

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

Endbericht September 2003

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 Ver- fahren

Titel Endbericht

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

Datum: 24.09.2003

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
45307 Essen

Konsortium Gläserner Kanal

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

INHALTSVERZEICHNIS

1	Thema des Forschungsvorhabens.....	4
2	Anschriften der Beteiligten.....	4
3	Verzeichnis der während des Vorhabens erstellten Statusberichte.....	5
4	Ausgangssituation und Zielstellung des Forschungsvorhabens.....	5
4.1	Einleitung und Ausgangssituation	5
4.2	Vorgehensweise bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens	7
5	Durchgeführtes Arbeitsprogramm und Ergebnisse.....	8
5.1	Ergebnisse der Voruntersuchungen	8
5.2	Versuche im Maßstab 1:1	9
5.2.1	Aufbau der Versuchsstrecke auf dem Gelände des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur	11
5.2.2	Geplante Arbeitsschritte zur Durchführung der geophysikalischen Testmessungen in der Versuchsstrecke	13
5.2.3	Durchführung und Ergebnisse der geophysikalischen Messungen in der Versuchsstrecke.....	16
5.2.4	Erstellung einer Erfahrungsmatrix aus den geophysikalischen Messungen in der Versuchsstrecke	17
5.2.5	Vorbereitung für den In-situ-Einsatz.....	19
5.3	In-situ-Einsatz ausgewählter Verfahren in einer Testhaltung in der Stadt Köln	21
5.4	Entwurf der Gerätemodifizierung	22
6	Zusammenfassung und Ausblick	23

Konsortium Gläserner Kanal

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

1 Thema des Forschungsvorhabens

Quantitative Inspektion von Abwasserkanälen und –leitungen mittels geophysikalischer Verfahren.

2 Anschriften der Beteiligten



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

Ministerium für Umwelt, Raumordnung
Und Landwirtschaft des Landes Nord-
rhein-Westfalen
Schwannstraße 3
40476 Düsseldorf



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

vormals:
Stadt Köln
Amt für Stadtentwässerung
Willy-Brandt-Platz 2
50679 Köln



IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur
Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen

vormals:
Institut für Kanalisationstechnik
Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen



Deutsche Montan Technologie GmbH
Mines & More Division
Exploration & Geosurvey
Am Technologiepark 1
45307 Essen

vormals:
Deutsche Montan Technologie GmbH
Geschäftsbereich GeoTec
Exploration und Geo-Engineering
Am Technologiepark 1
45307 Essen



HOCHTIEF Construction AG
GS CEW Köln
Neusser Straße 155
50733 Köln

vormals:
HOCHTIEF Aktiengesellschaft
CIVIL
Kanal- und Kläranlagenbau
Vitalisstraße 100
50827 Köln

Konsortium Gläserner Kanal

3 Verzeichnis der während des Vorhabens erstellten Statusberichte

Die folgenden Statusberichte liegen dem vorliegenden Endbericht zu Grunde und sind als **Anhang** beigelegt:

- [1] Ergebnisse der Voruntersuchungen zum Aufbau einer begehbaren Versuchsstrecke zur Durchführung geophysikalischer Messungen.
- [2] Ergebnisse über die geophysikalischen Untersuchungen in einer Versuchsstrecke (begehbare Kanal) auf dem IKT-Gelände in Gelsenkirchen (29.11.2001)
- [3] Ergebnisbericht über die geophysikalischen Untersuchungen im Bereich der Olpener Straße / Ostmerheimer Straße (Köln) (04.11. 2002)
- [4] Vergleich der Ergebnisse der geophysikalischen Untersuchungen im Bereich der Olpener Straße / Ostmerheimer Straße (Köln) mit Direktaufschlüssen (30.07.2003)
- [5] Machbarkeitsstudie zur quantitativen Inspektion von Abwasserkanälen und –leitungen mittels geophysikalischer Verfahren, IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur 1999

4 Ausgangssituation und Zielstellung des Forschungsvorhabens

4.1 Einleitung und Ausgangssituation

Der Umfang, die Art und die Häufigkeit der Überwachung des baulichen und betrieblichen Zustandes und der Funktionsfähigkeit des Kanalisationsnetzes des Landes Nordrhein-Westfalen wird in der „Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen und Einleitungen von Abwasser aus Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem (Selbstüberwachungsverordnung Kanal – SüwVKan)“ vom 16. Januar 1995 festgelegt. Danach sind in einem Zeitraum von maximal 15 Jahren alle Kanäle des öffentlichen Netzes, jährlich aber mindestens 5 % des Kanalnetzes durch den Betreiber zu inspizieren. Diese Inspektion wird bei begehbaren Kanälen in der Regel von dafür ausgebildetem Personal als Kanalbegehung und im nichtbegehbaren Nennweitenbereich mittels ferngesteuerter Kamerawagen durchgeführt. Die Dokumentation richtet sich nach den Vorgaben der ATV Arbeitsblätter M 143 Teil 2 sowie M 149.

Die optische Inspektion führt zwangsläufig zu einer Begrenzung der Untersuchung des Kanals auf offene sichtbare Schäden. Die Ergebnisse der optischen Inspektion reichen nicht aus, um den Zustand der Kanäle umfassend zu beschreiben und befriedigende Aussagen über Schäden sowie Art und Umfang von Sanierungsmaßnahmen abzuleiten. Nur eine quantitative Feststellung des Ist-Zustandes ermöglicht eine technisch fundierte Sanierungsplanung. Hiervon betroffen sind beispielsweise Schäden wie nicht sichtbare Undichtigkeiten, der Zustand der Bettung sowie die Restwanddicke im Falle von Korrosionsschäden oder einem mechanischem Verschleiß. Dies betrifft insbesondere die Beurteilung der Tragfähigkeit des Altkanals im Falle von Reparatur- und Renovierungsverfahren und ihre statische Berücksichtigung gemäß ATV M 127.

Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von Fragestellungen, die die Erkundung der Beschaffenheit des Untergrundes betreffen und mit optischen Verfahren von der Oberfläche aus dem Schacht heraus oder durch diskrete Aufschlüsse nicht beantwortet werden können. Eine Umfrage bei ausgewählten Kom

Konsortium Gläserner Kanal

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

munen in Nordrhein-Westfalen ergab folgende Fragestellung, die zusammenfassend als *gläserne Straße* bezeichnet werden können:

- Geologischer Aufbau der Leitungszone,
- Schichtwasser,
- Grundwasserstände,
- Hindernisse (beim Rohrvortrieb),
- Im Boden belassene Verbauelemente,
- Ver- und Entsorgungsleitungen.

Das Forschungsvorhaben beschränkte sich in Anbetracht des Umfangs der genannten Problemfelder auf die Entwicklung und Prüfung neuer, zerstörungsfreier Verfahren zur Inspektion von Abwasserkanälen und -leitungen auf der Basis geophysikalischer Messtechniken. Ein besonderer Schwerpunkt des Vorhabens war die 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 in NRW ist es, eine Entscheidung für die Auswahl eines Sanierungsverfahrens auf einer gegenüber bisherigen Vorgehensweisen deutlich verbesserten Grundlage für die statische Vermessung bzw. Überprüfung treffen zu können. Hierdurch könnten Kanalsanierungen zukünftig erheblich wirtschaftlicher geplant und realisiert werden. Detaillierte Kenntnisse über zu sanierende Abwasserkanäle, insbesondere über deren Bettungssituation und die vorhandene Resttragfähigkeit, ermöglichen eine gezielte Sanierung. Von einer heute aufgrund fehlender Kenntnisse häufig erfolgenden Erneuerung – in der Regel in der offenen Bauweise – könnte in vielen Fällen abgesehen werden. Damit verbunden wäre sowohl die Aktivierung betriebswirtschaftlicher Einsparpotentiale auf Seiten des Betreibers als auch die Minimierung volkswirtschaftlicher Schäden durch z.B. die Behinderung des Straßenverkehrs und den Verbrauch von Ressourcen.

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurde der Stand der Technik im Bereich der geophysikalischen Untersuchung von Kanälen im Rahmen einer durch das Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft (MURL) des Landes Nordrhein-Westfalen beauftragten Machbarkeitsstudie [5] durch die Deutsche Montan Technologie GmbH, Geschäftsbereich GeoTec, - Exploration und Geo-Engineering -, Essen und das IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen dargestellt. Die Studie ergab, dass die Arbeiten auf dem Gebiet der Kanalinspektion im Hinblick auf die Erkundung des Kanals und der Bettung, d.h. die Erfassung des Zustandes des Kanalrohres und des Umfeldes, zum Zeitpunkt des Projektstarts keine überzeugenden und umfassenden Ergebnisse geliefert haben. Bei vielen Entwicklungen wurde der Schwerpunkt auf einen Roboter gelegt, der Messgeräte durch einen Kanal bewegt. Der Schwerpunkt der Publikationen beschäftigte sich mit der Theorie der Messverfahren und mit dem Aufbau der Messgeräte und der Kanalroboter. Konkrete Untersuchungen in Form von Messungen etc., die die Bettungssituation und den Zustand der Kanalrohre quantifizieren zeigten zum Zeitpunkt des Projektstarts kein befriedigendes Ergebnis.

Ein limitierender Ansatz bisheriger Forschungsvorhaben war die Beschränkung auf ein oder wenige geophysikalische Verfahren, die in der Regel sogenannte "Oberflächenverfahren" darstellen, d.h. zur Erkundung des Baugrundes von der Geländeoberfläche aus eingesetzt werden. Diese wurden für ihren Einsatz in einem Kanal ggf. modifiziert. Einzelne geophysikalische Verfahren müssen sich zwangsläufig

Konsortium Gläserner Kanal

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

fig auf die Erfassung bestimmter physikalischer Eigenschaften des Erkundungsobjektes (Rohrwan-
dung, Baugrund) beschränken, wie beispielsweise dessen natürliche Radioaktivität, elastische Eigen-
schaften oder elektrischen Widerstandes. Mit der Beschränkung auf eine bestimmte physikalische
Eigenschaft ist immer auch eine Beschränkung der möglichen Information über das Erkundungsobjekt
verbunden.

Daher ist es empfehlenswert, gerade bei komplexen und stark inhomogenen Bereichen mehrere Ver-
fahren zu kombinieren. Die gemeinsame Interpretation der Ergebnisse unterschiedlicher Messverfah-
ren, die verschiedene physikalische Eigenschaften des Untergrundes ansprechen, erhöht die Zuverläs-
sigkeit der Aussagen. Außerdem wird durch eine Kombination die Ableitung weiterer bodenphysikali-
scher Parameter ermöglicht, wie zum Beispiel die elastischen Parameter (E-Modul, Poisson-Zahl,
Scherm modul, Kompressionsmodul, etc.). Dies wurde bei den bisherigen Entwicklungen ebenfalls noch
nicht in Betracht gezogen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden auch sogenannte geophysikalische Bohrlochmessverfah-
ren und Methoden zur Untersuchung der Untergrundstrukturen entlang der Erdoberfläche, die ihren
Ursprung in der Erdölexploration mit der Erkundung einer mehr oder weniger großen Umgebung ei-
nes verrohrten Bohrloches besitzen, im Kanal getestet. Diese Verfahren im Hinblick auf Ihren Einsatz
zur quantitativen Inspektion von Abwasserkanälen und –leitungen zu bewerten und zu optimieren war
Gegenstand des vorliegenden Forschungsprojektes.

4.2 Vorgehensweise bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens

Die folgende Vorgehensweise zur Durchführung von geophysikalischen Erkundungen innerhalb von
begehbaren Kanälen diente als Grundlage der durchgeführten Forschungsarbeit:

- Adaption geophysikalischer Mess- und Verfahrenstechniken in Verbindung mit der Bohrlochgeo-
physik, die in der Explorationsgeophysik erfolgreich, kombiniert eingesetzt werden.
- Entwicklung einer geschlossenen für alle Kanalgrößen und –werkstoffe geeigneten Kanaluntersu-
chungsmethode auf der Basis bewährter geophysikalischer Messverfahren.
- Kalibrieren der Auswerteverfahren und der vorhandenen geophysikalischen Messtechnik im be-
gehbaren Betonkanal, die im begehbaren Kanal Geräte ohne Modifikation und Entwicklung teurer
Geräteträger eingebracht werden kann.
- Erstellung einer begehbare Versuchsstrecke aus Ortbeton-, Kanal- und Stahlbetonrohren. Einbau
verschiedener Bodenarten mit unterschiedlichen Verdichtungszuständen und definierten Anoma-
lieberegionen zur Kalibrierung der Messtechniken.
- In-situ-Versuche zum Test der in dem Versuchsstand erarbeiteten Messmethoden und Techniken
unter realen Bedingungen und zur abschließenden Bewertung der Verfahren.

5 Durchgeführtes Arbeitsprogramm und Ergebnisse

5.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen

Basierend auf den zum Startzeitpunkt des Forschungsprojektes weltweit durchgeführten Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Erkundung der Leitungszone mit geophysikalischen Verfahren grundsätzlich möglich ist, aber noch Entwicklungsbedarf bestand. Im ersten Schritt dieses Forschungsvorhabens wurde daher in einer Voruntersuchung, aufbauend auf den Stand von Wissenschaft und Technik, untersucht, welche geophysikalischen Messverfahren im einzelnen bei den Erkundungen zur Anwendung kommen konnten. Als ein Lösungsweg bot sich u.a. die Übertragung der sogenannten Bohrlochmessverfahren auf den Anwendungsbereich der Erkundung der Kanalbettung an. Die Eignung dieser Verfahren zum Einsatz in Kanälen wurde in Vorversuchen auf dem Gelände des Bergwerks Blumenthal-Haard in Oer-Erkenschwick getestet [1].

Nach Abschluss der Voruntersuchungen erfolgte eine erste Auswahl von Messverfahren zur intensiveren Betrachtung. Die Besonderheiten der ausgewählten Messverfahren wurden detailliert analysiert und in einer Stellungnahme beschrieben. Anschließend wurden die Untersuchungsziele des Forschungsvorhabens unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten der Geophysik und der notwendigen Vorgaben zur Erstellung eines Sanierungsplanes, insbesondere unter dem Gesichtspunkt einer statischen Berechnung der zu sanierenden Kanäle bzw. Leitungen quantifiziert. Die Festlegung aller Details des Versuchsprogrammes erfolgte auf der Grundlage der Erfahrungen der DMT auf dem Arbeitsgebiet der Geophysik und des IKT im Bereich der Sanierung von Abwasserkanälen.

Zusammenfassend wurden die folgenden Resultate bei den Voruntersuchungen in Oer-Erkenschwick erzielt:

- In einem nichtbegehbaren Kanal in Oer-Erkenschwick konnten Messungen mit den bohrlochgeophysikalischen Sonden Gamma-Gamma-Log (Dichte-Log), Induction-Log (elektromagnetisches Verfahren) sowie mit Ultraschallsonden (seismisches Verfahren) durchgeführt werden.
- Die eingesetzten geophysikalischen Methoden sind grundsätzlich in der Lage Informationen über den Kanal selbst und über den Untergrund in seiner Umgebung zu liefern.
- Die bohrlochgeophysikalischen Messsysteme konnten im geringen Maße Informationen über den Untergrund außerhalb des dünnwandigen, nichtbegehbaren Kanals liefern. Inwieweit bohrlochgeophysikalische Messsysteme auch für begehbare, dickwandige Kanäle einsetzbar sind, muss in der geplanten Testhaltung geprüft werden.
- Geeignet für die Messungen in der geplanten Testhaltung sind elektromagnetische und seismische Verfahren. Mit welchen Messgeräten und Frequenzen welche Reichweiten erzielt werden können soll in der geplanten Testhaltung erkundet werden.
- Bohrlochgeophysikalische Messsysteme allein können die angestrebten Ziele des Forschungsvorhabens nicht erreichen. Die Bohrlochmesssysteme oder Systeme zur Erkundung des Untergrundes von der Erdoberfläche aus, müssen für den Einsatz im begehbaren Kanal modifiziert werden. Die einzelnen Verfahren sollen zunächst gezielt auf ihre Einsatzmöglichkeiten in dem geplanten, be

Konsortium Gläserner Kanal

gehbaren Testkanal getestet werden, um anschließend die Messgeräte und Auswertetechniken an die für geophysikalische Erkundungen neuartige Umgebung anzupassen.

5.2 Versuche im Maßstab 1:1

Die Versuche im Maßstab 1:1 waren die eigentlichen Hauptuntersuchungen des Forschungsprojektes [2]. Sie dienten dazu, die Leistungsfähigkeit der in den Voruntersuchungen ausgewählten Verfahren nachzuweisen und diese für typische in-situ zu erwartende Verhältnisse eines Kanalisationsnetzes zu optimieren und zu kalibrieren. Dies war nur möglich, indem die Verfahren unter definierten, bekannten Randbedingungen eingesetzt wurden. Diese Randbedingungen wurden, in Anlehnung an die Verhältnisse verlegter Abwasserkanalisationen wie folgt definiert:

a) Geometrische Randbedingungen

- Rohrwanddicke und gegebenenfalls Wanddickenverlauf über den Rohrumfang
- Innere und äußere Rohrquerschnittsform
- Rohrdurchmesser
- Tiefenlage

b) Werkstoffeigenschaften und Aufbau der Kanalwandung

- Rohrwerkstoff
- Festigkeiten
- Dichte
- Bewehrung und deren Lage bei Stahlbetonrohren
- Schäden, wie Risse, Korrosion, Karbonatisierung

c) Geotechnische Randbedingungen (in der Leitungszone)

- Bodenart, Lagerungsdichten, elastische Eigenschaften, Bodenparameter in der
 - unteren Bettungsschicht
 - oberen Bettungsschicht
 - Seitenverfüllung
 - Abdeckung
 - Hauptverfüllung

d) Geotechnische Randbedingungen (bezüglich des Straßenaufbaus)

- Aufbau des Straßenunterbaus
- Verdichtung des Unterbaus
- Aufbau des Straßenoberbaus

e) Hydrogeologische Randbedingungen

- Porenwassergehalt
- Grundwasserstand

f) Spannungszustand

g) Auflockerungen oder Hohlräume in der Leitungszone verursacht durch Undichtigkeiten und daraus resultierend z.B. ein Eindringen von Grundwasser (Infiltration) und Bodenmaterial in die Leitungen

h) Anschlussleitungen

i) Anomaliebereiche in der Leitungszone

- Wasserleitung

Konsortium Gläserner Kanal

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

- Strom- bzw. Telekommunikationskabel
- Wurzelwerk
- Hohlräume
- Findlinge
- Verbaureste bspw. Kanaldielen

j) Weitere Anomaliebereiche

- Bodendenkmäler
- Tiefgewölbe

Zu diesem Zweck wurde auf dem Gelände des IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur in Gelsenkirchen eine Versuchsstrecke hergestellt, in der eine Haltung eines Abwasserkanals nachgebildet wurde. Hierbei wurden charakteristische Varianten der unter a-j genannten Randbedingungen simuliert. Da einige der vorliegenden geophysikalischen Verfahrenstechniken nur in begehbaren Leitungen einsetzbar waren und um die Bandbreite möglicher zu untersuchender Randbedingungen sinnvoll zu begrenzen, beschränkte sich das Forschungsvorhaben in diesem Schritt auf die Betrachtung begehbare Abwasserkanäle aus Mauerwerk, Beton und Stahlbeton. Die Abbildung 1 und die Abbildung 2 zeigen typische Anomalien im Kanal und im Boden, wie sie in der Teststrecke eingebaut wurden [2].

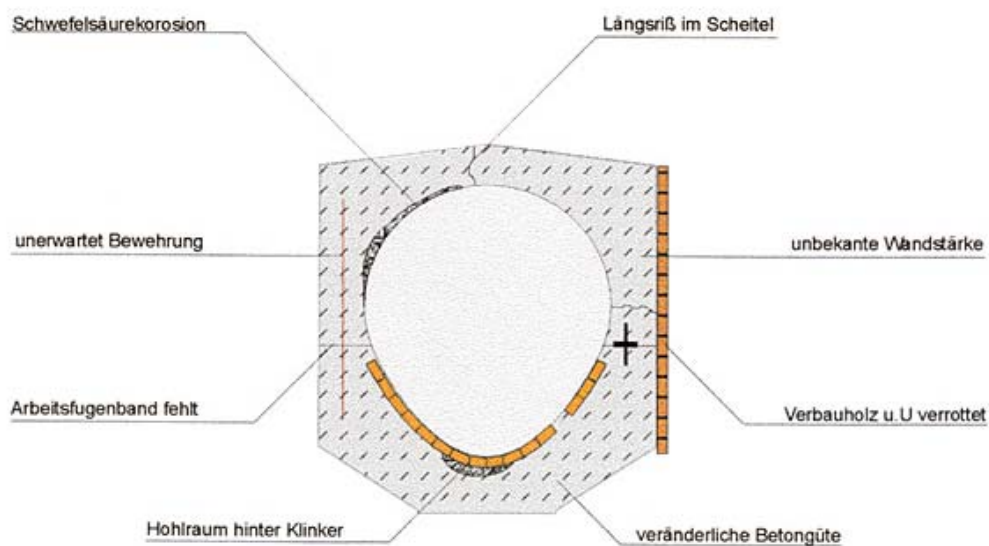


Abbildung 1: Typische Schadensbilder am Ortbetonkanal

Konsortium Gläserner Kanal

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

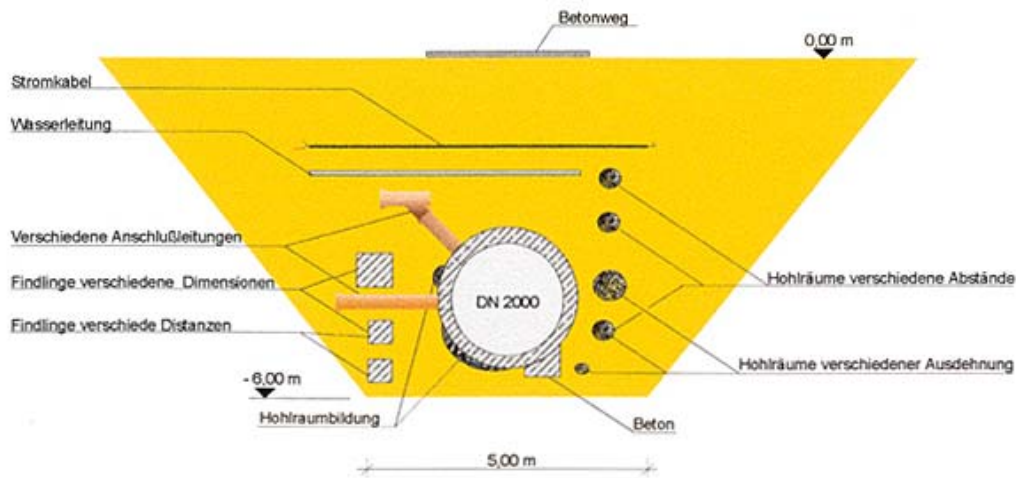


Abbildung 2: Anomalien im Boden

Die Rohrwerkstoffe Beton und Stahlbeton für den Kanal wurden hier unter dem Gesichtspunkt ausgewählt, dass durch die Vielzahl der Variationsmöglichkeiten im Bezug auf z.B. die Betonfestigkeit, eine ungleichförmige Rohrwanddicke oder Grad und Lage der Bewehrung die höchsten Anforderungen an die eingesetzten Detektionsverfahren gestellt wurden. Eine Übertragung der erzielten Messergebnisse auf andere, im Vergleich zu Beton und Stahlbeton homogenere Rohrwerkstoffe wie z.B. Steinzeug soll danach durch eine entsprechende Kalibrierung der Sensorik erreicht werden.

Im Rahmen der Versuche in der auf dem Gelände des IKT hergestellten Versuchsstrecke wurden eine Vielzahl unterschiedlicher Sensoren und Messverfahren sowie Verfahrenskombinationen angewendet (siehe [2]). Nach Abschluss der Untersuchungen konnten die Verfahren oder Verfahrenskombinationen bestimmt werden, mit denen unter den gegebenen Voraussetzungen die aussagekräftigsten Ergebnisse erzielt wurden. Eine Miniaturisierung der Sensorik aus den geophysikalischen Messsystemen, die an der Erdoberfläche verwendet werden, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes an die Umgebung eines begehbaren Kanals vorgenommen. Eine Weiterentwicklung der Methoden auf nichtbegehbare Abwasserkanäle ist generell möglich, konnte aber, aufgrund der Komplexität der Verfahren, im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes nur theoretisch betrachtet werden.

5.2.1 Aufbau der Versuchsstrecke auf dem Gelände des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur

Die Versuchsstrecke besteht aus einem ca. 40 m langen Kanal aus Stahlbeton- und Stahlbetonvortriebsrohren DN 2200 und Ortbeton-Eiprofil DN 2000/1800 mit und ohne geklinkerter Kanalsohle sowie Mauerwerk. Dabei wurden die Kanalgeometrie und Werkstoffeigenschaften variiert. Als Zugang zum Kanal wurden ein Start- und ein Endschacht unter Berücksichtigung der Geometrie der Messinstrumente errichtet. Der Kanal wurde mit 6 m Tiefenlage in einer geböschten Baugrube verlegt. Die Baugrube wurde teilweise mit Spritzbeton wasserdicht ausgekleidet, um eine Wanne für die Simulation veränderlicher Grundwasserstände herzustellen. Der Kanal hat eine Überdeckung von ca. 2,5 m. Die Erkundungstiefe von bis zu 6 m entspricht der üblichen Tiefenlage von Kanälen. Außerdem

Konsortium Gläserner Kanal

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

sichert die Überdeckung den Kanal gegen den Auftrieb, der durch die Grundwassersimulation auf den Kanal wirkt.



Abbildung 3: Bau der Versuchsstrecke

Im Bereich der Leitungszone wurden verschiedene Anomaliebereiche wie Wasserleitungen, Stromkabel, Wurzelwerk, Hohlräume, Findlinge, Anschlussleitungen, Verbaureste eingebaut. Die Lage der Störungsszonen wurde eingemessen und in Bestandsplänen [2] verzeichnet. In der Leitungszone wurden verschiedene Bodenarten mit unterschiedlichen Kies-, Sand- und Schluffanteilen mit verschiedenen Verdichtungsgraden sowie anthropogene Auffüllungen eingebaut. Der Einbau des Versuchsbodens erfolgte lagenweise. Der Versuchsaufbau wurde nach ersten Messungen modifiziert. Die Lagerungsdichte wurde für jede Schicht messtechnisch erfasst und die Ergebnisse der Sondierungen in die Pläne eingetragen. Weiterhin wurden die unterschiedlichen Betonsorten an Probewürfeln und der Stahlbeton der Rohre an Bohrkernen untersucht.



Abbildung 4: Herstellung der Kanalumgebung

5.2.2 Geplante Arbeitsschritte zur Durchführung der geophysikalischen Testmessungen in der Versuchsstrecke

Zu Beginn der geophysikalischen Testmessungen wurden wesentliche Arbeitsschritte für die geophysikalischen Untersuchungen definiert. Im folgenden werden die zu Beginn des Projektes geplanten Arbeitsschritte sowie deren Ziele genannt:

1. Arbeitsschritt: Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen

Die Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen sollte im unteren, wassergefüllten Teil des Kanals zunächst mit Hilfe des Sonic-Logs durchgeführt werden. Über das Medium Wasser ist eine gute Ankopplung der akustischen Signale gewährleistet. Die Messsonden können daher kontinuierlich gezogen werden und dabei in schneller Folge Messungen durchführen. Im nichtwassergefüllten Teil der Versuchsstrecke sollten die seismischen Geschwindigkeiten durch Direktkontakt der Messsonden zum Beton bestimmt werden. Mit Hilfe der Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen sollten Parameter zur Bestimmung der Betonqualität ermittelt und zusätzliche Informationen über Risse im Beton gewonnen werden. Die Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen ist weiterhin notwendig, um aus der Reflexionsmessung (Arbeitsschritt 2) die Wanddicke zu bestimmen.

Die folgenden Untersuchungen zur Ankopplung der Signalenergie an das Kanalrohr (unterschiedliche Füllstände) und zur Eindringtiefe der Signale in Abhängigkeit von den physikalischen Eigenschaften des vermessenen Bereiches waren geplant:

- a) Untersuchungen zur Richtungsauflösung des Messsystems.
- b) Testmessungen mit vorhandenen Messsystemen in verschiedenen Kanalrohren, um den Einfluss des Kanalrohres auf das Messsignal zu ermitteln.
- c) Anpassung der Messsysteme und Messverfahren aufgrund der in den Schritten 1 - 4 gewonnenen Erkenntnisse (Änderung der Messgeometrie, Frequenzen, Messfenster, etc.).
- d) Messungen in Kanälen mit unterschiedlichen Betonqualitäten und unterschiedlichen Schäden.
- e) Messungen in Kanälen, die in unterschiedlichen Böden unter unterschiedlichen Bedingungen eingebaut sind.
- f) Entwicklung von Auswerteverfahren zur Ableitung der Bauwerksparameter (Risse, Korrosionen, Betonfestigkeit) aus den Messdaten.

2. Arbeitsschritt: Messung der Reflexion akustischer Wellen vom Kanalrohr und von den umliegenden Böden

Bei der Messung im **wassergefüllten Teil** sollten die Reflexionen von der Innenseite und Aussenseite des Kanalbauwerkes gemessen werden. Aus den Laufzeiten der akustischen Signale kann man im Idealfall einen Materialabtrag an der Innen- und Außenseite des Rohres und daraus die Restwandstärke bestimmen. Aus den Amplituden der Reflexionen an der Außenseite und evtl. späteren Reflexionen lassen sich dann angrenzende Hohlräume erkennen sowie die Lagerungsdichte der Bettung ableiten.

Konsortium Gläserner Kanal

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

Im **nicht wassergefüllten Teil** des Kanals ist eine schnelle, kontinuierliche Messung schwierig, da insbesondere die akustischen Empfänger direkt an die Kanalwand angekoppelt sein müssen. In Voruntersuchungen wurden daher Kopplungsverfahren, die eine kontinuierliche Messung erlauben, auf ihre Eignung hin überprüft und bewertet.

- a) Untersuchungen zur Ankopplung der Signalenergie an das System Kanalrohr / Boden (unterschiedliche Füllstände) und zur Eindringtiefe der Signale.
- b) Untersuchungen zum Einfluss wechselnder Grundwasserstände auf die Signalankopplung und die Eindringtiefe.
- c) Untersuchungen zur Richtungsauflösung des Messsystems.
- d) Testmessungen mit vorhandenen Messsystemen in verschiedenen Kanalrohren, um den Einfluss des Kanalrohres auf das Messsignal zu ermitteln.
- e) Testmessungen in Kanälen mit Ablagerungen am Kanalboden.
- f) Anpassung der Messsysteme und Messverfahren aufgrund der in den Schritten a - e gewonnenen Erkenntnisse (Änderung der Messgeometrie, Frequenzen, Messfenster, etc.).
- g) Messungen in Kanälen mit unterschiedlichen Betonqualitäten und unterschiedlichen Schäden.
- h) Entwicklung von Verfahren zur Ableitung der Bauwerksparameter (Risse, Korrosionen, Betonfestigkeit) aus den Messdaten.
- i) Messungen in Kanälen, die in unterschiedlichen Böden unter unterschiedlichen Bedingungen eingebaut sind.
- j) Entwicklung von Kalibrierungsverfahren durch Vergleich der Messdaten mit den im Versuchstand direkt gemessenen Boden- und Kanalrohrparameter.

3. Arbeitsschritt: Messung der Gesteinsdichte

Die Dichtemessung sollte in Verbindung mit der Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen (Arbeitsschritt 1) zur Bestimmung der Betonqualität verwendet werden. Die Messung kann im wassergefüllten und im nicht wassergefüllten Bereich durchgeführt werden. Es ist vorteilhaft einen direkten Kontakt der Messsensoren zur Kanalwand zu ermöglichen, damit das gemessene Signal ausschließlich aus dem Kanalrohr und dem umliegenden Material herrührt.

- a) Testmessungen mit vorhandenen Messsystemen in verschiedenen Kanalrohren, um den Einfluss des Kanalrohres auf das Messsignal zu ermitteln.
- b) Testmessungen in Kanälen mit unterschiedlichen Füllständen.
- c) Testmessungen in Kanälen mit Ablagerungen am Kanalboden.
- d) Testmessungen in Kanälen mit unterschiedlichen Betonqualitäten und unterschiedlichen Schäden.
- e) Entwicklung von Kalibrierungsverfahren durch Vergleich der Messdaten mit den im Versuchstand direkt gemessenen Boden- und Kanalrohrparameter.

4. Arbeitsschritt: Messung des Magnetfeldes

- a) Testmessungen mit vorhandenen Messsystemen in verschiedenen Kanalrohren, um den Einfluss des Kanalrohres (Eisengehalt) auf das Messsignal zu ermitteln.
- b) Testmessungen in Kanälen mit unterschiedlichen Betonqualitäten und unterschiedlichen Schäden.

Konsortium Gläserner Kanal

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

- c) Testmessungen in Kanälen, die in unterschiedlichen Böden mit unterschiedlichen Bedingungen eingebaut (Findlinge, elektrische Leitungen, etc.) sind.
- d) Untersuchung des Einflusses magnetischer Objekte (Dimension, Abstand) in der Kanalbettung auf die Messdaten sowie Trennung ihres Anteils von dem Anteil des eisenhaltigen Kanalrohrs in dem Messsignal.

5. Arbeitsschritt: Messung der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen (Radar)

- a) Untersuchungen zur Ankopplung der Signalenergie an das System Kanalrohr / Boden und zur Eindringtiefe der Signale.
- b) Untersuchungen zum Einfluss wechselnder Grundwasserstände auf die Signalankopplung und die Eindringtiefe.
- c) Untersuchungen zur Richtungsauflösung des Messsystems.
- d) Testmessungen mit vorhandenen Messsystemen in verschiedenen Kanalrohren, um den Einfluss des Kanalrohres auf das Messsignal zu ermitteln.
- e) Testmessungen in Kanälen mit unterschiedlichen Füllständen.
- f) Testmessungen in Kanälen mit Ablagerungen am Kanalboden.
- g) Anpassung der Messsysteme und Messverfahren aufgrund der in den Schritten a - f gewonnenen Erkenntnisse (Änderung der Messgeometrie, Frequenzen, Messfenster, Integrationsintervalle, etc.).
- h) Testmessungen in Kanälen mit unterschiedlichen Betonqualitäten und unterschiedlichen Schäden.
- i) Testmessungen in Kanälen, die in unterschiedlichen Böden unter unterschiedlichen Bedingungen eingebaut sind.
- j) Entwicklung von Verfahren zur Ableitung der Bauwerksparameter (Risse, Korrosionen, Betonfestigkeit) aus den Messdaten.
- k) Entwicklung von Kalibrierungsverfahren durch Vergleich der Messdaten mit den in der Versuchsstrecke direkt gemessenen Bodenparametern.

6. Arbeitsschritt: Messung der Leitfähigkeit mit dem Induktionsverfahren

Induktionsverfahren haben den Vorteil, dass berührungslos gemessen werden kann. In Kombination mit den anderen Verfahren gibt die Leitfähigkeit Information zur Betonqualität, zur Exfiltration (Kontaminationsfahnen), zur Lithologie und zur Lagerungsdichte.

- a) Untersuchungen zum Einfluss wechselnder Grundwasserstände auf die Signalankopplung und die Eindringtiefe.
- b) Testmessungen mit vorhandenen Messsystemen in verschiedenen Kanalrohren, um den Einfluss des Kanalrohres auf das Messsignal zu ermitteln.
- c) Testmessungen in Kanälen mit unterschiedlichen Füllständen.
- d) Testmessungen in Kanälen mit Ablagerungen am Kanalboden.
- e) Messungen in Kanälen mit unterschiedlichen Betonqualitäten und unterschiedlichen Schäden.
- f) Messungen in Kanälen, die in unterschiedlichen Böden unter unterschiedlichen Bedingungen eingebaut sind.
- g) Entwicklung von Kalibrierungsverfahren durch Vergleich der Messdaten mit den in der Versuchsstrecke direkt gemessenen Bodenparametern. In Kombination mit Magnetfeldmessungen sollen An

Konsortium Gläserner Kanal

omalien mit höherer elektrischer Leitfähigkeit auf ihre magnetische Suszeptibilität untersucht werden, um lithologische von anthropogenen Effekten (elektrische Leitungen) zu unterscheiden.

7. Arbeitsschritt: Messung an der Erdoberfläche

Um weitere Aussagen zu den Lagerungsverhältnissen und Bodeneigenschaften auch oberhalb der Kanäle zu erhalten, sollten alle sinnvoll erscheinenden geophysikalischen Verfahren auch an der Erdoberfläche eingesetzt werden. Hierzu zählen die seismischen Verfahren, das Bodenradar, die Geoelektrik, die Elektromagnetik, die Mikrogravimetrie und die Magnetik. Ferner sollten auch tomographische Ansätze untersucht werden, d.h. eine Durchstrahlung von der Erdoberfläche in den Kanal hinein.

5.2.3 Durchführung und Ergebnisse der geophysikalischen Messungen in der Versuchsstrecke

Die Durchführung und die Ergebnisse der geophysikalischen Messungen in der Versuchsstrecke sind ausführlich im Statusbericht [2] dokumentiert. Aufgrund der Erfahrungen, die direkt während der einzelnen Arbeitsschritte aus Kapitel 5.2.2 gewonnen wurden, mussten die entsprechenden Arbeitsschritte modifiziert oder sogar komplett neu formuliert werden. So wurden beispielsweise Verfahren, wie z.B. die Magnetik und der Einsatz von bohrlochgeophysikalischen Messinstrumenten durch andere Verfahren wie das Impact-Echo und die Thermographie ergänzt/ersetzt. Weiterhin zeigten sich insbesondere die bohrlochgeophysikalischen Messmethoden als sehr begrenzt einsetzbar, da lediglich geringe Erkundungsreichweiten mit diesen Verfahren erzielt wurden. 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. In der IKT-Versuchsstrecke wurden Erfahrungen mit Beton, Mauerwerk, Bewehrung, etc. gesammelt.

Die Anpassung der bohrlochgeophysikalischen Messinstrumente (Entwicklung von starken Ultraschallsonden, die es erlauben bestimmte Frequenzbereiche verstärkt anzusteuern) zeigte sich bei den Tests als nicht zielführend, so dass, insbesondere zur Erkundung des Kanalumfeldes, verstärkt auf den Einsatz von seismischen Messverfahren mit direkter Ankopplung der Geophone an die Kanalwand zurückgegriffen wurde. Zur Beschreibung des Bauwerks selbst konzentrierten sich die Arbeiten auf das Radarverfahren und das Impactecho.

Damit wurden erstmals seismische Messgeräte und Verfahren aus dem Explorationsbereich und dem Erkundungsbereich an der Erdoberfläche im Kanal angewendet. Durch den Einsatz der Seismik unter Verwendung von vielen Geophonen wurde es möglich, entlang von Profilen Veränderungen in der Kanalwand und außerhalb zu erfassen. Normalerweise werden die Geophone mit einem Dorn in den Erdboden gesteckt. In der Versuchsstrecke 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 selbst ist eine Hochgeschwindigkeitszone, woran sich radial der umgebende Boden mit niedrigeren Geschwindigkeiten anschließt. Durch den Kanal selbst 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. Dieser Wellentyp ist von der Erdoberfläche

Konsortium Gläserner Kanal

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

her bekannt und es gibt seit einiger Zeit Ansätze für die Auswertung derartiger Oberflächenwellen in Tunneln. Diese Wellen breiten sich entlang der Tunnelinnenfläche aus und besitzen lediglich eine Eindringtiefe von etwa einer Wellenlänge in die Tunnel-/Kanalumgebung. 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. Aufgrund der hochauflösenden Anwendung im Kanal war es notwendig, die Digitalisierungsrate der seismischen Messapparatur zu erhöhen.

Ultraschallmessungen zeigten, dass sich die Ankopplung von Ultraschallprüfköpfen mit Direktkontakt an die Wand des Kanals mit Hilfe von Kopplungsmitteln als sehr aufwendig darstellte. Daher wurde das Ultraschallverfahren im mit Wasser geflutete Kanal erneut eingesetzt, da über das Wasser eine optimale Kopplung des Senders und Empfängers an den Beton gegeben ist.

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 neuentwickelte 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. Zur Steuerung und Digitalisierung der neuartigen Sonden wurde die Digitalisierungsrate des seismischen Systems „Summit“ von 32 kHz auf 128 kHz erhöht.

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 wurden.

5.2.4 Erstellung einer Erfahrungsmatrix aus den geophysikalischen Messungen in der Versuchsstrecke

Da die verschiedenen geophysikalischen Messverfahren immer nur bestimmte Messgrößen erfassen und die Eindringtiefe von den lokalen Bodenverhältnissen abhängt, ist ihre jeweilige Aussagefähigkeit beschränkt auf die Informationen, die man aus der Änderung dieser Messgröße in dem erfassten Messvolumen erschließen kann. Mehrdeutigkeiten und Störeinflüsse verringern die Zuverlässigkeit der Aussagen. Deshalb war es erforderlich, gerade im Bereich komplexer und stark inhomogener Messzonen mehrere Verfahren zu kombinieren und die Ergebnisse gemeinsam zu interpretieren und zu einer Gesamtaussage zu verdichten [2].

Die Ergebnisse der geophysikalischen Messungen in der Versuchsstrecke wurden daher dahingehend aufbereitet, dass eine Matrix erstellt wurde, aus der das angewendete Messverfahren [2], der jeweils betrachtete Untersuchungsparameter und die erzielte Aussagegenauigkeit abzugreifen ist. Sinnvolle Kombinationen verschiedener Messverfahren konnten so gefunden werden. Weiterhin wurden die Möglichkeiten und der Aufwand zur Optimierung der Messverfahren erläutert.

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

Konsortium Gläserner Kanal

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

Hierbei wurden neben verschiedenen Varianten der Seismik, das Radar, Bohrlochgeophysik (Sonic- (20 kHz), Induction-Log, Ultraschallmessungen (40 kHz) im Kanal und an Betonproben, Impactecho, 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 und auf der anderen Seite die erfolgreich getesteten und kalibrierten Verfahren beinhaltet (s. Tabelle 3 [2]). Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass das Radar, die Seismik und das Ultraschall-/Impactecho die meisten der vorgegebenen Untersuchungsziele erfüllten und ihr Einsatz bei den In-situ Messungen daher weiterverfolgt wurden. Insbesondere zeigte die seismische Tomographie eine gute Übereinstimmungen mit den realen Bodenverhältnissen zwischen Kanal und Erdoberfläche.

Aufgrund der gewonnenen Erfahrungen mit Messdaten von wesentlich höherem Informationsgehalt musste der Arbeitsschwerpunkt von der Durchführung der Messungen in den Bereich der Auswertung verschoben werden.

Neben zielführenden Ergebnissen gab es aber auch folgende Punkte, die zu Beginn des Projektes anders eingeschätzt wurden:

- Wenn die Messverfahren eine Anomalie erfassen, so ist 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 wurde. 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 Kanalwerkstoffen 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 in dem Maße beeinflussen, dass keine durchgehende Profildarstellungen erzielt werden können, um Anomaliebereiche besser aufzulösen, d.h. die Effekte der Rohrverbindungen können teilweise stärker sein als die der gesuchten Anomaliebereiche.

Konsortium Gläserner Kanal

Trotz dieser Erkenntnisse lässt sich der Kanal und die Umgebung erfolgreich erkunden, d.h. nahezu alle Zielobjekte der Versuchsstrecke konnten geortet und beschrieben werden.

5.2.5 Vorbereitung für den In-situ-Einsatz

Nach Abschluss der Messungen unter definierten Bedingungen in der Versuchsstrecke im IKT erfolgte die Auswahl geeigneter Messverfahren für einen Piloteinsatz in-situ auf der Grundlage der Ergebnisse der Versuche. Da das Radar, die Seismik und das Ultraschall-/Impactecho die meisten der vorgegebenen Untersuchungsziele erfüllten, wurde ihr Einsatz bei den in-situ Messungen weiterverfolgt. Insbesondere zeigte die seismische Tomographie gute Übereinstimmungen der Messergebnisse mit den realen Bettungsverhältnissen zwischen Kanal und Erdoberfläche. Bei den Messungen entlang der Erdoberfläche sollte das Verfahren der Analyse der Oberflächenwellen Anomalien des oberflächennahen Untergrundes zusätzlich erkunden. Diese Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen wurden für ihren Einsatz in einer Kanalatmosphäre und unter den Bedingungen des laufenden Kanalbetriebs modifiziert. Hierzu gehörten:

- Geräteumbauten zur Ermöglichung einer Einbringung über Einsteigschächte.
- Erstellung von Trägersystemen zur zentrischen Führung bestimmter Messsysteme in unterschiedlichen Kanalquerschnitten.
- Schutzeinrichtungen / Abdichtungen für einen Einsatz im Abwasser in voll eingestauten oder teildurchströmten Abwasserkanälen.
- Entwicklung von Kopplungs- und Andrucktechniken für die Verfahren Seismik und Radar.
- Entkopplung der Einzelgeophone der seismischen Messeinrichtung zur Unterdrückung möglicher systemgeführter Wellentypen.

Die **Abbildung 5** zeigt ein auf Grundlage der Voruntersuchungen in der Versuchsstrecke entwickeltes Trägersystem, das für den anstehenden In-situ-Versuch aufgebaut wurde. Das Trägersystem erlaubt es sowohl seismische Messungen als auch Messungen mit Radar in unterschiedlichen Frequenzbereichen durchzuführen. Es besteht aus den folgenden Einzelkomponenten:

- Fahrbarer Untersatz zur kontinuierlichen Bewegung der jeweiligen Messapparatur
- Wegrad zur Kontrolle der aktuellen Position im Kanal
- Tragevorrichtung zum Transport von Digitalisierungseinheiten und Mess-PC
- Schwenkbare und mechanisch ausfahrbare Sensorenarme zur Befestigung und Andruck von Geophonen und Radarantennen an die Kanalwand
- Einzelaufhängungen der Geophone, die durch Federsysteme von einander entkoppelt sind.

Mit Hilfe des Trägersystems sollte eine schnelle kontinuierliche Messung in unterschiedlichen Ebenen des Kanals ermöglicht werden. Das System wurde derart konstruiert, dass es möglich ist, mit 2 Personen die unterschiedlichen geophysikalischen Messsysteme bei Trockenwetterabfluss innerhalb eines Abwasserkanal zu bewegen. Weiterhin können die entsprechenden Personen kontinuierlich die Mess

Konsortium Gläserner Kanal

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

daten aufzeichnen und über den Mess-PC kontrollieren. Die Auswertung der Messdaten erfolgt im Anschluss an die Messungen im Datenbearbeitungszentrum der DMT.



Abbildung 5: Trägersystem zur Durchführung von geophysikalischen Messungen innerhalb eines begehbaren Kanals

Die Anpassung der unterschiedlichen geophysikalischen Messgeräte an das Trägersystem erfolgte in der Form, dass durch die speziellen Umgebungsbedingungen in einem Abwasserkanal keine Störung der Messung oder Beeinflussung der Messergebnisse erfolgen kann. Dabei wurden folgende Punkte berücksichtigt:

- Geräte für Messungen aus dem Kanalinneren sind den Angriffen des Abwassers ausgesetzt und tauchen ggf. in das Wasser ein.
- Im Gasraum herrscht ein feuchtes Milieu und im Abwasser befinden sich feste Schwimmstoffe.
- Im Kanal herrscht Explosionsgefahr. Die Messgeräte sind entsprechend zu schützen oder die Messumgebung ist entsprechend abzusichern.
- Die Geräte müssen über die Einsteigschächte in den Kanal einzubringen sein.
- Eine Fernsteuerung der auf einem Geräteträger montierten Geräte von einem oberirdischen Bedienstand aus soll langfristig möglich sein.
- Der Kanalbetrieb soll nicht gestört werden. Ein Trockenwetterabfluss (Teilfüllung des Kanals) findet immer statt.
- Die oberirdischen Abläufe sollen nicht gestört werden und können umgekehrt die Durchführung von Messungen erschweren.
- Erschütterungen dürfen keine Gefahr für andere Bauwerke oder Leib und Leben hervorrufen.

5.3 In-situ-Einsatz ausgewählter Verfahren in einer Testhaltung in der Stadt Köln

Gegenstand dieses Bearbeitungsschrittes war ein Piloteinsatz der getesteten und optimierten „Verfahrensprototypen“ zur Validierung der Versuchsergebnisse und dem Nachweis der Tauglichkeit der Verfahren unter Betriebsbedingungen eines Kanalisationsnetzes. Damit dieser Piloteinsatz durchgeführt und die Ergebnisse verifiziert werden konnten waren folgende vorbereitende Leistungen erforderlich:

- Organisation einer Versuchsstrecke
- Verkehrssicherung
- Baustelleneinrichtung (Büro und sanitäre Einrichtung)
- Beleuchtung und Bewetterung des Kanals
- Reinigung des Kanals
- Optische Inspektion mit Zustandserfassung
- Betonprüfung zur Kalibrierung der Messgeräte
- Künzelpföben und Aufgrabungen zur Überprüfung der Messergebnisse der geophysikalischen Messverfahren (Nachweis der Eignung der Messverfahren)

Im Bereich der Olpener Strasse / Ostmerheimer Strasse in Köln wurde eine Versuchsstrecke gefunden, die es erlaubte, die Verfahren, die in der IKT-Versuchsstrecke getestet wurden, einzusetzen [3]. Aufgabe war es, an 2 Sammlern geophysikalische Untersuchungen (Seismik, Impact-Echo und Radar) innerhalb eines Kanals und entlang der Erdoberfläche des jeweiligen Kanals durchzuführen. Dabei wurden die folgenden Arbeiten durchgeführt:

a) Olpener Straße (Nordseite); **Sammler Brück-Rath:**

Im Bereich des Sammlers Brück-Rath wurden auf einem etwa 30 m langen Kanalabschnitt Anomalien innerhalb des Bauwerks selbst und außerhalb des Kanals erkundet [3]. Die Ergebnisse wurden durch Aufschlüsse und Künzelpföben überprüft und verifiziert [4].

b) Südliche Einmündung der Ostmerheimer Straße; **Ostmerheimer Sammler:**

Im Bereich des Ostmerheimer Sammlers wurde ein etwa 10 m langer Kanalabschnitt sowie insbesondere der Einsteigbereich erkundet [3]. Im Anschluss an die Messungen wurde im Sohlbereich eine Micro-Tunneling Baumaßnahme mit geringfügiger Unterföhrung erfolgreich abgeschlossen.

Auf der Grundlage der erhaltenen Messergebnisse wurde eine Klassifizierung des Kanalbauwerkes, der Bettung und der Leitungszone vorgenommen [3]. Diese Klassifizierung wurde punktuell durch Probenahmen überprüft [4], damit eine abschließende Bewertung der Kanalerkundung und ihrer Einsetzbarkeit in der Praxis durchgeführt werden kann.

Im Rahmen der Auswertungen der Messwerte konnte eine Vielzahl von Anomalien im Untergrund qualitativ und teilweise auch quantitativ erkannt werden. Dabei wurde unterschieden zwischen Anomalien, die sich außerhalb des Kanals befinden (Ergebnisse aller seismischen Messungen) und Anomalien innerhalb der Bauwerke oder erkannte Eigenschaften des jeweiligen Bauwerkes (Ergebnisse der Radarmessungen und der seismischen Messungen innerhalb des Kanals). Anomalien, die sich außerhalb des Kanalbauwerkes befinden, wurden übersichtlich in Plänen und Tabellen dargestellt [3]. Insgesamt konnten alle Anomalien als relativ „schwach“ bezeichnet werden, so dass für die nähere

Konsortium Gläserner Kanal

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

Kanalumgebung keine starke Beeinflussung der geplanten Umbauarbeiten durch mögliche Hohlräume, große Findlinge oder alte Verbaue in den erkundeten Bereichen erwartet wurde.

Diese Aussage wird grundsätzlich durch die Ergebnisse der Direktaufschlüsse aus dem Bereich der erkundeten Anomalien bestätigt [4]. Eine Vielzahl von Anomalien außerhalb des Kanals konnten im wesentlichen durch Änderungen der Bodenbeschaffenheit wie Auflockerungen, Lehmlinsen, Materialänderungen oder Baumwurzeln erklärt werden. Ebenfalls gute Übereinstimmungen zeigten Künzelproben im Vergleich zu den seismischen Messungen, bei denen eine geringere Schlagzahl niedrigere und eine größere Schlagzahl erhöhten seismischen Geschwindigkeiten zugeordnet werden konnten. Die Ergebnisse der Messungen, die lediglich entlang von 2 Messlinien innerhalb des Sammlers Brück-Rath durchgeführt wurden lassen die Schlussfolgerung zu, dass bei einer Vielzahl von Messlinien (etwa alle 45 Grad) das Umfeld des Kanals hinreichend nach Anomalien erkundet werden kann. Eigenschaften wie Betondicke und Bewehrungsgehalt des Bauwerkes „Kanal“ konnten durch die Ergebnisse der Radar-Messungen und des Impactechos abgeschätzt werden [4].

5.4 Entwurf der Gerätemodifizierung

Für eine routinemäßige Kanalerkundung wurde anhand der gewonnenen Erfahrungen bei der Durchführung der geophysikalischen Messungen eine Anpassung der Messgeräte auf Kanalbetriebsbedingungen erarbeitet.

Die Abbildung 6 zeigt den Kanalmesswagen, konstruiert auf Grundlage der in der Testhaltung in Köln gewonnenen Erfahrungen, zur Durchführung routinemäßiger Kanalerkundungen. Änderungen zu dem in der IKT-Versuchsstrecke eingesetzten Trägersystems der Abbildung 5 sind:

- Verbesserte Beweglichkeit des Andrucksystems durch Elemente, die in alle Richtungen schwenkbar sind.
- Das Verkippen des Komplettsystems wird durch zusätzliche Stabilisierungselemente verhindert.
- Der Andruck erfolgt hydraulisch, nicht mehr mechanisch über Stellschrauben, so dass eine gleichmäßige Andruckkraft für alle Elemente und ein kontinuierlicher Messfortschritt erzielt wird.
- Keine Erhöhung des Gesamtgewichtes durch zusätzliche Bauelemente, da bei dem Neubau bewusst auf leichte Materialien zurückgegriffen wurde.
- Verbesserte Kabelführung zwischen Sensoren und Registriersystem.
- Verbesserte Entkopplung der Einzelgeophone durch verändertes Federsystem.

Konsortium Gläserner Kanal

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

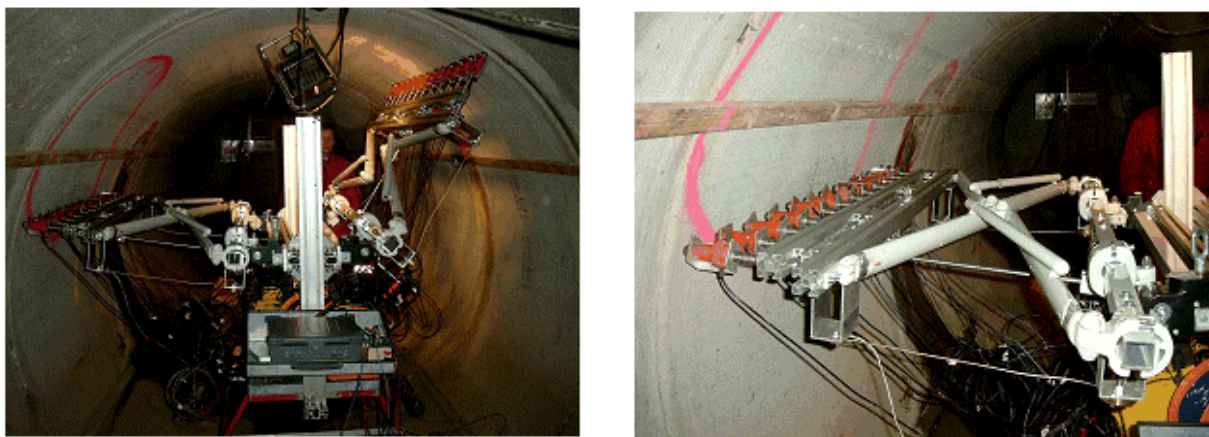


Abbildung 6 Prototyp des Kanalmesswagens, konstruiert auf Grundlage der in der Testhaltung in Köln gewonnenen Erfahrungen, zur Durchführung routinemäßiger Kanalerkundungen

Nach den ersten Erfahrungen, die bei den Testmessungen in Köln gewonnen wurden, konnte ein Messsystem entwickelt werden, das für routinemäßige Messungen in begehbaren Kanälen einsatzbereit ist. Das Messsystem inklusive der neuentwickelten seismischen Auswertetechniken ermöglicht eine kontinuierliche und schnelle Inspektion eines begehbaren Kanals und liefert, zusätzlich zur optischen Inspektion, wesentliche Informationen über das Bauwerk Kanal selbst und seine nähere Umgebung. Die entwickelten Messtechniken und Verfahren können generell auch miniaturisiert in nichtbegehbaren Kanälen eingesetzt werden. Dies erfordert jedoch insbesondere eine zusätzliche Miniaturisierung der seismischen Digitalisierungseinheiten sowie der Radar- und Impact-Echo Registriersysteme.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die verbreitete Technik bei der Inspektion von Abwasserkanälen und –leitungen sind optische Verfahren, d.h. eine Kamerabefahrung im nichtbegehbaren Bereich bzw. eine Inaugenscheinnahme im begehbaren Bereich. In Kombination mit punktuellen Untersuchungen wie der Entnahme von Bohrkernen, Aufschlüssen oder Sondierungen liefern diese Verfahren heute die Grundlagen für bedeutende Sanierungs- und Investitionsentscheidungen der kommunalen und privaten Netzbetreiber.

Optische Verfahren sind allerdings nicht in der Lage in oder hinter die Kanalwand zu „sehen“. Die punktuellen Untersuchungen sind ebenfalls ungeeignet, um insbesondere den Verdichtungsgrad in der Leitungszone, Hohlräume, Risse oder Abplatzungen an der Rohraußenseite kontinuierlich festzustellen. Ein frühzeitiges Erkennen gerade dieser, die Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit des Rohrboden-Systems entscheidend beeinflussenden Randbedingungen, kann den Netzbetreiber vor kostspieligen Fehlentscheidungen bei der Wahl des Sanierungszeitpunktes oder –verfahrens bewahren.

Konsortium Gläserner Kanal

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

Das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen nahm den o.a. Sachverhalt zum Anlass, ein durch die Stadtentwässerungsbetriebe Köln AöR beantragtes Forschungsvorhaben zu unterstützen. Das Konsortium „Gläserner Kanal“, bestehend aus der HOCHTIEF Construction AG, Köln, der Deutschen Montan Technologie GmbH, Mines & More Division, Essen und dem IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, hat sich dabei die Weiterentwicklung bzw. Adaption von geophysikalischen Verfahren zur Inspektion von Abwasserkanälen und –leitungen zum Ziel gesetzt. Die optischen Verfahren zur Inspektion von Abwasserkanälen und –leitungen sollen zukünftig nicht ersetzt, sondern durch zeitgemäße geophysikalische Methoden ergänzt werden.

Zum Test einer quantitativen Inspektion von Abwasserkanälen und -leitungen mittels geophysikalischer Verfahren wurde auf dem Gelände des IKT in Gelsenkirchen ein 40 m langer begehbarer unterirdischer Kanal errichtet. Diese als Versuchsstrecke dienende Haltung besteht aus Abwasserrohren und Vortriebsrohren aus Stahlbeton der Nennweite DN 2200 sowie einem Ortbeton- bzw. Mauerwerkskanal mit Eiprofil der Nennweite 2000/1800. Das Bauwerk wurde mit gezielt eingestellten Eigenschaften, wie definierten Betonqualitäten und Wandstärken, verschiedenen Fugen- und Dichtungsbändern, Kiesnestern und anderen Betonschäden errichtet.

Die Begehbarkeit der Versuchsstrecke war Voraussetzung für den Einsatz der verwendeten Messsensoren. Für die Untersuchung sollte ausschließlich Messtechnik eingesetzt werden, die nicht neu entwickelt sondern aus anderen, bekannten Bereichen der geophysikalischen Erkundung adaptiert wurde. Diese Messtechnik ist überwiegend von Hand zu bedienen oder weist Abmessungen auf, die in einem nichtbegehbaren Kanal derzeit noch nicht einsetzbar sind. Eine Miniaturisierung der Messtechnik oder Automatisierung der Messverfahren ist erst nach einem erfolgreichen Einsatz der Technik sinnvoll.

Für die eingesetzten geophysikalischen Messverfahren stellt die Inhomogenität des Baustoffs Beton durch die Zusammensetzung von Zementmatrix und dem Korngerüst des Zuschlags, sowie der Stahlbeton durch die eingelegte Bewehrung eine besondere Herausforderung dar. Eine erfolgreiche Übertragung der Messergebnisse auf homogene Baustoffe wie Steinzeug oder Kunststoff ist in jedem Fall möglich.

In den Bodenbereichen, die den Kanal umgeben, sind verschiedenste Bodenarten mit Zonen unterschiedlicher Verdichtung sowie Anomalien wie z.B. Findlingen, Hohlräumen, Verbaulementen eingebaut. Auf der 40 m langen Versuchsstrecke konnten alle Randbedingungen eines in offener Bauweise erstellten Kanals abgebildet werden.

Die wirkungsvolle Kombination von akustischen und elektromagnetischen Messverfahren, wie sie in der Werkstoffprüfung und in der geophysikalischen Erkundung des Untergrundes bereits seit langem Stand der Technik sind, sollen eine exakte Beurteilung von Schäden am Kanal und in der Leitungszone ermöglichen. Dazu werden zunächst die Einflüsse unterschiedlicher Kanalumgebungen auf die Messergebnisse bestimmt und Auswerteverfahren entwickelt, die zukünftig quantitative Aussagen über Wanddicke, Werkstoffeigenschaften und die Bettungssituation von Abwasserkanälen gestatten.

Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen anregendem Signal und Antwortverhalten des Messobjektes sind die Methodik der Messkampagne und die Anordnung der Messapparatur von großer Bedeutung für die Aussagekraft und Zuverlässigkeit geophysikalischer Messungen. Dabei ist die genaue Kalibrierung der Messgeräte anhand bekannter Anomalien von besonderer Bedeutung. Da

Konsortium Gläserner Kanal

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

innerhalb der Versuchsstrecke der Aufbau der Leitungszone, die Lage und Ausdehnung von Anomalien sowie die Werkstoffparameter der eingebauten Rohre genau bekannt sind, können die dort gewonnenen Messergebnisse als Referenzwerte für spätere In-situ-Untersuchungen genutzt werden.

Im Rahmen der Untersuchung wurden im Inneren des Kanals verschiedene Verfahrensvarianten aus Seismik, Radar und Bohrlochgeophysik, Ultraschall- und Impactechomessungen sowie die Verfahren Gravimetrie, Elektromagnetik und Thermographie eingesetzt. Darüber hinaus kamen von der Erdoberfläche die Verfahren Seismik, Geoelektrik und Tomographie zur Anwendung. Anhand der bekannten Struktur des Rohr-Boden-Systems im Versuchsstand konnten die Verfahren auf ihre Eignung zur Beschreibung der Kanalgeometrie, der Werkstoffeigenschaften und der Bettungssituation gezielt getestet werden.

Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen bei der nicht optischen Inspektion von Abwasserkanälen und -leitungen kann festgestellt werden, dass die Verfahren zur Erkundung hinter der Kanalinnenwand mittels geophysikalischer Methoden auch unter Betriebsbedingungen einsetzbar sind. Die geophysikalisch georteten Strukturen lassen sich sowohl qualitativ bewerten, so z.B. als Vergleich der Härte oder Leitfähigkeit verschiedener Objekte als auch quantitativ durch Laufzeitmessungen und geometrische Eingrenzung. Die Erfahrungen weiterer Messungen werden zur Optimierung der Instrumentierung und der anschließenden Datenverarbeitung und Interpretation der Ergebnisse beitragen.

Die zahlreichen Messungen in der Versuchsstrecke auf dem Gelände des IKT haben gezeigt, dass es mit vertretbarem Aufwand möglich ist, Strukturen innerhalb und außerhalb des Kanals zu erkennen. Fast alle auf der Versuchsstrecke untersuchten Anomalien wurden mit mindestens einem Verfahren entdeckt. Lediglich Kanthölzer in ca. 1m Entfernung zur Außenwand und ein künstlich erzeugter Riss in der Rohraußenwand konnten nicht identifiziert werden. Deshalb erlaubt die Kombination der Verfahren jetzt schon prinzipiell die Aussage darüber, wo sicher keine wesentlichen Anomalien zu erwarten sind. Allerdings ist bislang noch ein hoher Messaufwand notwendig, um die komplette nähere Umgebung des Kanals in alle Richtungen zu beschreiben

Nach Abschluss der geophysikalischen Untersuchungen in der Versuchsstrecke auf dem Gelände des IKT in Gelsenkirchen konnte festgestellt werden, dass Radar, Seismik und Ultraschall / Impactecho die vorgegebenen Untersuchungsziele am effektivsten erfüllten und daher für den In-situ Einsatz weiterverfolgt und -entwickelt wurden.

Für diesen ersten In-situ Einsatz wurden der Sammler Brück-Rath sowie der Sammler Ostmerheim im Kanalnetz der Stadtentwässerungsbetriebe Köln AöR ausgewählt. Die Umgebung des Kanalbauwerks wurde mit Hilfe der Seismik und Radarmessungen aus dem Kanal heraus untersucht. Mit der seismischen Tomographie wurde zusätzlich der Baugrund zwischen der Erdoberfläche und dem Kanal überprüft. Das Kanalbauwerk selbst wurde mit Hilfe von Impact-Echo Messungen und Radaruntersuchungen untersucht.

Die Überprüfung der gewonnenen Messdaten erfolgte durch Freilegen der untersuchten Kanalabschnitte. Bei den in-situ georteten Strukturen handelt es sich ausschließlich um „schwache“ Anomalien z.B. Zonen aus bindigem Bodenmaterial oder Wurzelwerk. Diese bilden sich, im Vergleich zu den Messungen in der IKT-Versuchsstrecke nur „schwach“ ab. Dennoch konnte nach der Aufgrabung festgestellt werden, dass alle in den Untersuchungsebenen vorhandenen Anomalien erkannt wurden.

Konsortium Gläserner Kanal

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

Nach dem Abschluss der Untersuchungen und der Auswertung der Messungen kann die Inspektion von Abwasserkanälen und –leitungen mittels geophysikalischer Verfahren als Methode angesehen werden, die sowohl die wirtschaftlichen Risiken hinsichtlich der Investitionsentscheidung für und wider einer Sanierung oder Erneuerung selbst als auch die mit der Durchführung des Vorhabens verbundenen Baugrund- und Baubestandrisiken deutlich reduzieren kann.

Dabei muss der Einsatz der geophysikalischen Verfahren nicht der standardisierte Schadensaufnahme, z.B. vergleichbar einer Inspektion entsprechend ATD/DVWK M 143, sondern vielmehr als Mittel zur Klärung offener Fragestellungen im Vorfeld von Bau- oder Sanierungsarbeiten dienen. Die erfolgreiche Anwendung der Verfahren ist sowohl von der Erfahrung des Geophysikers als auch von der des begleitenden Ingenieurs abhängig. Das für die Untersuchung von Kanälen spezifische Know-how der Anwender ist maßgeblich für die erfolgreiche Gewinnung und Interpretation der Daten.

Art und Umfang der Messungen und damit auch die Kosten sind wesentlich von projektspezifischen Zielvorstellungen abhängig. Neben diesem Aspekt beeinflussen darüber hinaus auch die örtlichen Randbedingungen die zu erwartenden Kosten. Alle Aufwendungen für eine vorhergehende Untersuchung sind dem potentiellen Schaden etwa wegen einer Beschädigung einer kreuzenden Leitung bei einer Erneuerung oder dem statischen Versagen des alten Kanals nach Einzug eines Inliners bei einer Sanierung gegenüber zu stellen.

Die Weiterentwicklung der Technik und die Miniaturisierung und Automatisierung der Sensorik werden auch einen zukünftigen Einsatz in nichtbegehbaren Kanälen ermöglichen.