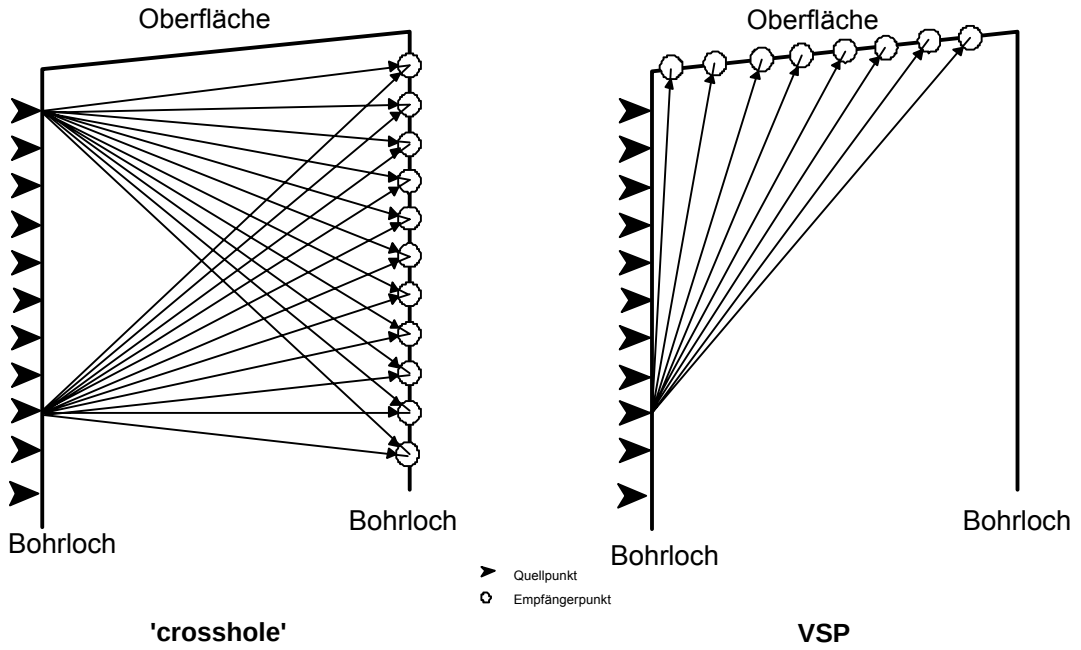


Abbildung 14: Messgeometrie der seismischen Tomographie; links die 'crosshole'-Anordnung, rechts die 'VSP'-Anordnung

Eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche tomographische Inversionsrechnung ist das Vorliegen von Durchschallungsdaten vom gesamten Untersuchungsbereich mit einer möglichst gleichmäßigen Winkel- und Flächenüberdeckung, mit einer hohen Amplitudentreue sowie einer großen Zeit- und Ortsgenauigkeit.

Ideal in diesem Sinn ist eine Durchstrahlung, bei der der "Prüfling" in einer Quell- und Empfänger-Anordnung gedreht werden kann. Das Abbild bestimmter Materialeigenschaften in der durchstrahlten Fläche des Prüflings lässt sich durch eine tomographische Inversionsrechnung ableiten. Der Ablauf einer Rechnung für gerade Strahlen soll kurz ohne die mathematische Formulierung am Beispiel der Messgröße "Laufzeit" erläutert werden.

Aus der Vermessung ist der Weg von der Quelle zum Empfänger bekannt. Gemessen wird die Laufzeit von der Quelle zum Empfänger. Der Quotient aus Strahllänge und Strahllaufzeit ergibt die mittlere Strahlgeschwindigkeit.

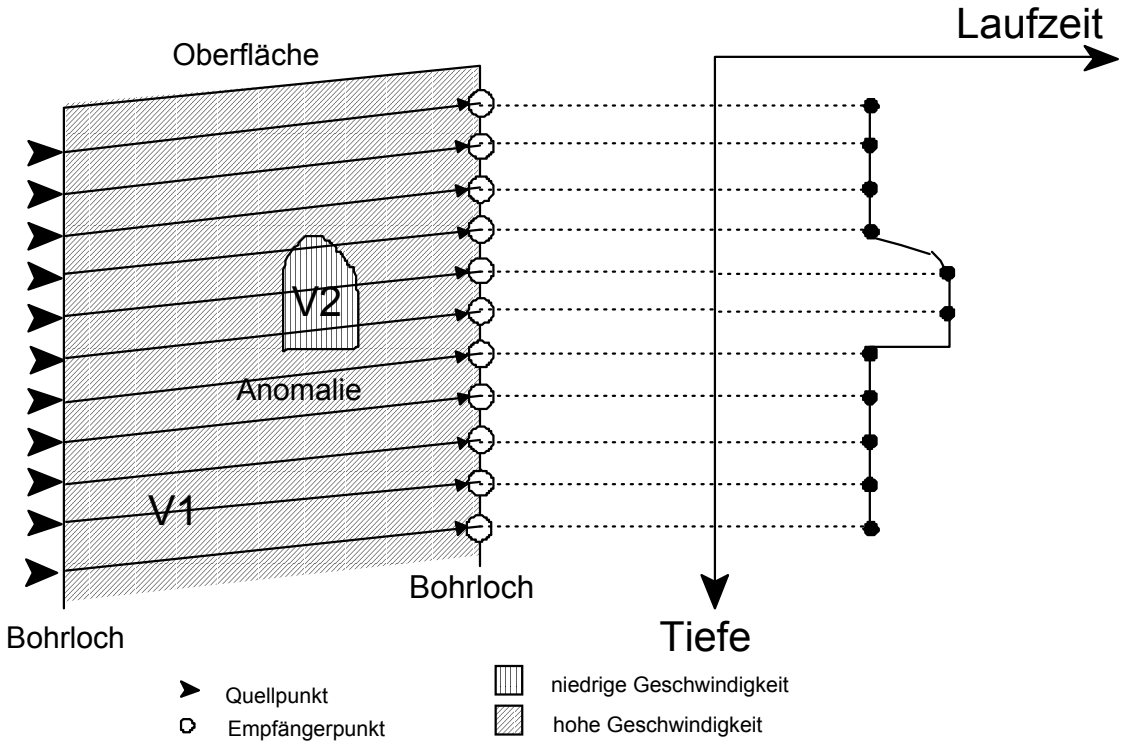


Abbildung 15: Laufzeiteffekt aufgrund einer Anomalie bei einer Parallel-Durchstrahlung

Nimmt man an, dass es eine lokale Anomalie in der Messfläche gibt, so wird sie von einem Teil der Strahlen aus unterschiedlichen Richtungen durchlaufen. Diese Strahlen zeigen eine veränderte mittlere Geschwindigkeit gegenüber dem Rest der Strahlen, der diese Anomalie nicht quert. Stellt man z.B. nur das Spinnennetz aller Strahlwege dar, die mit der Geschwindigkeit des ungestörten Gesteins beobachtet werden, so bleibt der anomale Flächenbereich frei von Strahlen. Allein dadurch kann meist der anomale Bereich bereits sichtbar gemacht werden.

Die Laufzeit einer Welle, die sich von der Quelle zum Empfänger ausbreitet, ist im infinitesimalen Fall das Integral der Langsamkeit (reziproke Geschwindigkeit) über den Laufweg. Im diskreten Fall, bei dem die Messfläche in Gitterelemente eingeteilt wird, ist die Laufzeit die Summe über das Produkt aus der in den Gitterelementen konstant angenommenen Langsamkeit und der Länge der dazugehörigen Strahlstücke. Bei der Inversionsrechnung wird diese von Element zu Element veränderliche Langsamkeit entlang der Strahlstücke aus der Gesamtsumme (Strahllaufzeit) zurückgerechnet.

Jeder Strahl, der das gleiche Gitterelement quert, enthält dadurch, dass er einen anderen Weg gelaufen ist, eine andere mittlere Strahlgeschwindigkeit. In der mittleren Strahllaufzeit ist auch die Laufzeit durch das gemeinsame Gitterelement enthalten und wegen der bekannten Strahlstücklänge auch die Information über die Elementgeschwindigkeit.

In der Praxis haben sich die iterativen Inversionsverfahren wegen ihrer einfacheren Handhabung durchgesetzt. Meist werden in der Geophysik die 'Algebraic Reconstruction Technique' (ART) und die 'Simultaneous Iterative Reconstruction Technique' (SIRT) verwendet. Das SIRT-Verfahren ist nach unserer Erfahrung besonders robust. Bei Anwesenheit von Datenrauschen durch Verkehr, Maschinen, Stromleitungen, etc. entstehen vergleichsweise die geringsten Verzerrungen. Dieses Verfahren wird von uns neben dem ART-Verfahren und dem der Konjugierten Gradienten hauptsächlich angewendet.

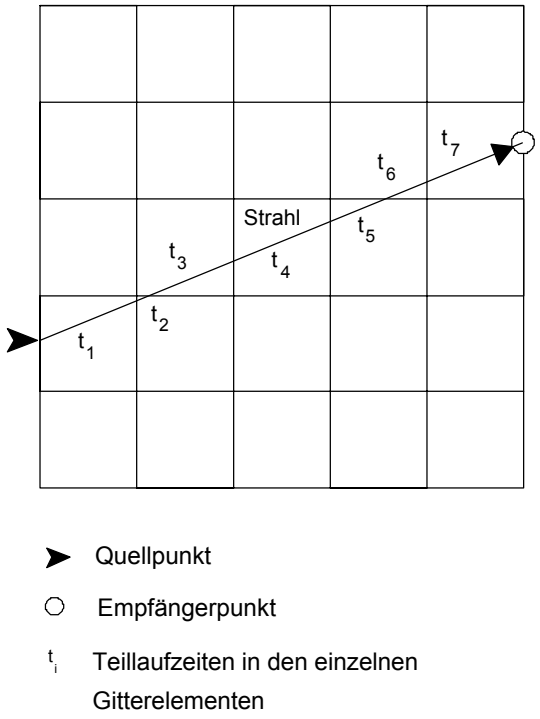


Abbildung 16: Prinzip der seismischen Tomographie

Gemeinsam ist allen Verfahren das Aufstellen eines Gleichungssystems, in dem die Messgröße für jeden Strahl von der Quelle zum Empfänger, (z.B. die Laufzeit), beim geradlinigen Durchqueren der einzelnen Gitterelemente in Teillaufzeiten zerlegt werden kann (**Abbildung 16**). Beim ART- oder SIRT-Verfahren löst man das Gleichungssystem zeilenweise, d.h. die Gleichungen einzeln, also strahlweise. Dabei gibt man sich ein Modell der Geschwindigkeitsverteilung im durchstrahlten Bereich vor; so kann man die Laufzeit von der Quelle zum Empfänger pro Strahl als Summe der Teillaufzeiten durch die Gitterelemente errechnen.

Aufgrund der Laufzeitdifferenzen zwischen den gemessenen und berechneten Laufzeiten werden dann Geschwindigkeitskorrekturen für jedes Gitterelement berechnet. Mit dieser neuen Geschwindigkeitsverteilung erhält man wieder neue theoretische Laufzeiten. Dieser Vorgang wird solange wiederholt bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium erfüllt wird. Als Ergebnis erhält man eine Geschwindigkeitsverteilung, die die Realität am besten wiedergibt. Aufbauend auf diesen einfachen Formalismus gibt es eine Reihe von Weiterentwicklungen, die im Rahmen dieser Beschreibung nicht weiter erläutert werden sollen.

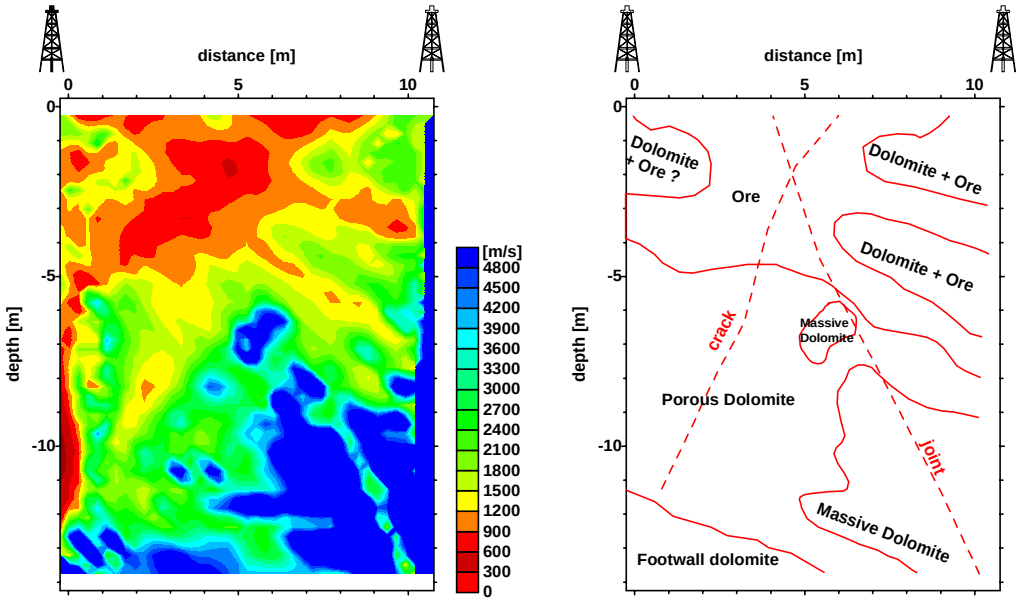
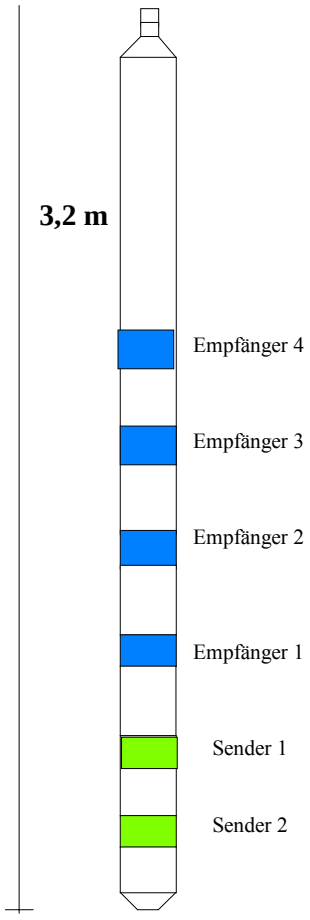


Abbildung 17: Ergebnis einer Erzprospektion in Nordspanien mit Hilfe der seismischen Tomographie

2.7 Bohrlochmessungen

2.7.1 FullWave Sonic (FWS; 20 kHz Ultraschallbohrlochsonde)

Die Full Wave Sonic Sonde wird im Bereich geotechnischer Anwendungen, für Grundwasseruntersuchungen, als Zement Bond Log, zur Ermittlung tiefer Kluftsysteme, zur Bestimmung seismischer Geschwindigkeiten und zur Kalibrierung von seismischen Tomographieuntersuchungen eingesetzt.



Vorteile dieser Sonde :

- hohe Abstrahlenergie und damit eine große Eindringtiefe bei großen Abständen Sender - Empfänger
- niedrige Frequenz für große Eindringtiefen beim Einsatz als Zement Bond Log
- lange Registrierzeiten um auch noch Stonely Wellen zu erfassen, zur Kluftbestimmung und zur Bestimmung eines Permeabilitäts-Index
- Messung der absoluten Größe der reflektierten Amplitude
- mit zwei Sendern und vier Empfängern redundante Information

Technische Spezifikationen

- Sondendurchmesser 50 mm
- Länge 3.20 m
- Max. Druckbelastung 200 bar
- Max. Temperatur 70°C
- Spacing 50, 70, 90, 100, 120, 140cm
- Frequenz 22 kHz
- Sampling Rate einstellbar, min. 2,5 µs
- Sample Anzahl einstellbar bis max. 256
- Dynamikumfang 12 Bit plus einstellbare Verstärkung von 4 Bit
- Datenübertragung einstellbar bis 80 kHz
- Messkabel Ein- oder Mehrader
- Bohrlochdurchmesser min.70 mm

Von einem Ultraschallsender wird ein Signal im Frequenzbereich von 10-20 kHz ausgesendet. An mindestens zwei Empfängern werden die ankommenden Signale über ein festgelegtes Zeitintervall aufgezeichnet. Aus den registrierten Daten werden die ***Schallaufzeiten*** für P- und S-Wellen im Gestein (Beton) bestimmt. Werden zwei Sender - im oberen und im unteren Teil der Sonde - verwendet, bezeichnet man die Sonde als ”Kompensierte” Sonic-Sonde. Werden nicht nur die Ersteinsätze sondern der gesamte Wellenzug über ein vorgegebenes Zeitintervall am Empfänger aufgezeichnet, so spricht man von einer Full Wave Sonic Sonde.

Die Messungen sind eine wesentliche Voraussetzung für die Ableitung der ***elastischen Parameter*** und für die Berechnung von Permeabilitäten und ***Porositäten*** der Materialien um das Bohrloch (um den Kanal). Die Auflösung der 20 kHz Signale bei diesem Verfahren beträgt etwa 15-30 cm. Die Ergebnisse gehen in die Auswertung der seismischen Verfahren ein.

Bei einer Full Wave Sonic Sonde werden auch noch spätere Reflexionseinsätze von naheliegenden Schichtgrenzen oder Inhomogenitäten (z.B. Verwerfungen, Störkörpern oder Auflockerungszonen) erfasst. Auf diese Weise erhält man noch Informationen aus einem Bereich von ca. 3 -5 m um das Bohrloch (um den Kanal) herum.

2.7.2 Dual Induction (DIL)

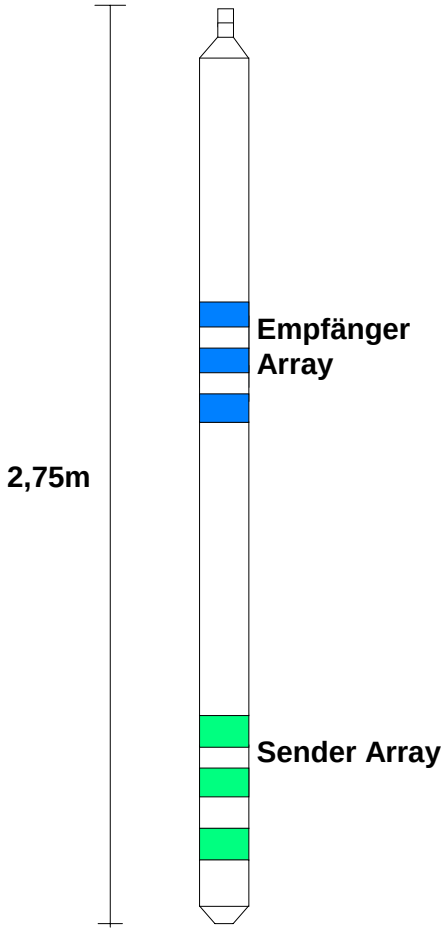
Die Induktionssonde wird zur Bestimmung spezifischer oder scheinbarer Gesteinswiderstände, zur Leitfähigkeits-Bestimmung, zur Ermittlung der Gesteinspermeabilität, der Gesteinsporosität und der magnetischen Permeabilität verwendet.

Vorteil dieser Sonde:

- wesentlich kürzer als konventionelle Widerstandssonden,
- zwei Eindringtiefen (Nah und Mittel) zur Messung in der Infiltrationszone und im ungestörten Bereich,
- sehr großer Messbereich.

Technische Spezifikationen:

- Messkanäle ILM (Medium deep induction)
- ILD (deep induction)
- Sondenlänge 2,75 m
- Sondendurchmesser max. 50 mm
- Sondengewicht ca. 19 kg
- Hüllrohr Elektronik rostfreier Stahl
- Spulenumhüllung Fiberglas
- Max. Druckbelastung 200 bar
- Max. Temperatur 70°C
- Spulen 6 Spulen, focused array
- Spacing ILM 56 cm
- Spacing ILD 83 cm
- Arbeitsfrequenz 25.6 kHz
- Messbereich 5 mMho/m bis 5 Mho
- Messgenauigkeit besser als 5 mMho/m
- Bohrlochdurchmesser min. 80 mm, max. 250 mm
- Messgeschwindigkeit 4 bis 8 m/min
- Messung unzentriert



Die Induktionssonde wird zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit (Kehrwert des elektrischen Widerstandes) eingesetzt. Zur Induktionsmessung wird ein niederfrequentes elektromagnetisches Feld erzeugt und die Feldstärke in einem bestimmten Abstand gemessen. Die Eindringtiefe ist abhängig

vom Abstand zwischen Sender und Empfänger. Im allgemeinen werden Messungen in verschiedenen Abständen vorgenommen, um unterschiedliche Eindringtiefen zu erhalten. Gemessen wird nicht die Leitfähigkeit der umgebenden Gesteinsmatrix (meist sehr hoch), sondern die Leitfähigkeit der Porenfüllung. Mit diesem Verfahren lassen sich Aussagen zur ***Wasserwegsamkeit***, zur ***Salinität der Porenfüllung*** und zur ***Porosität*** (direkt aus der Leitfähigkeit und indirekt aus der Kombination von kleinen und großen Eindringtiefen) treffen. Das Auflösungsvermögen beträgt etwa 10 cm.

Abbildung 18: Bohrlochsonden vor dem Einsatz im Kanal

2.8 Thermographie

Zur Erstellung der Infrarotaufnahmen wurde die Infrarotkamera „Thermovision 550“ der Firma Agema genutzt. Diese Kamera misst die von einem Objekt emittierte Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung) und stellt diese in einem sichtbaren Bild dar. Da die Strahlung eine Funktion der Oberflächentemperatur des Objekts ist, kann die Kamera diese Temperatur genau errechnen und anzeigen.

Die von der Kamera gemessene Strahlung ist allerdings nicht nur von der Temperatur des Objekts abhängig, sonder ist gleichzeitig eine Funktion des Emissionsgrades. Darüber hinaus sendet auch die Umgebung Wärmestrahlung aus, die vom Objekt reflektiert wird. Die Strahlung vom Objekt und die reflektierte Strahlung werden außerdem auch von der Absorption in der Atmosphäre beeinflusst.

Für eine genaue Messung der Temperatur ist es daher erforderlich, die Einflüsse einer ganzen Reihe von Strahlungsquellen zu kompensieren. Dies geschieht bei der Kamera zum Teil automatisch während des Betriebes. Zur Dokumentation werden die Bilder auf einer PCMCIA-Karte gespeichert und später im PC analysiert und wiedergegeben.

Die Kamera ist in der Lage Temperaturunterschiede von 0,1 °C anzuzeigen.

Abbildung 19: Einsatz der Infrarotkamera im Versuchskanal auf dem IKT-Gelände in Gelsenkirchen

3 Durchgeführte Untersuchungen

3.1 Messvorbereitungen

Zur Vorbereitung der geophysikalischen Messungen wurde zunächst eine ausführliche Skizze des Kanals angefertigt (Anlage 3), die dem Plan des Versuchsaufbaus entspricht, jedoch den Anforderungen an die späteren Interpretationen der Ergebnisse der seismischen Messungen besser Rechnung trägt. Der Querschnitt des begehbaren Betonkanals beginnend am Einstieg 1 (westlicher Einstieg) wurde in 4 Messlinien unterteilt (**Abbildung 20**). Dabei wurde die Messlinie 1 etwa um 30^o aus der horizontalen „nach unten hin“ verlegt. Alle weiteren Messlinien befanden sich dementsprechend relativ zur Horizontalen bei 150^o (Messlinie 2), 210^o (Messlinie 3) und 350^o (Messlinie 4). Da die verwendeten Geophone (Oyo, 100 Hz Eigenfrequenz), und die aktiven Beschleunigungsaufnehmer (Wilkokson) über ein „Dorn“ an die Kanalwand angekoppelt werden müssen, wurden entlang der 4 Messlinien in 10 cm Anständen etwa 4 cm tiefe Bohrungen eingebracht. Insgesamt wurden etwa 1540 Ankopplungslöcher gebohrt. Bei den Profillinien 1 bis 4 wurden zusätzlich Führungslatten aus Holz im Kanal angebracht, um z.B. die Messung mit Bohrlochsonden zu vereinfachen und zu definieren. Für weitere Untersuchungen (z.B. Radar) wurden die Profillinien 5 bis 8 festgelegt. Für eine bessere Orientierung wurden alle bekannten Anomalien im Kanal markiert (s. **Abbildung 21**).

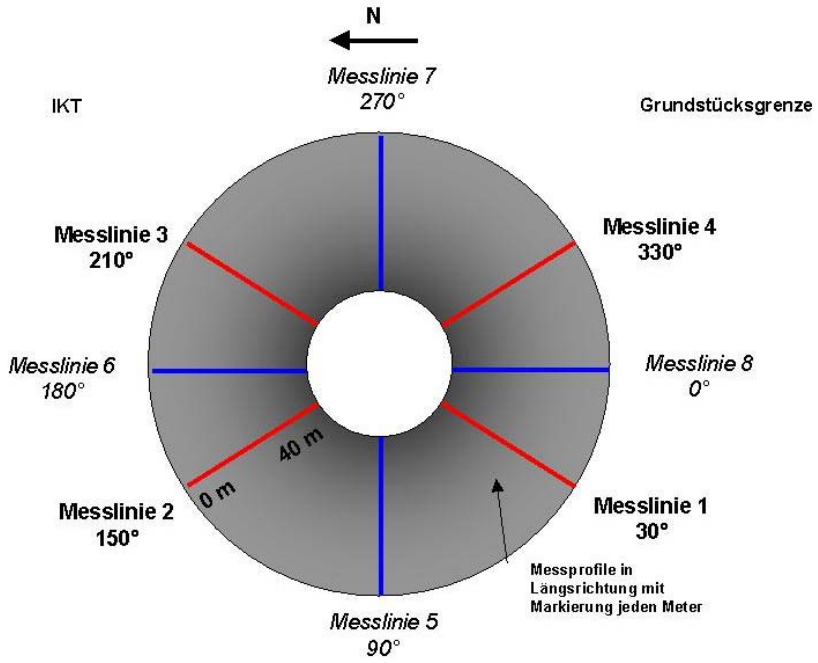


Abbildung 20: Definition von Messlinien im Kanal. Blickrichtung nach Osten (Querschnitt durch den Kanal, Durchmesser des Kanals etwa DN2200.

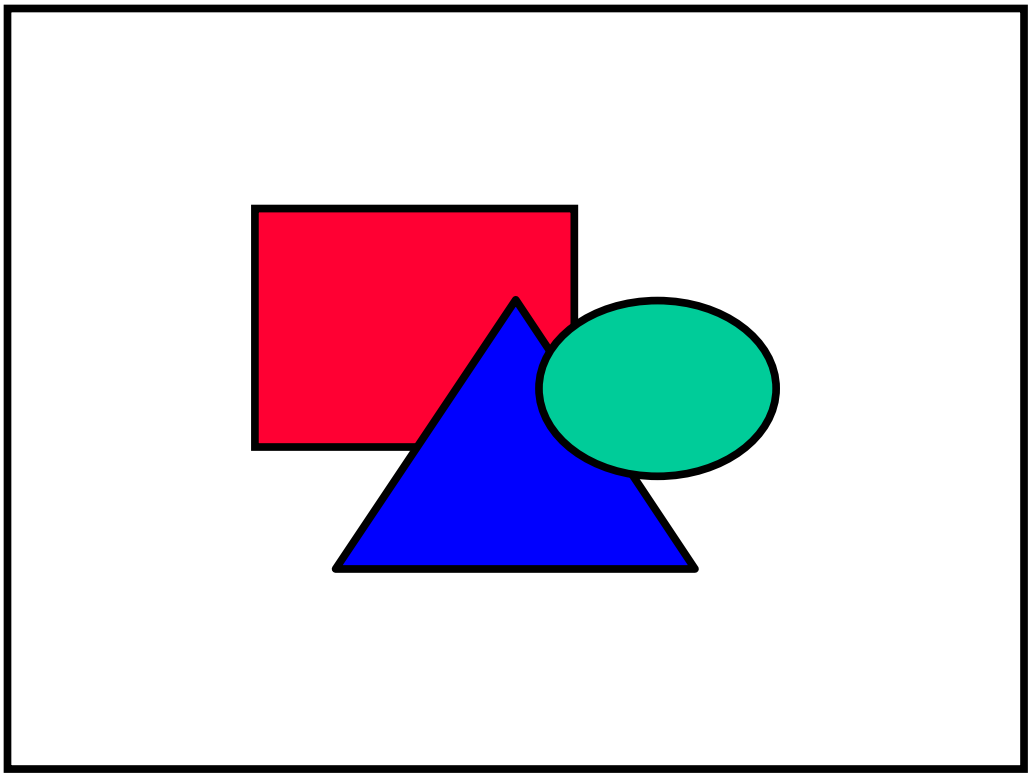


Abbildung 21: Markierungen innerhalb des Kanals.

Zusammenfassend wurden folgende Messungen durchgeführt:

Seismik

Linie / Bereich	Geophysikalische Zielfragestellung	Bemerkungen
Linie 1 (Teilbereich)	• vor Einbau des Bodens und der Anomalien: Kalibriermessung • Erfassung des Einflusses des Bauwerks Kanal	im Kanal angeregt und gemessen, Hammer 200 g, 100 Hz Geophon
Linie 1 (Teilbereich)	• vor Einbau des Bodens und der Anomalien: Kalibriermessung • Erfassung des Einflusses des Bauwerks Kanal	im Kanal angeregt und gemessen, Hammer 200 g, Beschleunigungsaufnehmer
Linie 1	• Vergleich mit Kalibriermessung • Detektion von Anomalien innerhalb und außerhalb des Kanals • Unterschiede in den Bodenarten	im Kanal angeregt und gemessen, Hammer 200 g, 100 Hz Geophon
Linie 2	• Vergleich mit Kalibriermessung • Detektion von Anomalien innerhalb und außerhalb des Kanals Unterschiede in den Bodenarten	im Kanal angeregt und gemessen, Hammer 200 g, 100 Hz Geophon
Linie 3	• Vergleich mit Kalibriermessung • Detektion von Anomalien innerhalb und außerhalb des Kanals • Unterschiede in den Bodenarten	im Kanal angeregt und gemessen, Hammer 200 g, 100 Hz Geophon
Linie 4	• Vergleich mit Kalibriermessung • Detektion von Anomalien innerhalb und außerhalb des Kanals • Unterschiede in den Bodenarten	im Kanal angeregt und gemessen, Hammer 200 g, 100 Hz Geophon
Linie 1	• Vergleich mit Kalibriermessung • Detektion von Anomalien innerhalb und außerhalb des Kanals • Unterschiede in den Bodenarten	im Kanal angeregt und gemessen, Hammer 200 g, Beschleunigungsaufnehmer
Linie 2	• Vergleich mit Kalibriermessung • Detektion von Anomalien innerhalb und außerhalb des Kanals • Unterschiede in den Bodenarten	im Kanal angeregt und gemessen, Hammer 200 g, Beschleunigungsaufnehmer
Linie 3	• Vergleich mit Kalibriermessung • Detektion von Anomalien innerhalb und außerhalb des Kanals • Unterschiede in den Bodenarten	im Kanal angeregt und gemessen, Hammer 200 g, Beschleunigungsaufnehmer
Linie 4	• Vergleich mit Kalibriermessung • Detektion von Anomalien innerhalb und außerhalb des Kanals • Unterschiede in den Bodenarten	im Kanal angeregt und gemessen, Hammer 200 g, Beschleunigungsaufnehmer
Linie 2, 3 an der Erdoberfläche	• Erfassung von Anomalien von der Erdoberfläche aus • Ermittlung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten	Oberflächenwellen, Hammer 5 kg, an der Erdoberfläche angeregt und an der Erdoberfläche (Geophone) gemessen
Linie 2 und 3 an der	• Erfassung von Anomalien von der Erdoberfläche aus	Hammer 5 kg, an der Erdoberfläche angeregt und im Kanal gemessen

Erdoberfläche	• Ermittlung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten	
Profil 1 und 4 an der Erdoberfläche	• Erfassung von Anomalien von der Erdoberfläche aus • Ermittlung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten	Oberflächenwellen, Hammer 5 kg, an der Erdoberfläche angeregt und an der Erdoberfläche (Geophone) gemessen
Profil 1 und 4 an der Erdoberfläche	• Erfassung von Anomalien von der Erdoberfläche aus • Ermittlung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten	Hammer 5 kg, an der Erdoberfläche angeregt und im Kanal gemessen
Kranzmessung bei Kanalmeter 2, 18 und 23,5	• Detektion des Findlings • Detektion der Spundwand • Detektion des Hohlraumes	Hammer 200 g, Geophone im Kanal
Linie 3, 21 – 27 m	• Detektion des Hohlraumes	Hammer 5 kg, Geophone
Linie 2, 16 – 22 m	• Detektion des Hohlraumes	Hammer 5 kg, Geophone
Linie 1 und 2	• Erkundung der Bettung • Erkundung von Anomalien	Hammer 5 kg, Geophone im Kanal, Auswertung von Tunnelwellen

Tomographie

Linie / Bereich	Geophysikalische Zielfragestellung	Bemerkungen
Linie 2 / Erdoberfläche	• Erkundung der Geschwindigkeiten • Unterscheidung der eingebauten Böden und unterschiedlichen Verdichtungen • seitliche Diffraktionen von Anomalien	im Kanal mit Hammer angeregt (Linie 2), Geophone an der Erdoberfläche 2,5 aus der Mittelachse Richtung N
Linie 1 / Erdoberfläche	• Erkundung der Geschwindigkeiten • Unterscheidung der eingebauten Böden und unterschiedlichen Verdichtungen • seitliche Diffraktionen von Anomalien	im Kanal mit Hammer angeregt (Linie 1), Geophone an der Erdoberfläche 2,5 aus der Mittelachse Richtung S
Linie 2 / Erdoberfläche	• Optimierung der 1. Messung • Erkundung der Geschwindigkeiten • Unterscheidung der eingebauten Böden und unterschiedlichen Verdichtungen • Durchschallung der Anomalien oberhalb des Kämpfers	an der Erdoberfläche mit Hammer (5 kg) angeregt, ca. 5 m Richtung N, Geophone im Kanal auf Linie 2

Impactecho

Linie / Bereich	Geophysikalische Zielfragestellung	Bemerkungen
Kranzbereich bei 15 m, 17 m und 20 m	• Ermittlung von unterschiedlichen Betondicken • Fehlstehlen im Beton	Dynatron-Messgerät
Block 11 – 12	• Ermittlung von unterschiedlichen Betondicken • Fehlstehlen im Beton (Fugenband) • Kiesnest	Diese Messungen wurden von HOCHTIEF ausgeführt [1].

Ultraschall-Echo Messung im Kanal

Linie / Bereich	Geophysikalische Zielfragestellung	Bemerkungen
Linie 2	• Erfassung von Anomalien außerhalb des Kanals • Ermittlung der Wanddicke	40 kHz-Schwinger in einer neu entwickelten Bohrlochsonde (7-fach Piezostapel)
Kranzbereich bei 15 m, 17 m und 20 m	• Ermittlung von unterschiedlichen Betondicken • Fehlstehlen im Beton	40 kHz-Schwinger

Ultraschallmessungen an Bohrkernen

Linie / Bereich	Geophysikalische Zielfragestellung	Bemerkungen
Bohrkerne	• Ermittlung von Geschwindigkeiten, Dichten, elastische Parameter	40 kHz-Schwinger

Radar

Linie / Bereich	Geophysikalische Zielfragestellung	Bemerkungen
Profil 2	• Kalibrierung (ohne Baugrund)	38 m, Radargerät pulseEKKO 1000, 450 MHz, 900 MHz, 1200 MHz
Profile 1, 2, 3, 4	• Bauwerk • Baugrund	38 m, 225 MHz, 450 MHz, 900 MHz, 1200 MHz
Profil 5	• Betonauflager, Stahlkeile	6 m, 225 MHz, 450 MHz, 900 MHz, 1200 MHz
Profil 6	• Fugenband • Fugenblech	38 m, 225 MHz, 450 MHz, 900 MHz, 1200 MHz
Rundum-profile	• Fugenband • Fugenblech • Baugrund (Spundwand, ...)	6,3 m, 225 MHz, 450 MHz, 900 MHz, 1200 MHz

Zusätzliche Detail-Untersuchungen von HOCHTIEF [1]		
Block 5	• Bewehrung • Stahlkeil	2,5 m Länge, Radargerät SIR 2, 900 MHz
Block 5 + 6	• Bewehrung • Verbau	2,5 m Länge, 900 MHz
Block 11 – 19, Profil 8	• Hohlräume	12,8 m Länge, 900 MHz
Block 11 – 15, Profil 8	• Kiesnest • Spundwand	7,2 m Länge, 900 MHz
Block 11 – 21, Profil 1	• Hohlräume hinter Kanal • Mauerwerk • Verblender	15,2 m Länge, 900 MHz
Block 18 – 21, Profil 1	• Hohlräume hinter Kanal • Mauerwerk • Verblender	5,6 m Länge, 900 MHz
Block 22	• Bewehrung • AF-Blech • Baumstamm	5,8 m Länge Radialprofil, 900 MHz
Block 22	• Bewehrung • AF-Blech • Baumstamm	5,8 m Länge Radialprofil, 900 MHz

Bohrlochsonden (Sonic-Log)

Linie / Bereich	Geophysikalische Zielfragestellung	Bemerkungen
Linie 1 + 2	• Ermittlung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten • Strukturen innerhalb des Kanals (Unterscheidung von Klinker und Stahlbeton) • Detektion von Anomalien und Strukturen außerhalb des Kanals	20 kHz, 50 cm Abstand zwischen Quelle und Empfänger
Linie 1 + 2	• Ermittlung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten • Strukturen innerhalb des Kanals (Unterscheidung von Klinker und Stahlbeton) • Detektion von Anomalien und Strukturen außerhalb des Kanals	20 kHz, 70 cm Abstand zwischen Quelle und Empfänger
Linie 1 + 2	• Ermittlung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten • Strukturen innerhalb des Kanals (Unterscheidung von Klinker und Stahlbeton) • Detektion von Anomalien und Strukturen außerhalb des Kanals	20 kHz, 90 cm Abstand zwischen Quelle und Empfänger

Linie 1 + 2	• Ermittlung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten • Strukturen innerhalb des Kanals (Unterscheidung von Klinker und Stahlbeton) • Detektion von Anomalien und Strukturen außerhalb des Kanals	20 kHz, 100 cm Abstand zwischen Quelle und Empfänger
Linie 1 + 2	• Ermittlung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten • Strukturen innerhalb des Kanals (Unterscheidung von Klinker und Stahlbeton) • Detektion von Anomalien und Strukturen außerhalb des Kanals	20 kHz, 110 cm Abstand zwischen Quelle und Empfänger
Linie 1 + 2	• Ermittlung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten • Strukturen innerhalb des Kanals (Unterscheidung von Klinker und Stahlbeton) • Detektion von Anomalien und Strukturen außerhalb des Kanals	20 kHz, 120 cm Abstand zwischen Quelle und Empfänger
Linie 1 + 2	• Ermittlung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten • Strukturen innerhalb des Kanals (Unterscheidung von Klinker und Stahlbeton) • Detektion von Anomalien und Strukturen außerhalb des Kanals	20 kHz, 140 cm Abstand zwischen Quelle und Empfänger
Linie 1 + 2	• Ermittlung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten • Strukturen innerhalb des Kanals (Unterscheidung von Klinker und Stahlbeton) • Detektion von Anomalien und Strukturen außerhalb des Kanals	20 kHz, 160 cm Abstand zwischen Quelle und Empfänger

Bohrlochsonden (Induktion-Log)

Linie / Bereich	Geophysikalische Zielfragestellung	Bemerkungen
Linie 1, 2 und 5	• Erkundung des Betons • Erkundung der Bewehrung und der angrenzenden Bereiche	Zur Induktionsmessung wird ein niederfrequentes elektromagnetisches Feld erzeugt und die Feldstärke in einem bestimmten Abstand gemessen.

Geoelektrik

Linie / Bereich	Geophysikalische Zielfragestellung	Bemerkungen
Oberflächenprofile 1,5 m neben der Kanalachse	• Baugrund (Bodenart, Einbauten, ...)	Multielektrodengerät Resecs

Gravimetrie

Linie / Bereich	Geophysikalische Zielfragestellung	Bemerkungen
Profil 5	Baugrund (Bodenarten, Dichtunterschiede, ...)	Gravimeter Autograv CG-3M

Elektromagnetik (EM)

Linie / Bereich	Geophysikalische Zielfragestellung	Bemerkungen
Profile 2, 3	• Bewehrung • Baugrund (Spundwand, T-Träger, ...)	Multifrequenzgerät GEM 2

4 Zusammenfassung der bisher erzielten Ergebnisse und Bewertung der einzelnen Messverfahren

4.1 Vorbemerkungen

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen insbesondere im Hinblick auf die in Kapitel 1.2 definierten Ziele vorgestellt. Aufgrund der Übersichtlichkeit wurde auf einen einheitlichen Maßstab verzichtet. Führen Untersuchung mit einem Verfahren nicht zum Erfolg, so werden die Messergebnisse in diesem Bericht nicht vorgestellt. Es ist vorgesehen, diese in dem technischen Abschlussbericht zu integrieren. Darüber hinaus werden Ergebnisse vorgestellt, die nicht direkt zu den im Kapitel 1.2 definierten Zielen gehören.

4.2 Bauwerk

4.2.1 Geometrie

4.2.1.1 Wanddicke

Absolut
Veränderungen (z.B. Versprung oder über den Umfang)
Betonauflager Rohre 5/6 erkannt
Betonauflager Rohre 5/6 geometrisch quantifiziert
Schichtgrenze geklinkerte Sohle erkannt
Tiefenlage Schichtgrenze geklinkerte Sohle absolut
Betonauflager seitlich unter Mauerwerkskanal erkannt
Betonauflager seitlich unter Mauerwerkskanal quantifiziert

4.2.1.1.1 Radar

Mit Radarmessungen ist es möglich, Wanddickenmessungen vorzunehmen. Man kann die Dicken auch quantitativ angeben, wenn eine ausreichend genaue Geschwindigkeitsbestimmung durchgeführt werden kann oder eine Kalibriermöglichkeit besteht.

Die Qualität der Reflexionssignale hängt vom Kontrast am Übergang vom Kanalbauwerk zum Baugrund ab sowie entscheidend vom Bauwerk selbst mit seinen Einlagerungen, wie etwa der Bewehrung. Der Übergang beispielsweise von der Wandstärke 42 cm auf 35 cm bei etwa 18,5 m (Bereich F/V) kann sehr deutlich im Radargramm erkannt werden (Anlage 4).

4.2.1.1.2 Impactecho

Diese Wanddicke kann mit dem Impactecho erfasst werden. Anlage 5 zeigt exemplarisch die Bestimmung der Wanddicke bei einem homogenen Beton. In diesem Fall betrug die Wanddicke 34 cm.

4.2.1.1.3 Zusammenfassung Wanddicke

Die Wanddicke kann mit dem Radar, dem Impactecho oder auch mit Ultraschall bestimmt werden. Kennt man die jeweilige Ausbreitungsgeschwindigkeit bzw. setzt einen Erfahrungswert für die Zusammensetzung der Kanalwand an, so ist auch eine absolute Bestimmung der Wanddicke möglich. Veränderungen, wie z.B. Versprünge können auch über den Umfang sichtbar gemacht werden. Die Verfahren Impactecho und Ultraschall sind aufwendig, um ein 3-dimensionales Bild des Kanals zu ermitteln, da es sich um Punktmessungen handelt, die bisher nicht automatisch zu einem 3-D Bild zusammengeführt werden. Die Ergebnisse stehen dafür sofort zur Verfügung und sind leicht zu interpretieren sowie unabhängig von der Feuchtigkeit des Bauwerks zu ermitteln. Die Betonauflager bei den Rohren 5/6 stellen eine hohe Herausforderung an die angewendeten Verfahren, da die Reflexionswinkel sehr ungünstig sind. Somit ist die Ortung und die Beschreibung der geometrischen Form nicht möglich. Die Schichtgrenze der geklinkerten Sohle kann z.B. mit Hilfe des Radar erfasst werden (s. Anlage 14). Die absolute Tiefenlage ist aufgrund der Heterogenität der einzelnen Klinker nicht bestimmbar. Die Betonauflager seitlich unter dem Mauerwerkskanal können aufgrund der ungünstigen Einfalls- und Ausfallswinkel der Wellen nicht erkannt und quantifiziert werden.

4.2.1.2 Bewehrung

Abstand der Bewehrung absolut
Abstand der Bewehrung Veränderungen
Durchmesser der Bewehrung absolut
Durchmesser der Bewehrung Veränderungen
Tiefenlage(n) der Bewehrung absolut
Tiefenlage(n) der Bewehrung Veränderungen

4.2.1.2.1 Radar

Bewehrung in Form von Stahlmatten stellt einen hohen elektrischen und elektromagnetischen Kontrast zum Beton und Baugrund dar. Daher werden mit elektromagnetischen Induktionsverfahren und mit Radar deutliche Effekte verzeichnet.

Bei der Elektromagnetik werden üblicherweise Geräte eingesetzt, die Spulenabstände von 1 m bis 4 m aufweisen und damit Eindringtiefen von mehreren Metern erreichen können. Damit lässt sich lediglich nachweisen, ob überhaupt eine Bewehrung vorliegt. Dies konnte im Inneren des Kanals auch verifiziert werden. Eine Qualifizierung der Bewehrung sowie eine Bestimmung der Tiefenlage und der Maschenweite ist nicht exakt möglich. Bei einer Geschwindigkeit von 10 cm/ns entspricht eine Laufzeit von 1 ns einer Tiefenlage von 5 cm.

Mit Radar lassen sich hohe Frequenzen einsetzen, die wegen der damit verbundenen kurzen Wellenlängen von unter 10 cm eine wesentlich höhere Auflösung erreichen können. Anlage 6 zeigt auf einem Rundumprofil bei 14 m deutliche Reflexionshyperbeln der einzelnen Bewehrungsstäbe. Die

Signale an den Kreuzungspunkten mit den 4 Längsprofilen P1 bis P4 sind etwas gestört, da die Antenne über die angebrachten Führungslatten bewegt werden musste. Die Rundumprofile begannen jeweils am Scheitel und führten über den Nordkämpfer, Sohle und Südkämpfer wieder zurück zum Scheitel.

Ein anderes Beispiel zeigt Anlage 7 für den Abschnitt 4 m bis 10 m (Rohre 2 und 3). Hier lassen sich ebenfalls die Abstände der einzelnen Stäbe bestimmen. Dabei fällt auf, dass in den beiden Rohren Bewehrungsmatten mit unterschiedlichen Maschenweiten gekommen sein könnten.

Im Kanalabschnitt 31 m bis 35 m (Bereich B/II) wurde in der südlichen Wandung eine senkrecht stehende Bewehrung eingebaut. In dem Rundumprofil bei 34 m (Anlage 8) ist eine deutliche Reflexion dieser Matte zu erkennen. Diese Reflexion verläuft deshalb schräg, da sich das Profil auf einem Kreisbogen bewegt, während die Matte eben liegt, so dass sich die Antenne, vom Kämpfer kommend, von der Matte entfernt. Die weiteren Reflexionen (Anlage 8) werden unter dem Stichwort „Fugenband“ beschrieben.

4.2.1.2.2 Zusammenfassung Bewehrung

Das Radar ist in der Lage den Abstand der Bewehrung absolut zu erfassen. Ebenso können Veränderungen der Bewehrungsstababstände erkannt werden. Es konnten Abstände zwischen 10 cm und 20 cm bestimmt werden. Der Durchmesser der Bewehrung sowie Veränderungen der Bewehrung lassen sich mit dem Radar nicht messen. Die Tiefenlage der Bewehrung ist bei Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen abzuschätzen. Als Tiefenlage der ersten Bewehrung wird etwa 5 cm bestimmt. Veränderungen der Tiefenlage werden durch die Verschiebung entlang der Zeitachse abgebildet. Außer Radar wäre nur noch das Ultraschallverfahren in der Lage, diese Auflösung zu erzielen.

4.2.2 Materialfestigkeiten

4.2.2.1 Beton

Betonfestigkeiten absolut
Betonfestigkeiten Veränderungen

4.2.2.1.1 Ultraschallmessungen an Betonproben

Diese Parameter wurden mit Hilfe von Ultraschallmessungen an Betonproben ermittelt (dynamisches E-Modul, siehe Anlage 27 und **Kapitel 4.4.1**).

4.2.2.1.2 Seismik

Es können mit Hilfe der Seismik zum einen die seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den Betonrohren bestimmt werden. Mit zusätzlicher Kenntnis der Dichte lassen sich so die elastischen Parameter bestimmen. Die Erfassung von Veränderungen der Betonfestigkeit entlang eines Kanals ist für die Geophysik eine lösbare Aufgabe.

4.2.2.2 Bewehrung

Stahlfestigkeit absolut

Dieser Parameter kann mit keinem geophysikalischen Messverfahren erfasst werden.

4.2.2.3 Mauerwerk

Steinfestigkeiten absolut
Steinfestigkeiten Veränderungen

Ultraschallmessungen führten aufgrund von Ankopplungsproblemen im Bereich des Mauerwerks (sehr uneben) zu keinen verwertbaren Messergebnissen.

4.2.3 Unterschiedliche Fugenausbildung

4.2.3.1 Arbeitsfuge Betonkanal

ohne Fugenband erkannt
Blech-Fugenband erkannt
Blech-Fugenband Tiefenlage bestimmt
Kunststoff-Fugenband erkannt
Kunststoff-Fugenband Tiefenlage bestimmt

4.2.3.1.1 Radar

In dem Kanalbauwerk sind mehrere Arten von Fugen eingebaut worden, Arbeitsfugen und eine Dehnungsfuge. Eine vertikale Arbeitsfuge mit außen liegendem Kunststofffugenband liegt bei 20,8 m. Horizontale Arbeitsfugen liegen jeweils in den Kämpferbereichen und sind teilweise mit Fugenband oder Fugenblech versehen. Die Dehnungsfuge mit Dehnungsfugenband liegt bei 25,7 m und ist auch vom Kanalinneren zu erkennen (im Gegensatz zu den Arbeitsfugen).

Ein außen liegendes Fugenband (aus Kunststoff) lässt sich in den Radardaten nicht nachweisen, da hierdurch der Kontrast Beton/Baugrund kaum beeinflusst wird. Das Kunststofffugenband innerhalb des Betons lässt sich gut dokumentieren. Anlage 9 zeigt in einem Rundumprofil bei 18 m (Bereich F/V) unter anderem eine Reflexionshyperbel des Bandes. Die andere Reflexion in Anlage 9 wird unter dem Stichwort „Spundwand“ beschrieben.

Im weiteren Kanalabschnitt bis etwa 22 m lässt sich der Verlauf des Fugenbands sehr gut verfolgen (Anlage 10). Auch die Lageveränderung ist zu erkennen, die wegen der Wanddickenänderung von 42 cm auf 35 cm erfolgen musste.

Die Arbeitsfuge ist etwa von 31 m bis 35 m mit einem Fugenblech versehen. Auf dem Rundumprofil bei 34 m zeigt sich eine scharfe Reflexionshyperbel des Fugenblechs (Anlage 11).

Ein Längsprofil entlang des Kämpfers zeigt Anlage 12. Da es sich um einen Metallreflektor handelt, ist die Reflexion wesentlich deutlicher ausgeprägt als beim Fugenband aus Kunststoff. Der Verlauf des Fugenblechs zeigt deutliche Schwankungen in der Einbautiefe, d.h. im Abstand von der Kanalinnenwand.

4.2.3.1.2 Thermographie

Mit Hilfe der Thermographie (s. Anlage 15) konnte neben den wärmeren Holzlatten auch eine radiale Arbeitsfuge bei 20,8 m abgebildet werden. Der Bereich der Temperaturunterschiede liegt bei etwa 1°C. Ob diese thermische Anomalie aufgrund der Arbeitsfuge oder aufgrund des Fugenbandes entsteht, kann nicht eindeutig entschieden werden. Eine Bestimmung der Tiefenlage des Fugenbandes ist mit Hilfe der Thermographie nicht möglich.

4.2.3.1.3 Impactecho

In der Anlage 16 erkennt man neben dem Rückwandecho bei etwa 34 cm auch ein Fugenband bei etwa 14 cm Tiefe.

4.2.3.2 Dehnungsfuge Betonkanal

Kunststoff-Fugenband erkannt
Kunststoff-Fugenband Tiefenlage bestimmt

4.2.3.2.1 Radar

Die Dehnungsfuge zeigt eine deutliche Hyperbel, die auch doppelt auftritt (Anlage 13). Zum einen reflektiert das zugehörige Fugenband (bei 4 ns), zum anderen das äußere Ende der Fuge (bei 6 ns).

Im weiteren Verlauf (28 m bis 31 m) zeigt sich deutlich der Kanalabschnitt, der aus Mauerwerk besteht. Hier ist einerseits die Signalstruktur verändert, d.h. nicht so gleichförmig wie in den benachbarten Abschnitten, zum anderen eine deutliche Reflexion der Kanalaußenseite erkennbar (etwa 6 ns).

Im weiteren Verlauf (31 m bis 35 m, Bereich B/II) ist die untere Hälfte des Kanals an der Oberfläche geklinkert. Solche gebrannten Baustoffe verändern ebenfalls die Signalstruktur. Dieser Teil des Umfangs unterscheidet sich in dem Rundumprofil bei 34 m deutlich von dem übrigen Profilabschnitten (Anlage 14).

4.2.3.2.2 Seismik

In Anlage 17 ist von Messprofil 4 eine COD (Common Offset Darstellung) mit einem Offset von 90 cm dargestellt. Die Amplituden sind farbig skaliert, um mögliche Streueffekte der Störkörper auf das Ausbreitungsverhalten der Kanalwellen besser erfassen zu können. Streueffekte stellen sich als verstärkte Amplituden (verstärkte rote Bereiche) dar. Zur besseren Zuordnung der Ergebnisse ist im oberen Teil der Anlage die jeweilige Messlinie innerhalb eines Plans des Kanals eingetragen. Die Laufzeit wurde in Entfernung mit Hilfe einer Geschwindigkeit von 450 m/s (Erfahrungswert für Oberflächenwellen in feuchten, angeschütteten Materialien) umgerechnet. Da dieser Geschwindigkeitswert lediglich einen Schätzwert darstellt, ist die vertikale Entfernungsskala relativ ungenau und kann sich von Ort zu Ort ändern. Die Lage der Dehnungsfuge bei Profilmeter 25,68 ist auf allen Auswertungen der seismischen Daten deutlich als Störung zu erkennen.

4.2.3.3 Zusammenfassung Fugenausbildung

Fugenbänder können mit geophysikalischen Verfahren erkannt werden. Eine Unterscheidung, ob es sich um ein Blech- oder Kunststoff-Fugenband handelt, ist schwierig. Als beste Verfahren haben sich bisher das Radar und das Impactecho herausgestellt.

4.2.4 Schäden

4.2.4.1 Risse innen

Verlauf
Breite
Tiefe

Die mögliche Lage von Rissen innerhalb des Kanals konnte mit Hilfe von kontinuierlichen Thermographiemessungen nicht erfasst werden. Im Bereich von Rissen hätte man Temparatur-unterschiede erwartet.

4.2.4.2 Risse außen

Verlauf
Breite
Tiefe

Risse außen an der Kanalwand zu erfassen, war mit den bisher durchgeführten Messungen nicht möglich. Aufgrund der lokalen, sehr kleinen physikalischen Anomalie könnte man nur mit gezielten Ultraschallmessungen Erfolg haben.

4.2.4.3 Anomalien

Verschobene Dichtringe
Kiesnest
Stahlkeile im Auflagerbeton
Transportanker

Sanierung Schäden Betonrohr (insbesondere Loch)

4.2.4.3.1 Radar

Mit den Radarmessungen wurde ein Rundumprofil bei 19 m mit dem eingebauten Kiesnest vermessen (Bereich F/V) (**Anlage 18**). Bei dieser Reflexion handelt es sich um eine komplexere Struktur, da sich mehrere Effekte überlagern: zum einen das Fugenband, zum anderen das Kiesnest, in dem eine geringere Wellendämpfung vorliegt, so dass sich eine Reflexion von der Außenseite bilden kann.

Die Rohre 5 und 6 (Bereich G/VI) wurden auf ein Betonauflager gebettet, das auch an zwei Stellen Stahlkeile enthielt (12,8 m, 15,4 m). Ein Profil entlang dieses Abschnitts (Anlage 19) zeigt deutliche Reflexionen dieser Stahlbauteile.

4.3 Baugrund

4.3.1 Boden

4.3.1.1 Bodenparameter

Wichte
Reibungswinkel
Kohäsion
Horizontaler Bettungsmodul

Der Baugrund wurde mit Messungen von der Erdoberfläche erkundet. Hierzu wurden seismische und geoelektrische Verfahren durchgeführt.

- Seismische Quelle und Empfänger befanden sich an der Erdoberfläche. Quellpunktabstand 1 m Geophonpunktabstand 0,5 m. Als Quelle wurde die Luftschallquelle und ein Hammer verwendet werden. Die Auslagenlänge betrug 40 m. Es wurden 2 seismische Profile links und rechts des Kanals verlegt.
- Bei den Geoelektrikmessungen wurde ein Sondenabstand von einem Meter an der Erdoberfläche gewählt und das komplette Kanalprofil erfasst. Es wurden ebenfalls 2 Messprofile angelegt.
- Die seismische Quelle befand sich im Kanal und die Geophone an der Erdoberfläche. Der Quellpunktabstand und der Geophonpunktabstand betrug jeweils 0,5 m. Es wurden 2 seismische Profile links und rechts des Kanals verlegt. Es erfolgt eine tomographische Auswertung der Messdaten.

Die Messungen von Oberfläche dienten als Grundlage bzw. Ergänzung zur Erkundung aus dem Kanal heraus.. Wesentliches Ziel des Vorhabens bleibt die Erkundung aus dem Kanal heraus. In der Praxis ist die Möglichkeit der Messung von oben praktisch nie gegeben oder nur sehr eingeschränkt möglich. Ziel dieser Messungen war der Gewinn von Informationen zur Möglichkeit der Erkundung von innen.

4.3.1.2 Schichtwechsel

Wechsel Bodenarten erkannt
Wechsel Verdichtung erkannt

4.3.1.2.1 Radar

Für Radarmessungen sind bindige Böden immer ein Medium, in dem die hohe Dämpfung zu einem starken Kontrast führt, was ebenfalls mit geringen Eindringtiefen einhergeht. Ein bindiger Boden im Bereich von 20,8 m macht sich dadurch bemerkbar, dass dieser sich als deutliches Reflexionssignal von der Außenwand des Kanals darstellt (**Anlage 21**).

Schichtwechsel sollen mit Messungen von der Erdoberfläche erkundet werden. Hierzu wurden seismische und geoelektrische Verfahren durchgeführt.

- Seismische Quelle und Empfänger befanden sich an der Erdoberfläche. Quellpunktabstand 1 m Geophonpunktabstand 0,5 m. Als Quelle wurde die Luftschallquelle und ein Hammer verwendet. Die Auslagenlänge betrug 40 m. Es wurden 2 seismische Profile links und rechts des Kanals verlegt.
- Bei den Geoelektrikmessungen wurde ein Sondenabstand von einem Meter an der Erdoberfläche gewählt und das komplette Kanalprofil erfasst. Es wurden ebenfalls 2 Messprofile verlegt.
- Die seismische Quelle befand sich im Kanal und die Geophone an der Erdoberfläche. Der Quellpunktabstand und der Geophonpunktabstand betrug jeweils 0,5 m. Es wurden 2 seismische Profile links und rechts des Kanals verlegt. Es erfolgte eine tomographische Auswertung der Messdaten.

Die Messungen von Oberfläche dienten als Grundlage bzw. Ergänzung zur Erkundung aus dem Kanal heraus. Wesentliches Ziel des Vorhabens bleibt die Erkundung aus dem Kanal heraus. In der Praxis ist die Möglichkeit der Messung von oben praktisch nie gegeben oder nur sehr eingeschränkt möglich. Ziel dieser Messungen war der Gewinn von Informationen zur Möglichkeit der Erkundung von innen.

4.3.2 Verbau

4.3.2.1 Spundwand

Etwas erkannt
Als Spundwand erkannt
Abstand Spundwand bestimmt
Verlauf bestimmt

4.3.2.1.1 Radar

Etwa 1 m nördlich des Versuchskanals wurde neben der oberen Hälfte des Bauwerks zwischen 16 m und 21 m eine Spundwand eingebaut Bereich F/V). Da es sich hierbei wiederum um ein Stahlteil handelt und damit einen deutlichen Kontrast für Radarwellen darstellt, ergibt sich eine sehr deutliche

Reflexion (**Anlage 22**). Der gekrümmte Verlauf resultiert wiederum daher, dass das Rundumprofil (nur vom Scheitel bis P2) gekrümmt und die Spundwand gerade verläuft.

4.3.2.1.2 Seismik

In Anlage 23 ist von Messprofil 3 eine COD (Common Offset Darstellung) mit einem Offset von 90 cm dargestellt. Die Amplituden sind farbig skaliert, um mögliche Streueffekte der Störkörper auf das Ausbreitungsverhalten der Kanalwellen besser erfassen zu können. Streueffekte stellen sich als verstärkte Amplituden (verstärkte rote Bereiche) dar. Zur besseren Zuordnung der Ergebnisse ist im oberen Teil der Anlage die jeweilige Messlinie innerhalb eines Plans des Kanals eingetragen. Die Laufzeit wurde in Entfernung mit Hilfe einer Geschwindigkeit von 450 m/s (Erfahrungswert für Oberflächenwellen in feuchten, angeschütteten Materialien) umgerechnet. Da dieser Geschwindigkeitswert lediglich einen Schätzwert darstellt ist, die vertikale Entfernungsskala relativ ungenau und kann sich von Ort zu Ort ändern.

Man erkennt Streueffekte der Tunnelwellen in Bereichen von bekannten Störkörpern, insbesondere können Streueffekte von der Spundwand zwischen Positionen 16,5 m und 21 m und vom Hohlraum bei Position 23,5 m erkannt werden.

4.3.2.1.3 Tomographie

Die seismische Tomographie liefert ein flächenhaftes Abbild von der Verteilung der Kompressions-Wellengeschwindigkeit und der Amplitudendämpfung und damit indirekt ein Abbild von der Verteilung gewisser Materialeigenschaften. Die schnittbildartige Erfassung der Daten erfolgt zerstörungsfrei. Tomographische Durchschallungsverfahren in der Geophysik basieren auf Entwicklungen in der Medizin und der zerstörungsfreien Materialprüfung (Röntgen- und Gamma-Strahlung, Ultraschall).

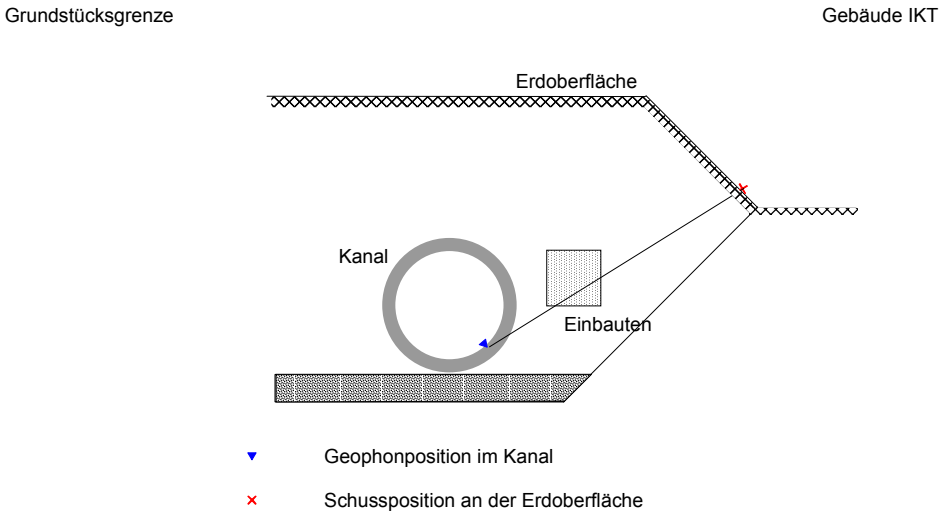


Abbildung 22: Skizze zur Lage von Geophon- und Schussposition

Zu jeder Schussposition wurden die seismischen Signale mit allen in der Messlinie ausgelegten Geophonen registriert.

Deutlich erkennt man in der **Anlage 24a** und **b** die durch die Schachtausbauten auftretenden Randerscheinungen. Im Überblick findet man von den Artefakten am Rand abgesehen im Bereich bis Kanalmeter 16 niedrigere Geschwindigkeiten, im Abschnitt von 16 bis 30 Metern mittlere Geschwindigkeiten und ab 30 bis 38,5 Meter erhöhte Geschwindigkeiten. Dieses Geschwindigkeitsgefälle wird durch die Verfüllung und die Verdichtung des unterschiedlichen Materials neben dem Kanal erzeugt.

Einzelne Auffälligkeiten befinden sich bei etwa 2, 6, 17 bis 21, 23, 32, 34 und 36 Metern und sind tabellarisch zusammengefasst:

Nr.	Kanal-stationierung [m]	Ausdehnung (Breite / Durchmesser) [m]	Eigenschaft	Bemerkungen
1	2	1	H	Findling
2	6	1,5	H	
3	17 – 21	5	H	Spundwand
4	23	1	N	Hohlraum
5	32	2	H	
6	34	1,5	H	
7	36	1,5	H	

Tabelle 2: Lage der tomographischen Anomalien, H: Geschwindigkeitserhöhung; N: Geschwindigkeitserniedrigung durch Hohlraum

4.3.2.2 Trägerbohlwand

Etwas erkannt
Stahl-Träger erkannt
Unterschied mit und ohne Verbauholz
Als Trägerbohlwand erkannt
Abstand Trägerbohlwand bestimmt
Verlauf Trägerbohlwand bestimmt

4.3.2.2.1 Seismik

Die Trägerbohlwand (z.B. Anlage 23) wurde mit Hilfe der seismische Messungen zwischen 12 m und 16 m innerhalb des Kanals nicht eindeutig erkannt. Die Trennung zwischen Reflexionen der Signale von der Bohlwand und anderen Effekten der Energieausbreitung war nicht möglich.

4.3.2.3 Seitliche Abgänge

Geophysikalisch ist es schwierig, die beiden seitlichen Abgänge im Rohr 3 zu erfassen. Nur in der durchgeführten seismischen Tomographie deuten sich diese in diesem Bereich an (s. Kapitel 5.2, Anlage 34, Anlage 35).

4.3.3 Anomalien

4.3.3.1 Findling

Etwas erkannt
Als Findling erkannt
Abstand Findling bestimmt
Größe Findling bestimmt

4.3.3.1.1 Tomographie

Die Findlinge haben eine wesentlich höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit (ca. 4000 - 5000 m/s) als der umgebende Boden. Daher kann mit Hilfe der Tomographie der Findling im Bereich des Rohres 1 geortet werden, s. Kapitel 4.3.2.1.3, **Anlage 24a** und **b**. Bei der Tomographie bilden sich Anomaliebereiche meist größer ab, so dass der Findling eine Größe von ca. 0,5 bis 0,7 cm aufweist. Da Findlinge eine vergleichbare Ausbreitungsgeschwindigkeit besitzen können wie z.B. Beton, kann man nicht immer eine Hochgeschwindigkeitsanomalie als Findling ansprechen. Man kann nur sagen, dass der Bereich sehr hart und fest ist.

4.3.3.1.2 Seismik

Die Auswertung der Oberflächenwellen im Kanal (Messprofil P2 und P3) zeigt ebenfalls im Bereich der Findlinge im Bereich von Rohr 1, 3 und 5 eine Anomalie (Kapitel 5.2, Anlage 35) aufgrund der erhöhten Störungsanteile in den seismischen Daten. Die Findlinge bilden aufgrund ihrer Größe eine Anomalie an denen die seismischen Oberflächenwellen gebrochen bzw. diffraktiert (gestreut) werden.

4.3.3.2 Hohlraum

Etwas erkannt
Als Hohlraum erkannt
Abstand Hohlraum bestimmt
Größe Hohlraum bestimmt

4.3.3.2.1 Radar

Die Erkennung der eingebauten Hohlräume war mit Radarmessungen nur eingeschränkt erfolgreich, da die Wellendämpfung meist sehr groß war. Bei etwa 21 m (Bereich E/IV) wurde jedoch eine deutliche Reflexion aus dem Baugrund registriert (**Anlage 24a** und **b**), die auf den starken Kontrast eines Hohlraumes zurückzuführen ist.

4.3.3.2.2 Seismik

Es wurden speziell zur Ortung eine Hohlraumes Messungen entlang Messlinie 3 innerhalb des Kanals von Profilmeter 20-26 (Hohlraum) mit einer stärkeren Quelle durchgeführt. Anlage 26 zeigt von 4 Schusspositionen wie deutlich sich der Hohlraum abbildet. Eine Abschätzung der Größe und des Abstandes zum Kanal ist schwierig, da die seismischen Wellen durch den Beton und dann durch den heterogenen Boden laufen. Mit einer mittleren Ausbreitungsgeschwindigkeit von 400 m/s ergibt sich bei einer Laufzeit von 5 ms eine Entfernung von etwa 1 m von der Kanalwand. Die laterale Ausdehnung des Hohlraumes ergibt sich aus dem beeinflussten Bereich im Seismogramm. Hier kommt man auch auf etwa 1 m. Der Durchmesser des Hohlraumes lässt sich mit einer solchen Messgeometrie nicht bestimmen. Eine seismische Tomographie zwischen 2 Bohrungen ließe sich die räumliche Ausdehnung des Hohlraumes näher ermitteln.

4.3.3.2.3 Tomographie

Die seismische Tomographie zwischen der Oberfläche und dem Kanal bildet aufgrund der niedrigeren Ausbreitungsgeschwindigkeit den Hohlraum zwischen Element 15 und 16 ab (s. **Anlage 24a** und **b**). Der Durchmesser liegt etwa im Bereich von 1 m.

4.3.3.2.4 Zusammenfassung Hohlraum

Für eine Ortung von Hohlräumen lassen sich aufgrund der durchgeführten Messungen nur das Radar und seismischen Verfahren einsetzen. Auch eine durchgeführte Gravimetrie, die eigentlich durch die Erfassung von Schwereunterschieden, einen Hohlraum finden könnte, zeigte keine erfolgsversprechenden Ergebnisse.

4.3.3.3 Baum

Etwas erkannt
Als Stamm/Holz erkannt
Als Wurzel erkannt
Lage bestimmt

Dies konnte mit keinem Verfahren erfolgreich erkundet werden.

4.3.3.4 Kabel / Leitungen

Etwas erkannt
Als Kabel/Leitung erkannt
Abstand Kabel/Leitung erkannt
Lage bestimmt

Diese Fragestellung konnte mit Hilfe der Auswertung der Oberflächenwellen ansatzweise gelöst werden (s. **Anlage 34, Anlage 35**).

4.4 Weitere Ergebnisse

4.4.1 Geschwindigkeitsmessungen im Kanal und an Bohrkernen

Es wurden bei den Kalibriermessungen verschiedenartige Geschwindigkeitsbestimmungen durchgeführt. Hierbei konnten bei den Hauptphasen in den unterschiedlichen Kanalbereichen folgende Geschwindigkeiten ermittelt werden:

- Bereich der Rohre 1 - 6: v_{phase} = 1.320 m/s
- Bereich des B25: v_{phase} = 1.600 m/s
- Bereich des B35: v_{phase} = 2.000 m/s
- Bereich des B5: v_{phase} = 1.050 m/s
- Bereich des Mauerwerks: v_{phase} = 1.700 m/s

Ein Zusammenhang zwischen Betongüte und Phasengeschwindigkeit ist zu erkennen.

Eine Bestimmung der Geschwindigkeiten mit Hilfe von Ultraschallmessungen an Bohrkernen ergab zusammen mit der Bestimmung der Dichte die Berechnung der elastischen Parameter. Anlage 27 fasst die Ergebnisse zusammen. Die v_p-Geschwindigkeit von etwa 4.000 m/s entspricht den Werten aus der Literatur. Es ist auch ersichtlich, dass die schwächere Betonklasse B5 auch eine erniedrigte v_p-Geschwindigkeit aufweist.

4.4.2 Untersuchung der Rohrverbindungen zwischen den Stahlbetonrohren bzw. Bauteilen

Die seismischen Untersuchungen zeigten sehr deutlich eine Beeinflussung der seismischen Signale. Die Anlage 28 zeigt die Messdaten der Kalibriermessungen, die mit Hilfe von Geophonen im Bereich der Betonrohre 1 bis 6 aufgezeichnet wurden. Dargestellt sind die Amplituden der seismischen Wellen mit Bezug zu ihrer Laufzeit (Zeit [ms]) und dem jeweiligen Ort entlang der Messlinie 1 innerhalb des Kanals (Geophonposition [m]). Die Schlagposition des Hammers befindet sich an der Position 9,5 m auf der Messlinie 1. Die Darstellung der Messdaten erfolgt mit Bezug auf die realen Amplitudenwerte, d.h. der größte Ausschlag wird von der größten Schwingung angezeigt und alle weiteren Schwingungen sind mit Bezug auf den größten Ausschlag dargestellt. Zu erkennen ist, dass sich die seismischen Wellen beginnend von der Schlagposition 9,5 m in beiden Richtungen ausbreiten. Die direkten Wellen befinden sich zeitlich zur Position 9,5 m bei 0 ms. Ihre Amplituden innerhalb eines Betonrohres (hier Betonrohr 4) sind relativ gleichbleibend stark. An den Rohrverbindungen zwischen Rohr 3 / Rohr 4 und Rohr 4 / Rohr 5 brechen die Amplituden der direkten Wellen abrupt ab und lediglich relativ schwache Signale können auf den benachbarten Betonrohren beobachtet werden. Desweiteren wird ein Teil der direkten Wellen an den Rohrverbindungen zu den benachbarten Betonrohren reflektiert (entgegengesetzte Laufrichtungen können erkannt werden). Die Rohrverbindungen zwischen den einzelnen Betonrohren stellen also starke Inhomogenitäten für die Ausbreitung der seismischen Wellen dar.

Die Geschwindigkeitsanalysen der amplitudenstarken direkten Wellen zeigen, dass es sich bei den direkten Wellen um Oberflächenwellen oder Tunnelwellen d.h. geführte Wellen handelt. Ihre Geschwindigkeit von etwa 1.320 m/s ist viel zu gering im Vergleich zu den erwarteten Geschwindigkeiten der Longitudinalwellen (P-Wellen) in Beton von etwa 4000 m/s und den

Transversalwellen (S-Wellen) von etwa 2.200 m/s. P- oder S-Wellen können in den Seismogrammen nicht beobachtet werden. Dementsprechend sind ihre Amplituden zu gering als dass man ihre Einsätze erkennen könnte.

Eine schnelle Analyse der Tunnelwellen auf das Vorhandensein von Inhomogenitäten kann mit Hilfe einer „Common-Offset-Darstellung“ (COD) durchgeführt werden. COD‘s sind Abbildungen der seismischen Wellenausbreitung, bei denen Schusspunkte und Geophone immer den selben Abstand besitzen. Derartige Bilder sind vergleichbar mit den Bildern von Radargrammen bezogen jedoch auf elastische und nicht auf elektromagnetische Wellen und mit einer sehr viel größeren Wellenlänge der analysierten Wellenart. Die Anlage 29 zeigt eine COD der Messdaten, erfasst mit Hilfe von Geophonen entlang der Messlinie 1. Ein konstanter Abstand zwischen Quelle und Empfänger von 30-40 cm wurde für diese COD gewählt. Zu erkennen sind zunächst die Messbereiche, auf welche die Kalibriermessungen beschränkt waren. Messbereiche die bei den Kalibriermessungen unberücksichtigt wurden, sind mit Nullspuren aufgefüllt, so dass ein kontinuierliches Bild der Messlinie 1 entsteht. Anhand der COD können Rohrverbindungen der einzelnen Betonrohre sehr schnell anhand des Fehlens der Nachphasen und anhand von Sprüngen oder Krümmungen in den ersten Phasen der Tunnelwellen erkannt werden. Insbesondere fällt ein Sprung in den Phasen an der Grenze B5 zum Mauerwerk auf (Position 28,0 m), der aufgrund der stark unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten zustande kommt. Keinen Sprung erkennt man beim Übergang vom B25 zum B35 (Position 21,0 m).

4.4.3 Messungen mit dem Sonic-Log

Die Messungen mit Sonic Sonden sind nur in Flüssigkeit möglich, da die Flüssigkeit als Übertragungsmedium für das Ultraschallsignal dient, wurden keine Nullmessungen mit dieser Sonde durchgeführt. Laborversuche mit diesem System zeigten, dass wegen der geringen Ankopplungsfläche der runden Sonde weniger als 0.5% der Energie des Ausgangssignals ohne Übertragungsmedium in das Gestein emittiert werden, so dass Messungen ohne Übertragungsmedium nicht möglich sind.

Die benutzen Ultraschallschwinger sind ringförmig und übertragen das Ausgangssignal gleichmäßig über den gesamten Umfang. In Bohrungen kann davon ausgegangen werden, dass das Signal sich entlang der Bohrlochwand ausbreitet und eine Sekundärwelle in die Flüssigkeit emittiert, die von den ebenfalls ringförmigen Aufnehmern erfasst wird. Bei der speziellen Anwendung im Kanal, mit weitaus größerem Durchmesser und nur teilweisen Wasserfüllung wird das Signal an der Kanalwand entlang laufen und die Sekundärwelle erzeugen. Parallel dazu wird das Ausgangssignal an der Wasseroberfläche reflektiert, so dass außer dem Signal der Betonwand und der Welle, die direkt vom Sender zum Empfänger durch das Wasser läuft, ein weiterer Einsatz zu beobachten sein wird, der von der Wasseroberfläche kommt. Einsätze, die von den Störkörpern kommen, liegen je nach Abstand zur Betonwand unmittelbar nach dem Betoneinsatz oder bei tieferen Objekten auch näher an den Wassereinsätzen. Die absolute Position dieser Einsätze – soweit sie erkennbar sind - hängt von ihrem Abstand zur Betonwand und der seismischen Geschwindigkeit außerhalb der Betonwand ab.

Ziel der Untersuchungen war die Erkundung des Betons und der angrenzenden Bereiche. Ermittelt werden sollten die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschallsignalen im Beton in Abhängigkeit vom Aufbau der Kanalrohre, sowie – falls sichtbar – Informationen über die im Teststand eingebauten Störkörper.

Die Sonde ist mit einem Kabel mit der Datenerfassungseinheit an der Oberfläche, außerhalb des Kanals verbunden. Zur Messung wird die Sonde in den Kanal gebracht und an das dem Einstieg gegenüberliegende Ende des Kanals positioniert. Über Umlenkrollen wird das Messkabel aus dem Kanal geleitet. Bei der Messung wird das Kabel langsam aufgerollt und die Sonde über den Kanalboden oder über die Führungsleisten an der Wand bewegt. Dabei wird nach 5 cm Messstrecke ein Ultraschallsignal vom Sender A ausgesendet und von den vier Aufnehmern registriert. Nach weiteren 5 cm wird der Sender B aktiviert und das Signal von den gleichen Aufnehmern registriert. Sender A hat einen Abstand von 50 cm zum ersten Empfänger, Sender B ein Abstand von 100 cm. Die vier Empfänger haben untereinander einen Abstand von jeweils 20 cm.

Da der Kanal nur teilweise mit Wasser gefüllt war, und die Sonde aus Sicherheitsgründen geführt werden musste, wurden nur die Profile 1 und 2 vermessen.

Da sich der Innendurchmesser der Versuchsstrecke nach 16 m ändert, wurde die Messung an dieser Stelle unterbrochen, die Sonde umgesetzt und dann die Messung fortgesetzt.

Soweit möglich wurde bei allen Empfängern mit einer Sample Rate von 4µs und 256 Samples pro Aufnahme gearbeitet. Bei den weiter entfernten Empfängern erwies sich diese Sample Rate als zu gering. Da die Anzahl der Samples auf 256 begrenzt ist, konnte keine Signale nach der direkten Wasserwelle aufgenommen werden. Aus diesem Grund wurde die Sample Rate von Aufnehmer zu Aufnehmer um 2µs gesteigert.

- Aufnehmer: FWS Sonde der Firma ALT, 20 kHz
- Ankopplung: Wasser
- Registriersystem: FWS Sonde der Firma ALT
- Messpunktabstand: alternierend A/B 5 cm
- Anzahl der Samples: 256 auf allen Kanälen
- Quelle: 20 KHz FWS der Firma ALT
- Quellpunktabstand: alternierend A/B 5 cm
- Aufnahmegeometrie: Quelle und Empfänger haben immer den gleichen Abstand.

Im Anschluss an die Messung wurden die Messdaten in das Auswertesystem WellCAD übernommen und die bearbeitete Sektion wurde in einer Bildmontage mit der Aufrisszeichnung der Versuchsstrecke zusammengeführt. Soweit nötig wurden die gemessenen Sektionen teufenkorrigiert. Eine Korrektur war immer dann erforderlich, wenn die Sonde über den Absatz im Kanal gebracht werden musste. Eine zweite Teufenkorrektur ist notwendig, um die Empfänger auf eine einheitliche Position zu bringen (Korrektur der unterschiedlichen Abstände Sender – Empfänger).

Bei allen Kanälen werden die Messergebnisse von den direkt im Wasser gelaufenen Wellen und den von der Wasseroberfläche reflektierten Wellen dominiert. Da der Wasserstand vom Anfang des Profils zum Ende hin zunimmt, sind die Auswirkungen auf die Ergebnisse unterschiedlich.

In der Anlage 30 ist das Ergebnis der Messungen mit einem Sender - Empfänger Abstand von 110 cm dargestellt. Die Aufnahmelänge wurde auf ca. 2 ms verlängert. Die Dominanz der Wassereinsätze ist bei dieser Aufnahme deutlich zurückgegangen. In beiden Profilen – 1 und 2 – ist ein klarer Ersteinsatz von den im Beton gelaufenen Wellen zu erkennen. Bis zum Einsatz der Wasserwellen sind in beiden Profilen über den ganzen Bereich der Messung die Rohrverbindungen zu erkennen.

Im Profil 1 sind im Bereich der Rohre 31 bis 11 nach den Wassereinsätzen keine signifikanten Strukturen zu erkennen. Im Profil 2 sind eine Reihe von Reflexionen zu erkennen, die den Rohrverbindungen zugeordnet werden können. An der Grenze der Blöcke 16 und 15 befindet sich eine starke Reflexion. Eine schwächere zwischen den Blöcken 19 und 18.

Der Bereich der Rohre 1 bis 6 zeigt in beiden Profilen im hinteren Teil der Aufnahmen – nach den Wassereinsätzen – deutliche Reflexionen. Im Profil 1 sind die Reflexionen nicht so deutlich ausgeprägt, wie im Profil 2. Im Profil 2 sind sehr gute Reflexionen an der Grenze Rohr 5 – Rohr 4 sowie am Übergang Rohr 4 – Rohr 3 zu sehen. Weniger deutlich sind die Reflexionen an der Grenze Rohr 2 und Rohr 1.

Insgesamt zeigt sich, dass sich mit diesem Messinstrument und dieser Messgeometrie in begehbaren Kanälen nur begrenzt die angestrebten Ergebnisse erzielen lassen. Die Bestimmung von seismischen Geschwindigkeiten innerhalb des Kanals ist problemlos möglich, die Unterscheidung von verschiedenen Materialien über die Geschwindigkeit jedoch nur sehr begrenzt. Mauerwerk und Klinkeroberflächen zeigen deutlich unterschiedliche Geschwindigkeiten.

Die Rohrverbindungen werden von diesem Messsystem in allen Messgeometrien gut erkannt.

Die Auswertung zeigt, dass für derartige Messungen der Abstand Sender Empfänger ca. 1 m betragen sollte. Die besten Ergebnisse wurden mit einem Abstand von 1,1 m und einer Aufzeichnungslänge von 2 ms erzielt.

Mit dem verwendeten Messaufbau konnten keine Effekte außerhalb des Kanals erkannt werden. Alle im Außenraum der Versuchsstrecke eingebauten Anomalien wurden nicht erkannt. Dies lag einerseits an der beschränkten Energie des Senders. Da hier eine Refraktionsmessung durchgeführt wurde, sind nur Anomalien zu erkennen, die eine höhere Geschwindigkeit als die Umgebung aufweisen und über eine gewisse Mindestdicke verfügen. Im Regelfall führen kleinere Anomalien zu Störungen des Wellenbildes. In diesem Fall wurden weite Bereiche des Messsignals jedoch durch die Wasserwellen überlagert. In den Bereichen, in denen die Wasserwelle nicht dominant war, wurden Reflexionen erkannt, die in erster Linie auf die Fugen zurückgeführt werden konnten.

4.4.4 Messungen mit dem Induction-Log

Die Messungen mit den Induction Sonden sind sowohl in Luft als auch in Flüssigkeit möglich. Aus diesem Grund wurde eine Nullmessung auf dem Profil 5 (Kanalboden) in Luft mit dieser Sonde

durchgeführt. Einige Monate später wurden mit der gleichen Sonde Wiederholungsmessungen auf dem Profil 5 und den Profilen 1 und 2 in Wasser durchgeführt.

Die Sonde verfügt über ein Sendespulensystem und zwei Empfangsspulensysteme. Das emittierte Signal breitet sich sowohl in Luft (Leitfähigkeit unter Normalbedingungen 0) als auch in Flüssigkeiten mit hohen Leitfähigkeiten aus. Die Eindringtiefe der elektromagnetischen Welle ist vom Abstand Sender Empfänger von der Leitfähigkeit der Umgebung abhängig.

Mit diesem Messsystem können Leitfähigkeitsanomalien in der Umgebung der Sonde ermittelt werden. Da die Messung auf der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen mit relativ großen Wellenlängen beruht, können mit dieser Methode keine Feinstrukturen aufgelöst werden. Metallgitter und geschlossene, leitende Strukturen wirken wie ein Faraday‘scher Käfig. Befindet sich die Sonde außerhalb des Käfigs, können Strukturen innerhalb des Käfigs nicht erkannt werden. Der Käfig selbst wird normalerweise nicht lokalisiert, die Präsenz an sich zeigt sich jedoch durch eine geringere Dämpfung des empfangenen Signals. Befindet sich die Sonde innerhalb eines Faraday‘schen Käfigs, so dringen keine elektromagnetischen Wellen aus diesem Käfig nach außen. Leitfähigkeitsänderungen außerhalb des Käfigs werden deshalb nicht erkannt.

Sonden dieses Typs werden bei Standardmessungen (Bohrlochmessungen) als Collar-Locator eingesetzt. Sie zeigen sehr deutlich an, wo sich eine Rohrverbindung befindet. In einer Abfolge von Rohrverbindungen weisen Veränderungen in der Signalform einzelner Verbindungen auf unvollständige oder schadhafte Verbindungen hin.

Ziel der Untersuchungen mit dieser Sonde war die Erkundung des Betons, der Bewehrung und auch des Baugrunds, und zwar dann, wenn keine Bewehrung vorhanden ist und die Störkörper einen Leitfähigkeitskontrast zur Umgebung darstellen.

Die Sonde ist mit einem Kabel mit der Datenerfassungseinheit an der Oberfläche, außerhalb des Kanals verbunden. Zur Messung wird die Sonde in den Kanal gebracht und an das dem Einstieg gegenüberliegende Ende des Kanals positioniert. Über Umlenkrollen wird das Messkabel aus dem Kanal geleitet. Bei der Messung wird das Kabel langsam aufgerollt und die Sonde über den Kanalboden oder über die Führungsleisten an der Wand bewegt. Dabei wird nach 5 cm Messstrecke ein Signal vom Sender ausgesendet und von den Aufnehmerspulen registriert. Der Sender hat einen Abstand von etwa 53 cm zum ersten Empfängerarray und ein Abstand von etwa 85 cm zum zweiten Empfängerarray.

Da sich der Innendurchmesser des Kanals bei 16 m ändert, wurde die Messung an dieser Stelle unterbrochen, die Sonde umgesetzt und dann die Messung fortgesetzt.

Soweit möglich wurde bei allen Messungen mit einem Punktabstand von 5 cm gearbeitet..

In der Anlage 31 werden die Messergebnisse der Hauptmessung auf den Profilen 1 und 2 dargestellt. Die ILD (tief eindringende Messung) und die ILM (weniger tief eindringende Messung) auf einem Profil wurden zusammen dargestellt. Zusätzlich wurde neben dem Ergebnis des Profils 1 aufgenommene Widerstandskurve dargestellt.

Bei allen Messungen auf den beiden Profilen fällt auf, dass im Bereich der Rohre 1 bis 6 die Rohrverbindungen deutlich zu sehen sind. Die Leitfähigkeitswerte sind hier relativ hoch. In den Rohrverbindungen sinkt die Leitfähigkeit schnell ab und steigt unmittelbar nach der Rohrverbindung wieder sehr schnell auf das vorherige Niveau an. Ab Block 12 sinkt die Leitfähigkeit auf nahezu Null und bleibt auf diesem Niveau bis Rohr 31. Dieser sehr charakteristische Verlauf ist bei allen Induction-Messungen auf allen Profilen zu beobachten. Der Verlauf ist somit durch den Kanal bedingt.

Der Bereich zwischen Block 12 und Rohr 31 weist eine induktive Leitfähigkeit von nahe Null auf. Damit sind hier keine Aussagen über das Umfeld des Kanals möglich.

Auf beiden Profilen zeigt das tiefer eindringende Log (ILD) im Bereich der Rohre 1, 2 und 5 ein stark strukturiertes Signal, das auf die Bewehrung zurückgeführt wird. Im Profil 1 sind die Auflager, sowie die Stützkeile angedeutet. Mit dieser Sonde ist somit ein Durchdringen der Wände möglich.

In der Anlage 32 wurden die Messergebnisse der Hauptmessung mit und ohne Wasser in der Versuchsstrecke verglichen. ILD und ILM sind nebeneinander dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass das Wasser keinen Einfluss auf das Messergebnis hat. Mit diesem Messsystem sind somit Messungen unabhängig vom Wasserstand im Kanal möglich.

Soweit die Sonde Leitfähigkeitskontraste erfasst, werden die Rohrverbindungen sicher wiedererkannt. In Teilen der Messung werden Strukturen gefunden, die durch die Bewehrung bedingt sein können. Im Bereich der Rohre 1 bis 6 wird teilweise in den Baugrund gesehen. Detaillierte Aussagen sind aber nur bedingt möglich. Im Bereich der Blöcke 11 bis 31 reagiert die Sonde immer gleich. Bei allen Messungen ist der Messwert auf nahe Null gesunken. Eine einfache Erklärung ist derzeit nicht möglich. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass dort materialbedingt eine Anomalie (für die DIL Sonde sichtbar) vorliegt, die die ausgesendete Energie völlig absorbiert oder ableitet.

5 Forschung und Entwicklung

5.1 Allgemein

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden erstmals geophysikalische Messgeräte und Verfahren aus dem Explorationsbereich im Kanal angewendet. Die seismischen Methoden wurden bisher noch nie in einem Kanal eingesetzt. Durch den Einsatz von vielen Geophonen wird es möglich, entlang von Profilen Veränderungen in der Kanalwand und außerhalb zu erfassen. Normalerweise werden die Geophone mit einem Dorn in den Erdboden gesteckt. Im Kanal wurden diese in der ersten Phase über kleine Bohrungen angekoppelt. Bei seismischen Messungen für die Exploration des Untergrundes nimmt in der Regel die seismische Geschwindigkeit mit der Tiefe zu. Der Kanal ist eine Hochgeschwindigkeitszone, woran sich radial der umgebende Boden mit niedrigeren Geschwindigkeiten anschließt. Durch den Kanal kommt es zu neuen Wellentypen, die man bisher in der Fachwelt nur von ersten Untersuchungen in großen Tunnelbauwerken her kennt. Diese Wellenart ist eine Oberflächenwelle, die man auch als Tunnelwelle bzw. Kanalwelle bezeichnen kann. Die Analyse dieser Wellen und eine neue Auswertetechnik wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens neu entwickelt (s. Kapitel 5.2). Aufgrund der hochauflösenden Anwendung im Kanal war es notwendig, die Digitalisierungsrate zu erhöhen (s. Kapitel 5.4).

Das eingesetzte Radar wurde bereits in anderen Forschungsvorhaben (z.B. Stadtentwässerung Hamburg) getestet. Im Rahmen dieses Forschungsvorhaben galt es, weiter Erfahrungen zu sammeln, um einen routinemäßigen Einsatz zu entwickeln.

Die Bohrlochsonden (Sonic-, Induction-Log) sind Standardsonden der Explorationsbohrlochgeophysik. Im Bereich der Exploration sind die Bohrungen unverrohrt bzw. mit Stahl oder mit Kunststoff verrohrt und der Durchmesser liegt meist zwischen 2 und 6 Zoll. Im Kanal sollten Erfahrung mit dicken Beton, Mauerwerk, Bewehrung, etc. gesammelt werden und die Aussagemöglichkeiten abgegrenzt werden.

Aufbauend aus den Erfahrungen der Bohrlochgeophysik wurde eine stärkere Ultraschall-Bohrlochsonde entwickelt und eingesetzt, um die mächtige Kanalwand zu durchdringen (s. Kapitel 5.3).

5.2 Analyse von Oberflächenwellen

Eine neue Auswertetechnik wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelt. Aufgrund der Anregung von seismischen Wellen an der Kanalwand werden besondere Oberflächenwellen (Tunnelwellen oder Kanalwellen) erzeugt. Dieser Wellentyp ist von der Erdoberfläche her bekannt und es gab in den letzten Jahren auch Ansätze für die Auswertung von solchen Oberflächenwellen in Tunneln. Dieser Wellentyp breitet sich entlang der Oberfläche aus und hat lediglich eine Eindringtiefe von etwa einer Wellenlänge in den Untergrund. Auch bei den im Kanal durchgeführten seismischen Messungen wurde diese Wellenart beobachtet und gezielt ausgewertet. Hierzu wurde eine neue

Auswertetechnik angewendet. Aufgrund der Dispersion von Oberflächenwellen, d.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist frequenzabhängig, wurde eine Einzelschuss-Auswertung entwickelt. Hierzu wurden die Daten mit verschiedenen Filtern bearbeitet, z.B. Bandpass 40 – 45 Hz, 70 – 75 Hz und 110 - 110 Hz. Je niedriger die Filterfrequenz, desto größer ist die Eindringtiefe der Oberflächenwelle von der Kanalwand aus. Mit diesem statistischen Ansatz, der frequenzabhängig und somit tiefenabhängig eine Störungsanalyse liefert, wurde es möglich, gestörte von ungestörten Bereichen zu unterscheiden. Exemplarisch zeigt Anlage 33 die Auswertung der Oberflächenwellen von einem Profil an der Erdoberfläche über dem Kanal. Hierbei werden in den verschiedenen Frequenzbereichen die Anzahl der Störungen/Anomalien gezählt. Anlage 34 ist ein Ergebnis, welches u.a. den Schacht zur Grundwassersimulation, den Bereich der geringen Verdichtung, die Spundwand und vor allem den Bereich der Trümmer abbildet. Die Ergebnisse zeigen eine relativ starke Streuung der ermittelten Anomalien der Oberflächenwellen. Als deutliche Störung zeichnet sich der Schacht zur Grundwassersimulation auf der rechten Kanalseite zwischen Segment 1 und 2 ab. Ebenfalls deutlich anhand der Ergebnisse der Oberflächenwellenanalyse zu erkennen, ist der Übergang zwischen den Betonsegmenten 6 und 11 und 23 und 31, dort verändert sich der Kanalquerschnitt von einem runden Segment zum nahezu rechteckigen Betonsegment mit größerem Außenquerschnitt. Ebenfalls deutliche Anomalien ergeben sich im Bereich der Spundwand (bzw. auch unmittelbar davor und dahinter). Der Findling D2 im ersten Betonsegment zeichnet sich nicht als Anomalie ab, die Findlinge im Segment 3 und 5 sowie der 1 m Hohlraum im Bereich IV sind als gering gestörte Bereiche zu identifizieren. Wahrscheinlich führen dort Untergrundeffekte (Übergang vom Mischboden zu Ruhrschotter) und fehlende Verdichtung der Bettung zu sich überlagernde und dadurch schwer trennbare Effekte. Eine genaue Zuordnung wird dadurch erschwert und führt zu einer „Vermischung“ verschiedener Oberflächenwellenstörungen. Deutlich zeichnet sich eine Anomalie im Bereich C/III auf der Norden zugewandten Kanalseite ab. Aus den Plänen zum Aufbau des Kanals ist hier jedoch keine Erklärung für diese Störung zu finden. Möglicherweise handelt es sich hier um Seiteneffekte, die nicht von der Kanalwand her stammen, sondern von „natürlichen“ Störkörpern auf der anderen Seite herrühren. Im Bereich 23/31 zeichnet sich auf der nördlichen Seite eine deutliche Anomalie, die als eine Beeinflussung der dort eingebauten Trümmer interpretiert wird.

Anlage 35 zeigt ein weiteres Beispiel für die Auswertung der Oberflächenwellen. Hierbei wurde im Kanal mit einem 5 kg Handhammer seismische Signale angeregt, die auf dem jeweiligen Längsprofil von Geophonen aufgezeichnet wurden. Dies wurde für die beiden Messprofile P2 und P3 durchgeführt. Nach der Auswertung der Oberflächenwellen in drei unterschiedlichen Frequenzbereichen (50-60 Hz, 110-110 Hz und 200-210 Hz) zeigte sich aufgrund der Anzahl der Störungen in den Einzelanregungen, dass sich neben der Dehnungsfuge, auch der Übergang des Ausbaus sowie die Anschlussleitung im Block 3 abbilden.

5.3 Aufbau einer Ultraschallsonde (40 kHz)

Um in wassergefüllten Kanalsystemen mit Ultraschall eine problemlose Ankopplung zu erzielen, wurden Ultraschallköpfe mit 40 kHz in ein Sondensystem integriert. Um den Abstand variabel zu gestalten, wurde der Anregungskopf und das Empfängermodul getrennt aufgebaut. Das Messsystem besteht aus zwei in den Gehäusedimensionen baugleichen Bohrlochsonden, von denen eine als Sender und die zweite als Empfänger dient. Abgestrahlt wird ein 40-KHz Ultraschallsignal. Durch die räumliche Trennung von Sender und Empfänger eignet sich das System sowohl für Durchschallungsmessungen als auch für Reflexionsmessungen. Die Sonden haben eine Länge von 0,78 m ohne Kabelkopf bzw. 1,08 m mit Kabelkopf, der Durchmesser beträgt 42 mm. Als Sender fungiert ein piezoelektrisches Array mit einer Signalfrequenz von 40 kHz und einer möglichen Messrate von 0,5 Hz. Der Empfänger ist ein piezoelektrisches Array (7-fach Blockpiezo) mit Signalverstärker und einer elektrischen Kapazität von 390 pF. Die folgende Abbildung zeigt eine der benutzten Ultraschallsonden:

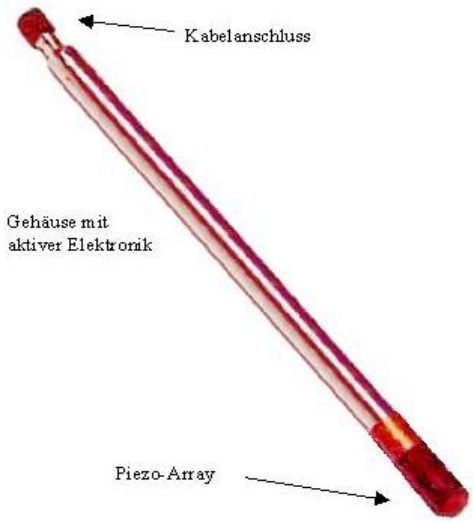


Abbildung 23: Für die Anwendung im Kanal entwickelte Ultraschallsonde

Die Erkenntnisse der Nullmessungen zeigten, dass sich die Ankopplung von Ultraschallprüfköpfen an die Wand des Kanals mit Hilfe von Kopplungsmitteln als sehr aufwendig darstellte. Daher wurde das Ultraschallverfahren zum Zeitpunkt des mit Wasser gefluteten Kanals erneut eingesetzt, da über das Wasser eine optimale Kopplung des Senders und Empfängers an den Beton gegeben ist. Im vorliegenden Fall eines mit Wasser gefluteten Kanals kam wegen der einseitigen Zugänglichkeit das Echo-Verfahren zum Einsatz. Durch das Wasser als Kopplungsmedium verschiebt sich die untersuchte Schichtreihenfolge um ein weiteres Medium, so dass die erste Schichtgrenze, von der Reflexionen beobachtet werden können, der Übergang von Wasser zu Beton ist. Ziel dieser Untersuchungen war es, die Eindringtiefe des Ultraschallverfahrens für weitere Grenzflächen hinter dem ersten Reflektor zu erkunden. Die Abfolge der Reflektoren im vorliegenden Testfall stellt sich mit steigendem Abstand von den Sonden wie folgt dar:

- Übergang von Wasser zur Betonwandung,
- Übergang von der Betonwandung zum umliegenden Medium (Baugrund),
- Übergang vom Baugrund zu einem Störkörper (Findling, Hohlraum, Spundwand).
- Eine Signalanregungsfrequenz von 40 kHz wurde gewählt.

Die bearbeitete Sektion (Messprofil 2) wurde in einer Bildmontage mit der Aufrisszeichnung der Versuchsstrecke zusammengeführt (Anlage 36) In dieser Bildmontage wurden die eindeutig erkennbaren Reflektoren markiert. Dabei handelt es sich um eine direkte Reflexion von der Grenze Wasser/Betonwand und einer zeitlich versetzten Reflexion von der im Kanalrohr befindlichen freien Wasseroberfläche. Uneinheitlich zeigt sich eine mögliche Reflexion von der hinteren Betonwand. Hier konnte eine eindeutige Zuordnung nicht erfolgen. Eingebaute Störkörper hinter der Betonwandung konnten nicht eindeutig identifiziert werden, da mögliche Reflexionen von diesen Störkörpern durch Reflexionen innerhalb des Kanalkörpers, vor allem von den Reflexionen an der freien Wasseroberfläche überlagert werden. Wie bei den Seismik-Messungen gestaltet sich eine Geschwindigkeitsbestimmung der Ultraschallwellen außerhalb des Betonkörpers bei dieser Messanordnung als nicht praktikabel, so dass keine Entfernungswerte angegeben werden. Rohrverbindungen zwischen den unterschiedlichen Betonrohren werden durch leichte Phasensprünge der Ultraschallsignale erkannt.

5.4 Erhöhung der Digitalisierungsrate von 32 kHz auf 128 kHz

In der Standard-Seismik ist heutzutage eine Abtastrate des seismischen Signals von 32 kHz ausreichend. Dies entspricht einem Abstand zwischen 2 Messwerten von 1/32 ms = 0,031 ms. Da dies für Messung im Beton nicht ausreichend war, wurde die Abtastrate auf 128 kHz, d.h. auf 1/128 ms = 0,008 ms erhöht. Hierzu waren sowohl Änderungen in der Hardware wie auch Software notwendig.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die zahlreichen Messungen im Versuchskanal auf dem IKT-Gelände in Gelsenkirchen haben gezeigt, dass es möglich ist, viele Strukturen im Kanal und außerhalb des Kanals aufzulösen.

Hierbei wurden neben verschiedenen Varianten der Seismik, das Radar, Bohrlochgeophysik (Sonic-(20 kHz), Induction-Log, Ultraschallmessungen (40 kHz)), Impactecho, Ultraschallmessungen, Gravimetrie, Elektromagnetik und Thermographie im Kanal eingesetzt. Für die Erkundung von der Erdoberfläche aus wurden Messungen mit Seismik, Geoelektrik und Tomographie durchgeführt. Die einzelnen Messverfahren wurden ausgewertet und mit den vorgegebenen Strukturen verglichen. Es wurde eine Matrix erstellt, die auf der einen Seite die Untersuchungsziele beinhaltet und auf der anderen Seite, die Verfahren, die erfolgreich getestet und kalibriert wurden (s. **Tabelle 3, Tabelle 4**). Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Radar, die Seismik und das Ultraschall-/Impactecho die meisten der vorgegebenen Untersuchungsziele erfüllen und daher weiterverfolgt und entwickelt werden sollten.

Im Bereich der Seismik und Ultraschall gab es messtechnische Weiterentwicklungen. Bei der Datenbearbeitung wurden neue Auswertetechniken entwickelt und erfolgreich angewendet. Aufgrund der gewonnenen Daten mit wesentlich höherem Informationsgehalt musste der Schwerpunkt von den Messungen in den Bereich der Auswertung verschoben werden.

Neben den positiven Ergebnissen gibt es aber auch folgende Punkte, die vor Beginn des Projektes anders eingeschätzt wurden:

- Wenn die Messverfahren eine Anomalie erfassen, so ist derzeit die Interpretation aufgrund der Mehrdeutigkeit nur eingeschränkt möglich.
- Aufgrund der teilweise bis zu 42 cm dicken Kanalwand kam es bei vielen Messverfahren zu einer großen Absorption der Energie, so dass die Auflösung außerhalb des Kanals vermindert wird. Die Sonden der Bohrlochgeophysik sind für vertikale Bohrungen ausgelegt, die keine oder eine geringfügige Verrohrung (Stahl, Kunststoff) besitzen. Eine Messung mit einer Gamma-Gamma-Sonde im Kanal zur Bestimmung der Dichteunterschiede war aufgrund der radioaktiven Strahlung für die Mitarbeiter nicht möglich. Diese Sonde könnte in einem nicht begehbaren Kanal durchaus erfolgreich eingesetzt werden.
- Die Versuchsstrecke beinhaltet auf einer Länge von knapp 40 m neben einer Vielzahl von unterschiedlichen Kanälen auch eine Vielzahl von Anomalien und Bodenarten. Diese Komplexität kann zu einer Überlagerung einzelner Messeffekte führen, so dass häufig eine Trennung der Anomalien nicht möglich ist.
- Aufgrund der gemessenen seismischen Geschwindigkeiten im Boden erkennt man, dass es sich nicht um gewachsenen Boden handelt. Dies bedeutet, dass es keine zusammenhängenden Bereiche gibt, in denen die seismische Geschwindigkeit konstant bleibt.

- Die Rohrverbindungen bei den Stahlbetonrohren können die Messungen beeinflussen, so dass keine durchgehende Profildarstellungen erzielt werden können, um Anomaliebereiche besser auflösen zu können, d.h. die Effekte der Rohrverbindungen können teilweise stärker sein als die der gesuchten Anomaliebereiche.

Trotz dieser Erkenntnisse lässt der Kanal und die Umgebung erfolgreich erkunden, d.h. nahezu alle Zielobjekte konnten geortet und beschrieben werden. Hierbei wurden erste Erfahrungen bei der Interpretation der Messergebnisse gesammelt. Diese Erkenntnisse müssen daher in der Praxis weiter entwickelt und kalibriert werden.

Daher ist im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein in-situ Einsatz der Verfahren in einer Testhaltung der Stadt Köln vorgesehen. Bevor man die Messungen in ein oder zwei geeigneten Kanälen durchführt, sollten entsprechende Vorbereitungen getroffen werden:

- Ortsbegehung und Festlegung der Untersuchungsziele, die aufgrund der Erfahrungen im Versuchskanal erreicht werden können
- Auswahl der geeigneten Methoden, Messgeometrien und Messparameter
- u.U. Geräteumbauten zur Ermöglichung einer Einbringung über Einstiegsschächte
- Anpassung der Messdurchführung unter realen Verhältnissen

Nach Durchführung dieser in-situ Messungen wird es möglich sein, eine geeignete Verfahrenskombination abschließend festzulegen, mit denen unter den vorgegebenen Voraussetzungen aussagekräftige Ergebnisse hinsichtlich der quantitativen Inspektion von Abwasserkanälen erzielt werden können. Erst danach kann über eine Optimierung der Sensorik, der Messtechnik und der Auswertung bzw. die Anwendung in nicht begehbaren Abwasserkanälen nachgedacht werden.

Untersuchungsziele **ERGEBNIS**	1-erreicht 2-erreicht mit Einschränkung 3-nicht erreicht	Radar	Ultraschall / Impactecho	Seismik	Induction Log	Sonic Log	Tomographie
	A. Bauwerk						
A.1	**Geometrie**						
A.1.a	**Wanddicke**						
(a)	Absolut	1	1	3	3	3	3
(b)	Veränderungen (z.B. Versprung oder über den Umfang)	1	1	1	3	3	3
(c)	Betonauflager Rohre 5/6 erkannt	1	3	3	3	3	3
(d)	Betonauflager Rohre 5/6 geometrisch quantifiziert	3	3	3	3	3	3
(e)	Schichtgrenze geklinkerte Sohle erkannt	1	3	3	3	3	3
(f)	Tiefenlage Schichtgrenze geklinkerte Sohle absolut	2	3	3	3	3	3
(g)	Betonauflager seitlich unter Mauerwerkskanal erkannt	2	3	3	1	3	3
(h)	Betonauflager seitlich unter Mauerwerkskanal quantifiziert	3	3	3	2	3	3
A.1.b	**Bewehrung**						
(a)	Abstand der Bewehrung absolut	1	3	3	3	3	3
(b)	Abstand der Bewehrung Veränderungen	1	3	3	2	3	3
(c)	Durchmesser der Bewehrung absolut	2	3	3	3	3	3
(d)	Durchmesser der Bewehrung Veränderungen	2	3	3	3	3	3
(e)	Tiefenlage(n) der Bewehrung absolut	1	3	3	3	3	3
(f)	Tiefenlage(n) der Bewehrung Veränderungen	1	3	3	3	3	3
A.2	**Materialfestigkeiten**						
A.2.a	**Beton**						
(a)	Betonfestigkeiten absolut	3	3	2	3	2	3
(b)	Betonfestigkeiten Veränderungen > 5N/mm²	3	3	1	3	2	3
A.2.b	**Bewehrung**						
(a)	Stahlfestigkeit absolut	3	3	3	3	3	3
A.2.c	**Mauerwerk**						
(a)	Steinfestigkeiten absolut	3	3	3	3	2	3
(b)	Steinfestigkeiten Veränderungen	3	3	3	3	2	3
A.3	**Unterschiedliche Fugenausbildung**						
A.3.a	**Arbeitsfuge Betonkanal**						
(a)	ohne Fugenband erkannt	1	3	3	3	3	3
(b)	Fugenblech erkannt	1	3	3	3	3	3
(c)	Fugenblech Tiefenlage bestimmt	2	3	3	3	3	3
(d)	Fugenband erkannt	1	1	3	3	3	3
(e)	Fugenband Tiefenlage bestimmt	2	1	3	3	3	3
A.3.b	**Dehnungsfuge Betonkanal**						
(a)	Fugenband erkannt	1	3	1	3	3	3
(b)	Fugenband Tiefenlage bestimmt	2	3	2	3	3	3
A.4	**Schäden**						
A.4.a	**Risse innen**						
(a)	Breite	3	3	3	3	3	3
(b)	Tiefe	3	3	3	3	3	3
A.4.b	**Risse außen**						
(a)	Breite	3	3	3	3	3	3
(b)	Tiefe	3	3	3	3	3	3
A.4.c	**Anomalien**						
(a)	Verschobene Dichtringe	3	3	3	3	3	3
(b)	Kiesnest	1	1	3	3	3	3
(c)	Stahlkeile im Auflagerbeton	1	3	3	3	3	3
(d)	Transportanker	3	3	3	3	3	3
(e)	Sanierung Schäden Betonrohr (insbesondere Loch)	3	3	3	3	3	3

Tabelle 3: Bewertung der Untersuchungsziele beim Bauwerk hinsichtlich der eingesetzten geophysikalischen Verfahren.

Untersuchungsziele **ERGEBNIS**	1-erreicht 2-erreicht mit Einschränkung 3-nicht erreicht	**Radar**	**Ultraschall / Impactecho**	**Seismik**	**Induction Log**	**Sonic Log**	**Tomographie**
B. Baugrund							
B.1	**Boden**						
B.1.a	**Bodenparameter**						
(a)	Wichte	3	2	3	3	3	3
(b)	Reibungswinkel	3	3	3	3	3	3
(c)	Kohäsion	3	3	3	3	3	3
(d)	Horizontaler Bettungsmodul	3	2	3	3	3	3
B.1.b	**Schichtwechsel**						
(a)	Wechsel Bodenarten erkannt	1	3	3	3	3	1
(b)	Wechsel Verdichtung erkannt	3	3	3	3	3	1
B.2	**Verbau**						
B.2.a	**Spundwand**						
(a)	Etwas erkannt	1	3	1	3	3	1
(b)	Als Spundwand erkannt	1	3	1	3	3	1
(c)	Abstand Spundwand bestimmt	2	3	2	3	3	1
(d)	Verlauf bestimmt	1	3	1	3	3	1
B.2.b	**Trägerbohlwand**						
(a)	Etwas erkannt	3	3	3	3	3	3
(b)	Stahlträger erkannt	3	3	3	3	3	3
(c)	Unterschied mit und ohne Verbauholz	3	3	3	3	3	3
(d)	Als Trägerbohlwand erkannt	3	3	3	3	3	3
(e)	Abstand Trägerbohlwand bestimmt	3	3	3	3	3	3
(f)	Verlauf Trägerbohlwand bestimmt	3	3	3	3	3	3
B.2.c	**Seitliche Abgänge**						
(a)	Etwas erkannt	3	3	1	3	3	3
(b)	Material erkannt	3	3	2	3	3	3
(c)	Verlauf erkannt	3	3	2	3	3	3
B.3	**Anomalien**						
B.3.a	**Findling**						
(a)	Etwas erkannt	3	3	1	3	3	1
(b)	Als Findling erkannt	3	3	1	3	3	1
(c)	Abstand Findling bestimmt	3	3	2	3	3	1
(d)	Größe Findling bestimmt	3	3	2	3	3	1
B.3.b	**Hohlraum**						
(a)	Etwas erkannt	1	3	1	1	3	1
(b)	Als Hohlraum erkannt	2	3	1	2	3	1
(c)	Abstand Hohlraum bestimmt	2	3	1	3	3	1
(d)	Größe Hohlraum bestimmt	2	3	2	2	3	1
B.3.c	**Baum**						
(a)	Etwas erkannt	3	3	3	3	3	3
(b)	Als Stamm/Holz erkannt	3	3	3	3	3	3
(c)	Als Wurzel erkannt	3	3	3	3	3	3
(d)	Lage bestimmt	3	3	3	3	3	3
B.3.d	**Kabel / Leitungen**						
(a)	Etwas erkannt	2	3	2	3	3	2
(b)	Als Kabel / Leitung erkannt	2	3	2	3	3	2
(c)	Abstand Kabel / Leitung erkannt	2	3	2	3	3	2
(d)	Lage bestimmt	2	3	2	3	3	2

Tabelle 4: Bewertung der Untersuchungsziele beim Baugrund hinsichtlich der eingesetzten geophysikalischen Verfahren.

7 Referenzen

[1] Flohrer, 2001. Untersuchungsbericht, Versuchskanal IKT Gelsenkirchen, Lokalisierung von eingebauten Fehlstellen, Fugenbändern im Beton und Unstetigkeiten im Füllraum. Hochtief Construction AG.

[2] Machbarkeitsstudie „Quantitative Inspektion von Abwasserkanälen und –leitungen mittels geophysikalischer Verfahren“, Auftraggeber: MURL des Landes NRW, Institut für Kanalisationstechnik, Gelsenkirchen, Juli 1999.

8 Anlagen- und Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNGEN

Abbildung 1: Aufbau der Versuchsstrecke „Gläserne Kanal“ auf dem Gelände des IKT 8
Abbildung 2: Prinzipskizze seismischer Messungen 13
Abbildung 3: Schema der Laufwege und -zeiten reflektierter seismischer Wellen 14
Abbildung 4: Schema der seismischen Laufwege und -zeiten bei einer CMP Sortierung 15
Abbildung 5: Beispiel einer seismischen Stapelsektion mit Interpretation 16
Abbildung 6: Anregung seismischer Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen. Einsatz der seismischen Verfahren im Kanal mit Hilfe von Beschleunigungsaufnehmern und der SUMMIT-Registrierapparatur. 18
Abbildung 7: Einsatz der Seismik von der Oberfläche aus, um Strukturen zwischen Oberfläche und Kanal zu erkunden (links: Hammerschlag, rechts: Luftschallseismik). 19
Abbildung 8: Einsatz der Ultraschalltechnik im Kanal. 24
Abbildung 9: Prinzip des Radars 26
Abbildung 10: Einsatz des Radars im Kanal 28
Abbildung 11: Gravimetrische Messungen im Versuchskanal auf dem IKT-Gelände 29
Abbildung 12: Einsatz der Geoelektrik über dem Kanal auf dem Gelände von IKT, Gelsenkirchen . 30
Abbildung 13: Prinzip von Wechselstromverfahren 31
Abbildung 14: Messgeometrie der seismischen Tomographie; links die 'crosshole'-Anordnung, rechts die 'VSP'-Anordnung 34
Abbildung 15: Laufzeiteffekt aufgrund einer Anomalie bei einer Parallel-Durchstrahlung 35
Abbildung 16: Prinzip der seismischen Tomographie 36
Abbildung 17: Ergebnis einer Erzprospektion in Nordspanien mit Hilfe der seismischen Tomographie 37
Abbildung 18: Bohrlochsonden vor dem Einsatz im Kanal 40
Abbildung 19: Einsatz der Infrarotkamera im Versuchskanal auf dem IKT-Gelände in Gelsenkirchen 41
Abbildung 20: Definition von Messlinien im Kanal. Blickrichtung nach Osten (Querschnitt durch den Kanal, Durchmesser des Kanals etwa DN2200. 43
Abbildung 21: Markierungen innerhalb des Kanals. 43
Abbildung 22: Skizze zur Lage von Geophon- und Schussposition 58
Abbildung 23: Für die Anwendung im Kanal entwickelte Ultraschallsonde 70

ANLAGEN

Anlage 1.1: Versuchsstrecke IKT Gelsenkirchen Versuchsaufbau, Maßstab 1:200/100, Blatt-Nr. S001, HOCHTIEF CIVIL, NL Kanal- und Kläranlagenbau Zustand vor dem Umbau.

Anlage 1.2: Versuchsstrecke IKT Gelsenkirchen Versuchsaufbau, Maßstab 1:200/100, Blatt-Nr. S001, HOCHTIEF CIVIL, NL Kanal- und Kläranlagenbau Zustand nach dem Umbau.

Anlage 2: Versuchsstrecke IKT Gelsenkirchen Versuchsaufbau, Maßstab 1:200/100, Blatt-Nr. S002, HOCHTIEF CIVIL, NL Kanal- und Kläranlagenbau.

Anlage 3: **Versuchsstrecke IKT Gelsenkirchen Versuchsaufbau im Hinblick aus Sicht der geophysikalischen Untersuchungen in 4 Abschnitten (a: 0 - 10,8 m; b: -20,8 m; c: -30,6 m; d: -38,5 m)**

Anlage 4: **Dickenänderung bei der Wandstärke des Kanals**
Ergebnis der Radarmessung Profil 2, 900 MHz.

Anlage 5: **Ergebnis Impact-Echo (Hochtief, Construction) zur Bestimmung der Wanddicke.**

Anlage 6: **Bewehrung in der Kanalwand**
Ergebnis der Radarmessung, Rundumprofil bei 14 m (1200 MHz), Scheitel – P3 – P2 – P1 – P4 - Scheitel.

Anlage 7: **Detektion der Bewehrungsmatte**
Ergebnis der Radarmessung zur Unterscheidung zwischen einer engen und einer groben Bewehrung in der Kanalwand (Profil P2, 900 MHz), Messabschnitt 3 bis 8 m.

Anlage 8: **Detektion der Sonderbewehrung**
Ergebnis der Radarmessung, Rundumprofil bei 34 m, Scheitel - P3 – P2 - P1 - P4 - Scheitel.

Anlage 9: **Fugenband in der Außenfuge**
Ergebnis der Radarmessung, Rundumprofil bei 18 m (450 MHz), Scheitel – P3 – P2.

Anlage 10: **Verlauf des Fugenbandes**
Ergebnis der Radarmessung von Profil P6 (900 Hz).

Anlage 11: **Fugenblech in der Arbeitsfuge**
Ergebnis der Radarmessung, Rundprofil bei 34 m (450 MHz), Scheitel – P3 – P2 – P1 – P4 - Scheitel.

Anlage 12: **Verlauf des Fugenbleches**
Ergebnis der Radarmessung von Profil P6 (900 MHz), Längsprofil entlang des Kämpfers.

Anlage 13: **Dehnungsfuge im Mauerwerkskanal**
Ergebnis der Radarmessung auf Profil P2 (900 MHz), Längsprofil von 25 m bis 32 m.

Anlage 14: **Auswirkung der Klinkerung**
Ergebnis der Radarmessung, Rundumprofil bei 34 m (450 MHz), Scheitel P3 – P2 – P1 – P4 - Scheitel.

Anlage 15: **Ergebnis der Thermographie zwischen 20 m und 21 m mit der Abbildung einer Arbeitsfuge bei 20,8 m.**

Anlage 16: **Ergebnis Impact-Echo-Messung an Beton mit Fugenband zwischen Block 11 und 12 (Hochtief, Construction).**

Anlage 17: **Ergebnis der Seismik von Messprofil 4 als Common-Offset Darstellung (90 cm) zur Detektion der Dehnungsfuge.**

Anlage 18: **Anomalie durch Fugenband und Kiesnest**
Ergebnis der Radarmessung, Rundumprofil bei 19 m (900 MHz), Scheitel – P3 – P2.

Anlage 19: **Stahlkeile im Betonauflager**
Ergebnis der Radarmessung auf Profil P5 (900 MHz).

Anlage 20: **Ortung eine Kiesnestes mit Impact-Echo-Messung zwischen Block 11 und 12 (Hochtief, Construction).**

Anlage 21: **Reflexion eines bindigen Bodens im Baugrund**
Ergebnis der Radarmessung zur Erkundung der Bodenstrukturen außerhalb des Kanals, Profil P6 (900 MHz), Längsprofil.

Anlage 22: **Spundwand im Baugrund**
Ergebnis der Radarmessung, Rundumprofil bei 18 m (450 MHz), Scheitel – P3 – P2.

Anlage 23: **Ergebnis der Seismik von Profil 3 als Common-Offset Darstellung (90 cm) zur Detektion einer Spundwand und Trägerbohlwand.**

Anlage 24a: **Ergebnis der seismischen Tomographie, gemessen zwischen der Erdoberfläche und dem Kanal (obere Ebene).**

Anlage 24b: **Ergebnis der seismischen Tomographie, gemessen zwischen der Erdoberfläche und dem Kanal (untere Ebene).**

Anlage 25: **Hohlraum im Baugrund**
Ergebnis der Radarmessung auf Profil P3 (450 MHz), Längsprofil.

Anlage 26: **Ergebnis einer Seismik auf dem Messprofil 3 zur Ortung eines Hohlraumes.**

Anlage 27: **Ermittelte elastische Parameter der Betonproben mit Hilfe von Ultraschallverfahren.**

Anlage 28: **Messdaten erfasst mit Hilfe von Geophonen (Nullmessung); Darstellung der realen Amplituden; Bereich Rohr 3/Rohr 4 und Rohr 4/Rohr 5.**

Anlage 29: **Messdaten, erfasst mit Hilfe von Geophonen (Nullmessung); Darstellung einer Common-Offset-Sektion (30-40 cm Offset).**

Anlage 30: **Ergebnis der Messungen mit einer Sonic-Log Sonde; Sender - Empfänger Abstand von 110 cm.**

Anlage 31: **Messung der Leitfähigkeit mit der Induktion-Log Sonde auf dem Profil 1 und 2.**

Anlage 32: **Messung der Leitfähigkeit mit der Induktion-Log Sonde auf dem Profil 5, einmal trocken und einmal im Wasser.**

Anlage 33: **Datenbeispiel für den Einsatz der Luftschallseismik im Vergleich zur Anregung mit der Hammerschlagseismik.**

Anlage 34: **Auswertung der Oberflächenwellen mit einem neuen statistischen Verfahren zur Lokalisierung von Strukturen im Untergrund.**

Anlage 35: **Auswertung der Oberflächenwellen mit einem neuen statistischen Verfahren zur Lokalisierung von Strukturen im Untergrund, wobei die Anregung und Aufzeichnung der Signale im Kanal stattfand.**

Anlage 36: **Messdaten, erfasst mit Hilfe der 40 kHz Ultraschallsonde entlang der Messlinie 2 (Hauptmessung); Ansprache der sicher zuzuordnenden Reflektoren.**