

neutral
unabhängig
gemeinnützig



IKT – Institut
für Unterirdische Infrastruktur

Endbericht

Kanal- und Baugrunderkundung im nicht begehbaren Bereich

- Voruntersuchungen -



Redmann, A.
Gelsenkirchen, 2007

Endbericht zum Forschungsprojekt: „*Geophysikalische Verfahren zur Kanal- und Baugrund-
erkundung im nicht begehbaren Bereich: Miniaturisierung und Erprobung der Gerätetechnik*“,
Phase I: Machbarkeitsstudie

Forschungsprojekt
gefördert durch:



Ministerium für Umwelt und Naturschutz,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz
des Landes NRW

Bearbeiter:



IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur
Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen

Wissenschaftliche Leitung:

Dr.-Ing. Bert Bosseler

Projektleitung und Bearbeitung:

Dipl.-Ing. Andreas Redmann

Inhalt

1	Veranlassung	5
2	Zielstellung und Vorgehensweise	6
3	Problemstellung	7
3.1	Rechtlicher Hintergrund.....	7
3.2	Schadensbeispiele.....	10
3.3	Schadensursachen.....	13
3.3.1	Alter der Kanalisation	13
3.3.2	Bauverfahren und Materialien.....	15
3.3.3	Einwirkende Beanspruchungen.....	16
3.4	Bisherige IKT - Forschungsarbeiten	20
4	Anforderungsprofil an die Zustandserfassung	29
4.1.1	Rohre	30
4.1.2	Rohr-Boden System	33
4.1.3	Boden	37
5	Stand der Technik der Zustandserfassung	39
5.1	Zielstellung.....	39
5.2	Verfahren zur Untersuchung des Rohres	40
5.2.1	Optische Verfahren	40
5.2.2	Lasermessverfahren.....	46
5.2.3	Mechanische Verfahren.....	50
5.2.3.1	Deformations- und Kalibermessung.....	50
5.2.3.2	Lagevermessung.....	51
5.2.4	Physikalische Verfahren.....	52
5.2.4.1	Ultraschallmessung	52
5.2.4.2	Sonarmessung.....	57
5.2.4.3	Goelektrische Messung	57
5.2.5	Opto-hydraulisches Verfahren	58
5.2.6	Multisensorsysteme.....	59
5.2.6.1	KURT.....	59
5.2.6.2	PIRAT	60
5.2.6.3	MAKRO	60
5.2.6.4	Responder.....	61
5.2.6.5	Inspektionssystem für den „Abwasserkanal Emscher“	62
5.3	Verfahren zur Untersuchung des Rohr-Boden-Systems	64
5.3.1	Optische Verfahren	64
5.3.2	Mechanische Verfahren.....	65
5.3.3	Akustische Verfahren.....	68
5.3.4	Physikalische Verfahren.....	70
5.3.4.1	Elektromagnetische Messung (Radar)	70
5.3.4.2	Radiometrische Messung	73
5.3.5	Multisensorsysteme.....	76
5.3.5.1	KARO.....	76
5.3.5.2	SAM	77
5.4	Verfahren zur Untersuchung des Bodenkörpers	79
5.4.1	Mechanische Verfahren.....	79
5.4.2	Physikalische Verfahren.....	79
5.4.2.1	Seismische Messung	79
5.4.2.1.1	Reflexions- und Refraktionsseismik	79
5.4.2.1.2	Seismische Tomographie	81

5.4.2.2	Geoelektrische Messung	86
5.4.2.3	Elektromagnetische Messung (Radar)	88
5.4.2.4	Radiometrie	93
5.5	Arbeitsroboter und Trägersysteme	95
6	Schlussfolgerungen und Perspektiven	98
7	Zusammenfassung.....	101
8	Literatur	104

1 Veranlassung

Die Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen [1] bzw. der Runderlass „Anforderungen an den Betrieb und die Unterhaltung von Kanalisationsnetzen“ [2] fordern die planmäßige, regelmäßige und systematische Erfassung des baulichen und betrieblichen Zustandes der Kanalisation. Die Inspektion von Abwasserkanälen wird nach heutigem Stand der Inspektionstechnik in der Regel mit optischen Verfahren im Rahmen der vorgeschriebenen Überwachung durchgeführt. Dabei kommen üblicherweise auf Fahrwagen montierte TV-Kameras zum Einsatz. Durch diese optische Kontrolle sollen der bauliche Zustand des Kanals ermittelt, die erfassten Schäden bewertet und eine Einordnung der Haltung in eine entsprechende Schadensklasse ermöglicht werden. Je nach Schadensklasse ist damit eine mehr oder weniger kurzfristige Sanierung verbunden. Die Inspektionsergebnisse sind somit Entscheidungsgrundlage für die Sanierungsplanung und gegebenenfalls weitreichende Investitionsentscheidungen der kommunalen Netzbetreiber.

Die optische Inspektion liefert aber zum Teil nur sehr unzureichende Informationen über die inspizierte Haltung. Mit Hilfe optischer Verfahren ist der Inspekteur nur in der Lage, die unmittelbare Kanalinnenoberfläche in Augenschein zu nehmen oder qualitative Informationen zur Rohrgeometrie zu gewinnen. Eine Begutachtung der Bereiche hinter oder in der Kanalwand sowie dem darüber liegenden Bodenkörper und dem Straßenoberbau sind mit den optischen Inspektionsverfahren allein nicht möglich. Somit bleiben wesentliche Beeinträchtigungen in und hinter der Kanalwand, wie z.B. Hohlräume und unzureichende Verdichtungen (Lagerungsdefekte) in der Leitungszone, sowie Schäden an der Außenwand unerkannt. Dies kann zum Teil zu erheblichen Fehleinschätzungen hinsichtlich des baulichen Zustands und des aktuellen Sanierungsbedarfs führen.

Um den Betreiberpflichtungen, d.h. insbesondere der hinreichenden Kanalzustandsbewertung, auf Dauer zuverlässig nachkommen zu können, sind Informationen über Schadensbilder, die die statische Tragfähigkeit, die Dichtigkeit und die hydraulische Leistungsfähigkeit des Rohr-Boden-Systems bzw. „*Ingenieurbauwerkes Leitungsgraben*“ beeinträchtigen, unverzichtbar. Das Untersuchungsobjekt sind dabei nicht allein die Rohrrinnenkontur bzw. Rohrgeometrie, sondern darüber hinaus auch die auf das Rohr wirkenden Beanspruchungen sowie die zeit- und lastabhängigen Materialeigenschaften des Rohrwerkstoffs. Der Beginn eventuell auftretender Schäden ist dabei frühzeitig zu erfassen.

Eine Möglichkeit der Kanalinspektion, die die entscheidenden Nachteile der optischen Inspektion ausgleicht, ist die Kanal- und Baugrunderkundung mit Hilfe geophysikalischer Verfahren. Diese geophysikalischen Verfahren, wie z.B. Seismik oder Georadar erlauben die Begutachtung der Kanalsubstanz sowie der anschließenden Bodenbereiche durch Messungen aus dem Kanal oder von der Geländeoberfläche. Im Rahmen des abgeschlossenen Forschungsvorhabens „*Quantitative Inspektion von Abwasserkanälen und -leitungen mittels geophysikalischer Verfahren*“ [3] konnten bereits mehrere Messverfahren identifiziert werden, die eine zuverlässige Erkundung des Kanals und des umgebenden Bodenkörpers ermöglichen. Die erzielten Ergebnisse geben Anlass zu der Annahme, dass in Zukunft vermehrt geophysikalische Verfahren zur Kanal- und Baugrunderkundung eingesetzt werden. Insbesondere im Bereich der Sanierungsplanung und –vorbereitung eröffnet dies ein neues und umfassendes Einsatzgebiet. Häufig erfordert die Auswahl eines wirtschaftlichen Verfahrens zur Sanierung von Abwasserkanälen und –leitungen weitgehende Informationen zum Zustand des Rohr-Boden-Systems, die allein eine optische Inspektion oder punktuelle Sondierungen nicht liefern können. Geophysikalische Messverfahren stellen hier eine sinnvolle Ergänzung dar. Ein frühzeitiges Erkennen z.B. von Lagerungsdefekten und Hohlräumen, die die Funktionsfähigkeit des gesamten Rohr-Boden-Systems entscheidend beeinflussen, kann den Netzbetreiber vor kostspieligen Fehlentscheidungen bei der Wahl des Sanierungszeitpunktes oder –verfahrens bewahren [4].

2 Zielstellung und Vorgehensweise

Kanäle müssen standsicher, funktionsfähig und dicht sein. Die hydraulische Funktionsfähigkeit und die Dichtheit einer Kanalhaltung lassen sich meist schon aus der optischen Inneninspektion bewerten. Auch eine weitergehende Dichtheitsprüfung kann allein durch Befüllen des Rohrrinneren mit einem Prüfmedium erfolgen. Demgegenüber lassen sich zuverlässige Aussagen zur Standsicherheit nicht allein aus dem Rohrzustand ableiten, denn diese hängt wesentlich vom umgebenen Erdreich und den Bettungsbedingungen der Leitung ab. Grundsätzlich ist der Leitungsgaben einschließlich vertikalem Abschluss durch die Fahrbahn und dem Hohlraumausbau durch das Rohr statisch als Gesamtbauwerk zu betrachten. Der Erkundung dieses Gesamtsystems, d.h. des Kanals und des Baugrunds, kommt insbesondere dann eine große Bedeutung zu, wenn die Standsicherheit z.B. aufgrund von Rohrschäden, Setzungen oder Bodeneinbrüchen an der Oberfläche schon anzuzweifeln ist. Zahlreiche Messverfahren wurden mit Blick auf diese Fragestellung entwickelt und auch schon in praktischen Anwendungsfällen eingesetzt.

Der überwiegende Teil der Kanalnetze besteht dabei aus Rohren kleinerer, nicht begehbaren Nennweite. Ziel der vorliegenden Studie ist es daher, einen Überblick über den gegenwärtigen Stand der Technik der Kanal- und Baugrunderfassung zu geben und die in der Forschung entwickelten sowie am Markt angebotenen Produkte mit Blick auf das besondere Anforderungsprofil in kleinen Nennweiten zu bewerten. Das Handling und die Bedienbarkeit der Messgeräte stehen dabei im Vordergrund.

Um dieses Ziel zu erreichen, werden zunächst beispielhaft Kanalschäden und deren Ursachen dargestellt und ein Anforderungsprofil für die ganzheitliche Zustandserfassung von Kanal und Baugrund abgeleitet. Im Rahmen einer Marktrecherche werden Verfahren, Methoden und Technologien zur Durchführung von Messungen und anderen Arbeiten in Kanälen kleiner Nennweite erhoben und erprobte Systemkomponenten hinsichtlich einer möglichen Miniaturisierung der Sensorik bzw. Anpassung auf den vorliegenden Anwendungsfall bewertet. Der Auswahl geeigneter Trägersysteme kommt dabei eine übergreifende Bedeutung zu. Abschließend werden die wesentlichen Schlussfolgerungen für die Praxis sowie der weitere Untersuchungsbedarf herausgestellt.

3 Problemstellung

3.1 Rechtlicher Hintergrund

Die Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen (SüwVKan) [1] ist in eine Vielzahl übergeordneter Gesetze für den Bereich der Abwasserentsorgung eingebunden. Den gesetzlichen Rahmen bilden dabei sowohl die Vorgaben der Landesgesetzgebung (LWG), der Bundesgesetzgebung (WHG) [5] sowie übergreifende Vorgaben des europäischen Rechts (vgl. Abbildung 1). Letztere werden z.B. auf Landesebene durch die vom MUNLV am 30.09.1997 erlassene Kommunalabwässerverordnung (KomAbwV) [6] umgesetzt.

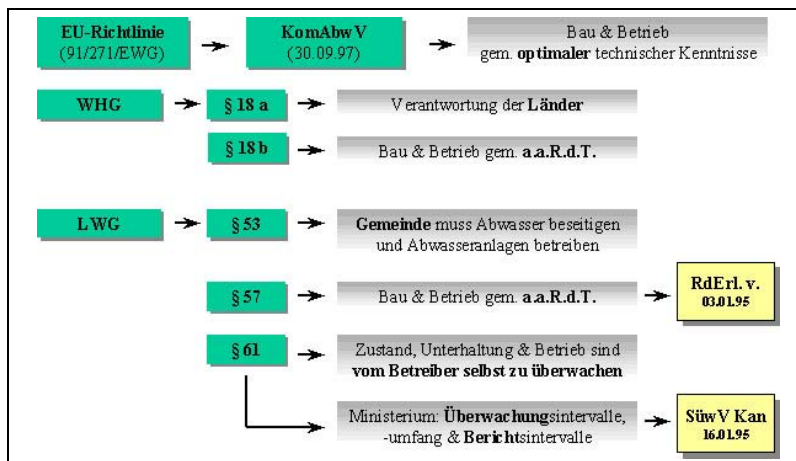


Abbildung 1: Gesetzlicher Rahmen für die SüwVKan [1] und den RdErl. v. 03.01.1995 [2], nach [7]

Angefangen beim übergeordneten, europäischen Recht, fordert bereits die **EU-Richtlinie 91/271/EWG** in Anhang I (Anforderungen an kommunale Abwässer), Abschnitt A (Kanalisation) u.a., „... bei Entwurf, Bau und Unterhaltung der Kanalisation ... die optimalen technischen Kenntnisse zugrunde zu legen“. Am anderen Ende der daran anschließenden langen Kette nachgeordneter Gesetze steht die SüwVKan [1], welche in Kombination mit dem ministeriellen Runderlass „Anforderungen an den Betrieb und die Unterhaltung von Kanalisationsnetzen“ vom 03.01.1995 [2], unmittelbar die betriebliche Umsetzung der „optimalen technischen Kenntnisse“ vorgibt.

Rechtsgrundlage für die 1996 in Kraft getretene SüwVKan ist u.a. **§61** des **LWG**, nach dem der Betreiber einer genehmigungspflichtigen Abwasseranlage unter Abs. (1) dazu verpflichtet ist, „... ihren Zustand, ihre Unterhaltung und ihren Betrieb selbst zu überwachen und hierüber Aufzeichnungen zu fertigen“.

Nach §61, Abs. (2) LWG wird das Umweltministerium zudem dazu ermächtigt, dem Betreiber „die Art und den Umfang der zu ermittelnden Betriebskennndaten und die Häufigkeit ihrer Ermittlung“ vorzugeben sowie „Art und Umfang der Aufzeichnungen“ zu definieren.

In Ergänzung dazu wird in **§57** des **LWG**, vergleichbar den Anforderungen des europäischen Rechts, auf den Bau und Betrieb von Abwasseranlagen gemäß der „jeweils in Betracht kommenden Regeln der Technik“ und deren „Bekanntgabe im Ministerialblatt“ verwiesen. Diesbezüglich wurde am 03.01.1995 der ministerielle Runderlass zu „Anforderungen an den Betrieb und die Unterhaltung von Kanalisationsnetzen“ [2] veröffentlicht, der einen ähnlichen Status einnimmt, wie die SüwVKan [1] (vgl. Abbildung 2).

Abhängig vom Ergebnis der Überwachung nach SüwVKan werden im Runderlass betriebliche Maßnahmen vorgegeben, durch welche der Betreiber die Funktionsfähigkeit der Abwasseranlagen sicher zu stellen hat.

In § 57 des LWG wird zudem der unmittelbare Bezug zum übergeordneten WHG [5] deutlich. Dort wird auf **§18 b WHG** [5] verwiesen, in dem bereits auf Bundesebene „... für Errichtung und Betrieb von Abwasseranlagen die allgemein anerkannten Regeln der Technik“ als Maßstab vorgegeben werden.

Die **Verantwortlichkeit für den Betrieb** und die Unterhaltung von Abwasseranlagen wird angefangen beim WHG [5], welches in §18a auf die Zuständigkeit der Länder verweist, über §53 LWG an den Abwasserbeseitigungspflichtigen übertragen. Die Abwasserbeseitigungspflichtige muss demnach „... das auf ihrem Gebiet anfallende Abwasser beseitigen und die dazu notwendigen Anlagen (Abwasseranlagen) ... betreiben“.

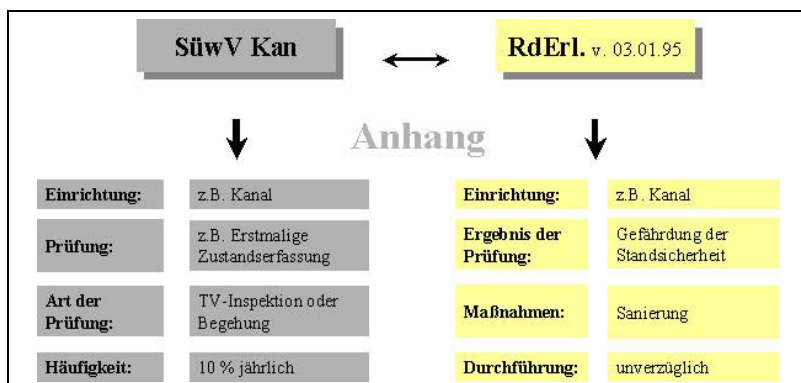


Abbildung 2: Beispiel für den Aufbau der Inhalte von SÜwVKan [1] und RdErl. v. 03.01.1995 [2], nach [7]

Die rechtliche Notwendigkeit der Zustandserfassung und -bewertung von Entwässerungssystemen im Rahmen der Instandhaltung ergibt sich aus der Verkehrssicherungspflicht nach dem Bürgerlichen Gesetzbuch (BGB) und der allgemeinen Sorgfaltspflicht des Betreibers des Entwässerungssystems, wie sie im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) [5], insbesondere in den §§ 1a und 18b sowie in den Landeswassergesetzen festgelegt ist. Zum Betrieb gehört auch die Zustandserfassung. Damit ist die grundsätzliche Rechtspflicht zur Zustandserfassung unmittelbar aus dem Wasserhaushaltsgesetz ableitbar [8].

Neben den gesetzlichen Rahmenbedingungen wird der Betrieb von Abwasserkanälen und -leitungen in einer Vielzahl von Normen und Vorschriften geregelt. Zu nennen sind hier die nationale und europäische Normung, die Arbeits- und Merkblätter der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) oder Unfallverhütungsvorschriften (UVV) der Berufsgenossenschaften.

Bei der nachstehenden Betrachtung von Kanalschäden werden nicht allein die bei der „klassischen“ Kanalinspektion sichtbaren Schadensbilder betrachtet, sondern vielmehr das „Ingenieurbauwerk Leitungsraben“, bestehend aus den Elementen Bettung, Seitenverfüllung, Abdeckzone, Hauptverfüllung und anstehender Boden sowie dem Kanalrohr selbst (vgl. Abbildung 3). Abwasserkanäle werden, insbesondere im innerstädtischen Bereich in einer Tiefenlage von ca. 3,0 m verlegt (vgl. Abbildung 4). Ebenfalls Teil der Betrachtung ist der Straßenaufbau, der den sichtbaren Abschluss des Rohrgrabens bildet.

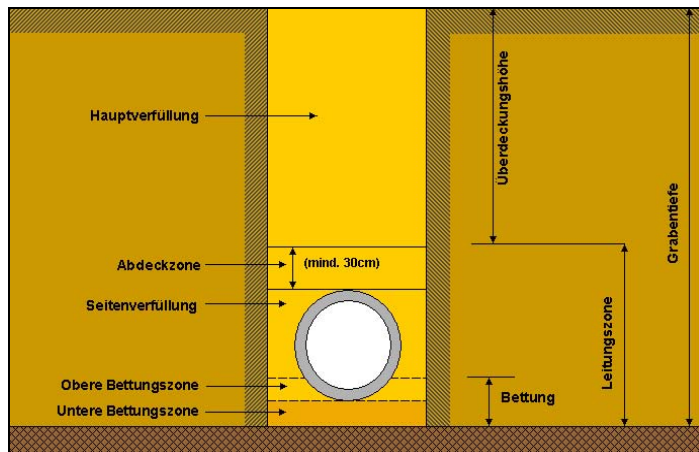


Abbildung 3: Leitungsgraben in Anlehnung an DIN EN 1610, nach [9]

Rohrleitungen sind technische Konstruktionen, bei denen das Tragsystem Rohr/Boden, durch das Zusammenwirken von Bauteilen, Einbettung und Verfüllung die Grundlage für Stand- und Betriebssicherheit ist. Die zugelieferten Teile, wie Rohre, Formstücke und Dichtmittel, zusammen mit der vor Ort zu erbringenden Leistung, wie Bettung, Herstellung der Rohrverbindung, Seiten- und Hauptverfüllung, sind wichtige Faktoren, damit die bestimmungsgemäße Funktion des Bauwerks sichergestellt wird. Vor Beginn der Bauausführung muss die Tragfähigkeit einer Rohrleitung in Übereinstimmung mit DIN EN 752-3 [10] und DIN EN 1295-1 [11] nachgewiesen werden [9]. Das Zutreffen der Lastannahmen ist während der Ausführung durch die Bauüberwachung laufend zu kontrollieren bzw. abzusichern. Bei Änderung der Ausführung ist gegebenenfalls ein neuer statischer Nachweis mit geänderten Lastannahmen zu führen [12].

Leitungsart	Planzeichen (Symb.)	Material	übliche Durchmesser (mm)	übliche Tiefenlage (m)	äußere Merkmale Kennzeichen
Telefon	▼	Kabel, - freiliegend - Zugformrohre - Kabelzugsteine	ab 10 mm bis 100 mm	0,60 m +/- 20 cm	gelbes Trassenwarnband, Ton-Kabelhauben, Rohre auch bündelweise verlegt
Strom	●	Kabel mit, - Blechmantel - Kunststoff, schwarz - Bleimantel - Juteummwicklung	ab 50 mm	0,80 m +/- 30 cm	Abdeckung mit Ziegelsteinen oder Kunststoffplatten, auch Trassenwarnband
Gas	■	Stahlrohre HDPE-Rohre PVC-Rohre Gußrohre (alt)	ab 40 mm bis 200 mm	1,0 m +/- 20 cm	gelbe oder schwarze Kunststoffummantelung, Sandbett, Trassenwarnband
Wasser	▲	PE-Rohre Stahlrohre Gußrohre	1 1/2 "	1,50 m +/- 30 cm	Sandbett
Abwasser	⊗	Kunststoff-Rohre Steinzeug-Rohre Beton-Rohre Gußrohre	ab 150 mm	3,0 m +/- 0,5 m	Leitung verläuft geradlinig zwischen zwei Schächten

Abbildung 4: Schutz erdverlegter Leitungen, Übersicht [13]

Um bereits im Vorfeld der eigentlichen Kanalbauarbeiten im Rahmen der Planungen ein Optimum an Sicherheit und Haltbarkeit eines Kanalsystems zu erlangen, gehört daher heute ein vor Beginn der Kanalbauarbeiten erstelltes Baugrundgutachten zum Standard. Dies gilt jedoch lediglich für den Bereich Kanalneubau. Eine Untersuchung des, den Abwasserkanal umgebenden Bodenkörpers während des Betriebszeitraums der Kanalisation, wird im Rahmen der Inspektion in der Regel nicht gefordert und demnach selten durchgeführt.

3.2 Schadensbeispiele

Die Lagerung und Bettung von Kanälen stellen für den sicheren und langfristigen Betrieb von Kanalnetzen eine Grundvoraussetzung dar. Die Lagerung konnte bisher sicher nur durch Aufgrabungen und Laboruntersuchungen ermittelt werden. Im Kanalbestand führen Grundwassereintritt und Eintrag von Bodenmaterial vielfach zur Beeinträchtigung der Tragfähigkeit des Rohraufagers und zur Hohlräumbildung oberhalb von defekten Kanälen. Neben direkten Schäden an den Rohren entstehen auch Schäden in Form von Lagerungsdefekten und Hohlräumen, die langfristig zu Oberflächenabsenkungen führen und Fahrbahneinbrüche nach sich ziehen können [4].

Gemäß DIN EN 752-5 [14] kann die Feststellung und Beurteilung des gegenwärtigen Zustands des Entwässerungssystems direkt durch Begehung oder indirekt durch Kanalfernsehen vorgenommen werden. Weitere quantitative und qualitative Untersuchungsverfahren, zu denen z.B. Radar, Seismik oder Geoelektrik zählen, können z.B. zur Feststellung von Lagerungsdefekten und Hohlräumen hinter der Kanalwand nach Bedarf eingesetzt werden. Ursache von Lagerungsdefekten und Hohlräumen können z.B.

- Einbaufehler,
- Infiltration verbunden mit dem Eintrag von Bodenmaterial in schadhafte Kanäle oder
- infolge Exfiltration kanalgeführter Wässer veränderte Auflagerverhältnisse im Bettungsraum sein.

Bei niedriger Bodenpermeabilität kann durch Exfiltration und sich aufbauende Druckdifferenz innerhalb des Rohrgrabens ein Rücklauf mit Sedimenteinträgen über Leckagen des Entwässerungssystems erfolgen. Entwässerungssysteme oberhalb eines anstehenden Grundwasserhorizontes könne als Folge außergewöhnlich hoher Niederschlagsraten unter äußeren hydraulischen Druck geraten, so dass wiederum Bodenmaterial über schadhafte Stellen in die Kanäle eingetragen werden kann.

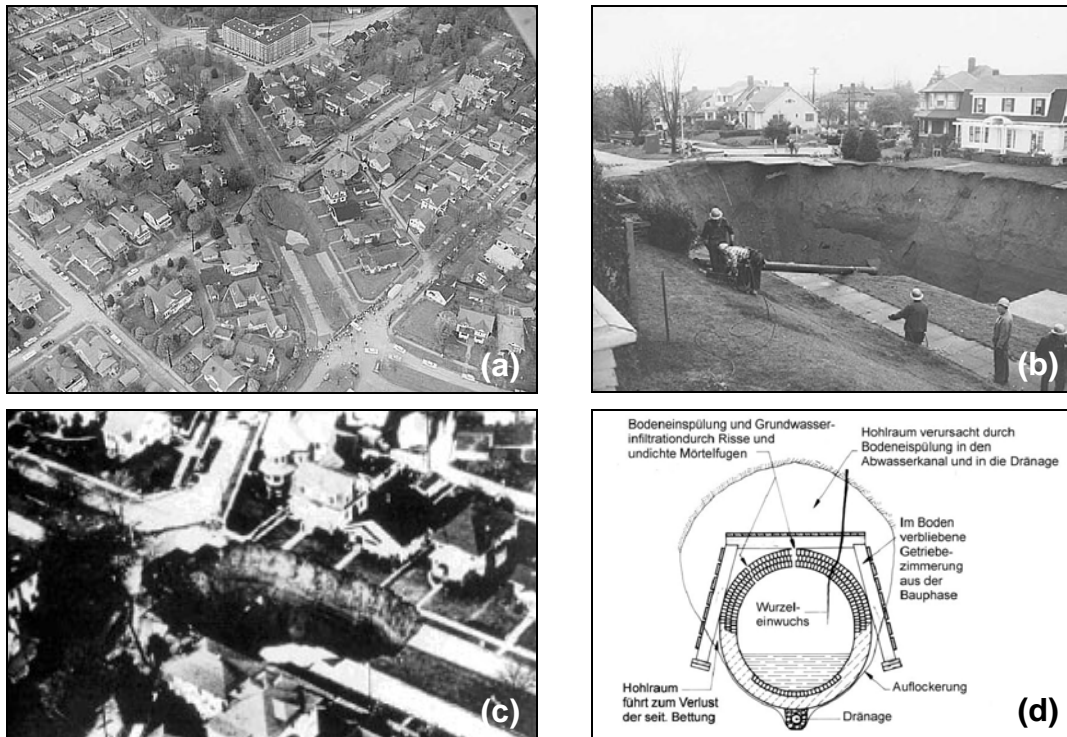


Abbildung 5: Schadensfall aus Seattle, Washington vom 11.11.1957, (a) und (b) [15], (c) und (d) [16]

Abhängig von der Grundwassersituation können bei undichten Abwasserkanälen neben einer Belastung des Untergrund durch exfiltrierendes Schmutzwasser auch eine „Fremdwasserproblematik“ sowie Bodeneintrag infolge infiltrierenden Grundwassers auftreten. Bodeneinspülungen können dabei zur Bildung von Lagerungsdefekten und Hohlräumen unbekanntem Ausmaßes führen. Als Tagesbruch bekannte Sackungen im Baugrund sind dann die mit dem undichten Kanal einhergehenden Folge. Beispiele für die Folgen derartigen Sackung bzw. sog. Tagesbrüche sind nachfolgend dargestellt. Die Abbildung 5 zeigt einen, in der Fachliteratur (vgl. [15]) dargestellten Schadensfall aus Seattle, Washington. Am 11.11.1957 stürzte das Erdreich über einem etwa 1910 in geschlossener Bauweise in 45 m Tiefe erstellten Mischwasserkanal DN 2000 ein. Bereits während der Bauphase hatten hier Fließsande zu Problemen geführt. In Kombination mit Defekten am Kanalbauwerk haben diese Fließsande dann zur Hohlraumbildung unter der Straßenoberfläche und letztlich auf einer Fläche von 40 m x 30 m zur vollständigen Zerstörung der Straße geführt [16].



Abbildung 6: Tagesbruch in Lissabon am 25.11.2003 [16]

Die Abbildung 6 zeigt einen am 25.11.2003 in Lissabon entstandenen Tagesbruch. Nach sintflutartigen Regenfällen gab die Fahrbahndecke unter dem Gewicht eines Busses nach und stürzte diese in ein ca. 10 m tiefes Loch. In dem Bus befanden sich glücklicherweise kein Passagiere. Lediglich der Fahrer erlitt leichte Verletzungen [16].



Abbildung 7: Tagesbruch in Tucson, Arizona am 7.11.2002 [16]

Die Abbildung 7 zeigt eine eingestürzte Hauptverkehrsstraße in Tucson, Arizona. Unter der Straße befand sich ein Abwasserkanal DN 1000 der aufgrund seines Alters und festgestellter Schäden in Form von Einstürzen und Verstopfungen in naher Zukunft saniert werden sollte. Der Sammler transportierte täglich etwa 120.000 m³ Abwasser zu einer Kläranlage. Schon Stunden vor dem Straßeneinbruch zeigten sich erste Fahrbahnschäden [16].

Neben diesen spektakulären Fällen, die auf Schäden an Leitungen großer Nennweite zurückzuführen sind, finden sich in der Tagespresse Beispiele für Tagesbrüche, deren Ursache in schadhafte Kanälen geringerer Nennweite gesehen wird (vgl. Abbildung 8 und 9).

Dieser Tagesbruch ist „eine ganz banale Sache“

Straße Pottenort in Erle: Lücke im Leitungsnetz führte zu Unterspülungen. Sperrung noch bis zum 30. März



Seit gestern gesperrt ist die Zufahrt von der Surkampstraße in die Straße Pottenort: Die Decke wird heute aufgerissen, um das Ausmaß des Tagesbruchs festzustellen. Foto: WAZ, Schmidke

Der Begriff „Tagesbruch“ ließ schlimme Gedanken aufkommen, an metergroße Löcher, in denen ganze Häuser verschwinden. Doch nach Meinung von Johann Graban, technischer Angestellter von Gelsenkanal, ist der Tagesbruch auf der Straße Pottenort in Erle nur „eine ganz banale Sache“. Es handele sich lediglich um einen „verdeckten Tagesbruch“, dessen Ausmaß allerdings noch nicht ganz bekannt ist.

Bei routinemäßigen War-

tungsarbeiten im Kanalnetz – es wurde eine ferngesteuert TV-Kamera eingesetzt – wurde unter der Straße Pottenort, in dreieinhalb Meter Tiefe in Höhe des Hauses Nr. 18, im Kanal Sand entdeckt. Laut Graban hatten sich zwei Rohre voneinander gelöst, das durchströmende Wasser hatte den Sand aus dem umgebenden Erdreich weggespült.

Immerhin waren die Erdbewegungen so beträchtlich, dass sie bereits zu einer leichten Delle im Straßenbezug

fürten. Am heutigen Donnerstag soll die Straßendecke geöffnet werden, erst dann wird feststehen, wie groß (oder klein) dieser Tagesbruch ist. Graban: „Wir werden fünf bis sechs Meter Rohre verlegen.“ Noch einmal bezeichnet er den verdeckten Tagesbruch als „ganz normales Tagesgeschäft“. Die Zufahrt zur Straße Pottenort von der Einmündung Surkampstraße soll noch bis zum 30. März gesperrt bleiben. Eine Umleitung ist ausgeschildert.

chris

Abbildung 8: Westdeutsche Allgemeine Zeitung vom 08.03.2007



Einseitig gesperrt war für mehrere Tage die **Jahnstraße** in Kaldenkirchen. Die Fahrbahn drohte abzusacken.
RP FOTO: FRANZ HEINRICH BUSCH

Fahrbahn in der Jahnstraße sackte ab

NETTETAL (lp) Ein Teilstück der Fahrbahn in der Kaldenkirchener Jahnstraße drohte allmählich abzusacken. Der Bauhof der Stadt öffnete zu Beginn der vergangenen Woche die Straße, um nach den Ursachen zu forschen. Es hatte sich ein größerer Hohlraum gebildet, der sich wellenförmig fortsetzte. Die Tiefbaufachleute der Stadt schalteten daraufhin auch den städtischen Abwasserbetrieb ein, der bei den Stadtwerken angesiedelt ist. Der in einer Tiefe von gut drei Metern liegende Kanal wurde untersucht. Auffälligkeiten ergaben sich jedoch nicht. Vorsichtshalber wurde lediglich eine Verbindung zu einem Hausanschluss in Ordnung gebracht. Um sicher zu gehen, wurde ein längerer Abschnitt in der Straße geöffnet. Weitere Hohlräume wurden nach Angaben des Abwasserbetriebs nicht gefunden. Die Ursachen sind nicht bekannt. Denkbar ist, dass das Erdreich beim Bau des Kanals vor Jahrzehnten nicht ausreichend verdichtet wurde. Die Erde gab im Laufe der Jahre nach, es bildeten sich dadurch Hohlräume. Vor geraumer Zeit war so etwas schon einmal in der Jahnstraße aufgetreten, und zwar in Höhe der katholischen Grundschule.

Abbildung 9: Lokalteil der Rheinischen Post (Grenzland-Kurier) vom 10.01.2007

Insbesondere in dicht besiedelten Ballungsräumen können derartig Tagesbrüche weitreichende Konsequenzen haben.

3.3 Schadensursachen

Bei der systematischen Erfassung des Ist-Zustandes der Kanalisation im Rahmen der Zustandserfassung, -klassifizierung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden z.B. nach DWA-M 149-2 [17] werden Schäden im Umfeld der Abwasserrohre nicht direkt als Zustandsart durch das Kürzelsystem erfasst. Die im Merkblatt M 149-2 [17] beschriebenen Zustandsarten können jedoch auf das Vorhandensein z.B. möglicher Lagerungsdefekte und Hohlräume hinweisen.

Die Funktionsfähigkeit des Entwässerungssystems kann infolge eines Lagerungsdefekts oder Hohlraumes eingeschränkt werden durch z.B.

- Lageabweichungen,
- Verformungen biegeweicher Rohre,
- Rohrbruch / Einsturz.

Benachbarte oder kreuzende Ver- und Entsorgungsleitungen können in Ihrer Funktionsfähigkeit eingeschränkt werden.

Senkungen des Straßenaufbaus und aus dem Straßenaufbau ragende Schachtabdeckungen können akute Verkehrsgefährdungen darstellen.

Im nicht begehbaren Nennweitenbereich (< DN 800) überwiegen Rohre aus den Werkstoffen Beton und Steinzeug, mit Abstand gefolgt vom Material Kunststoff (vgl. Abbildung 10).

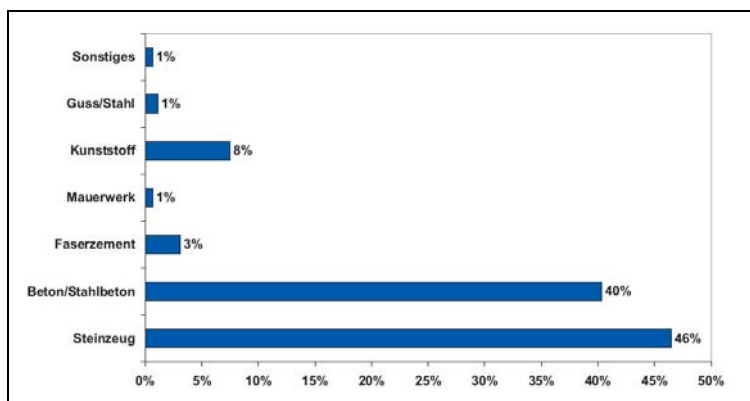


Abbildung 10: Materialverteilung von Rohren < DN 800 (Stand 2004) [18]

Bei der Auswahl der Inspektionstechnik müssen sowohl die für diese Rohrwerkstoffe charakteristischen Materialeigenschaften, als auch die bei diesen Rohrwerkstoffen zu erwartenden Schadensbilder berücksichtigt werden.

3.3.1 Alter der Kanalisation

Eine Ursache des stellenweise schlechten Zustandes der Kanalisation kann im Alter der Bauwerke sowie der stetig steigenden Verkehrsbelastung und damit verbundenen Beanspruchung der im Straßenkörper verborgenen Bauwerke vermutet werden. Etwa 70 % der öffentlichen Kanalisation in der Bundesrepublik Deutschland wurde vor mehr als 25 Jahren errichtet und mindestens 20 % der Kanalisation hat ein Alter von mehr als 50 Jahren (vgl. Abbildung 11).

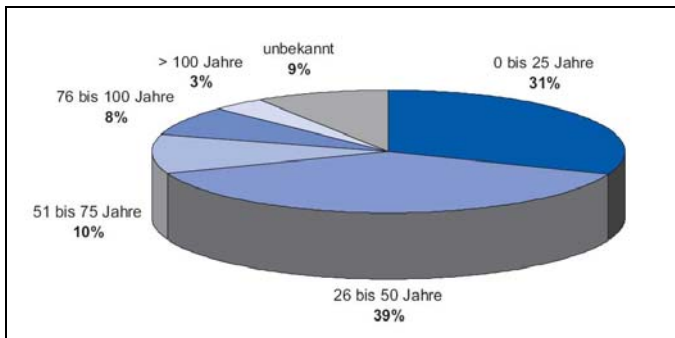


Abbildung 11: Altersverteilung der Kanalisation (Stand 2004) [18]

Diese Zahlen sollten dabei jedoch nicht allein vor dem Hintergrund einer mit dem Alter verbundenen Abnutzung des Rohrmaterials gesehen werden. Durch Reparaturmaßnahmen, das Erstellen neuer Anschlüsse und der Verlegung neuer Versorgungsleitungen ist in gleichem Maße eine Veränderung der Leitungszone und des umgebenden Bodenkörpers zu erwarten. Die Abbildung 12 stellt die geplante Anordnung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Verkehrsflächen einer realen Verlegesituation gegenüber. Eine gleichmäßige Verdichtung der Leitungszone ist hier nicht zu erwarten.

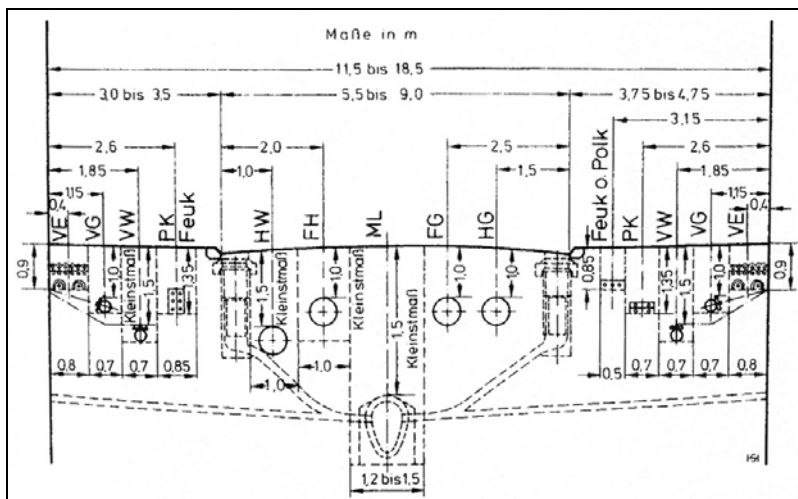


Abbildung 12: Geplante Anordnung von Leitungen und Kanälen im Straßenquerschnitt [19], reale Situation [20]

Die Abbildung 13a zeigt einen schadhaften Straßenoberbau. Die Fahrbahndecke weist Abrieb und Materialverlust. Ebenfalls sind im Bereich der Schachtabdeckungen und Straßenkappen Trennschnitte zu erkennen, die auf Arbeiten an den Ver- und Entsorgungsleitungen hinweisen. Der Straßenbaulastträger hat hier im Rahmen einer Sanierung eine neue Deckschicht erstellen lassen (Abbildung 13b). Erkennbare Verdachtsflächen für Lagerungsdefekte oder Hohlräume in der Umgebung der erdverlegten Leitungen sind hier anschließend von der Oberfläche nicht mehr auszumachen.

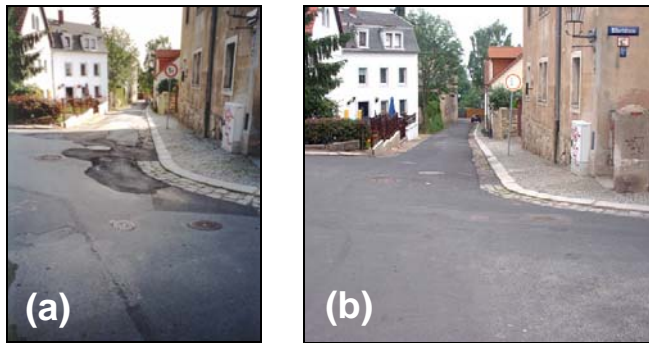


Abbildung 13: Straße vor und nach einer Sanierung [21]

3.3.2 Bauverfahren und Materialien

Undichtigkeiten sowie damit verbundene Bodeneinspülungen und Hohlraumbildung im Umfeld eines Kanals können auch aus einer, nicht nach dem heutigen Stand der Technik erfolgten Bauausführung resultieren. So hat man in der Vergangenheit z.B. den Kanälen zusätzlich die Aufgaben einer Dränageleitung zugewiesen. Dies wurde u.a. durch die Verwendung von Rohren mit einer Halbmuffe realisiert, bei denen bewusst auf die Abdichtung der Rohrverbindung im Scheitelbereich verzichtet wurde (vgl. Abbildung 14). Ebenfall finden sich im Bestand Hausanschlüsse, die nicht mit den heute gebräuchlichen Anschlussstutzen hergestellt sind. Die Abbildung 15 zeigt einen stumpf gestoßenen Hausanschluss mit einer Mörtelhaube zur Lagesicherung.



Abbildung 14: Rohr mit einer Halbmuffe [15]

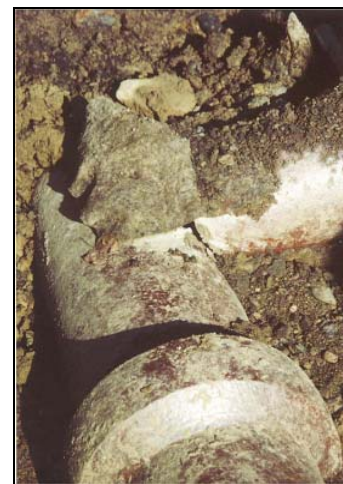


Abbildung 15: Undichter Hausanschluss [22]

In der Vergangenheit gebräuchliche, handwerklich hergestellte Abdichtungen der Rohrverbindungen z.B. Teerstricke/Lehm bzw. Mörtel, Teerstrick mit Bitumenverguss oder Rollringe aus Elastomer (vgl. Abbildung 16) erfüllen aufgrund von Alterung oder konstruktiver Schwächen die heute gestellten Anforderungen eines Dichtheitsnachweises häufig nicht mehr [23]. Infiltrationen und damit verbundener Bodeneintrag können die Folge sein.

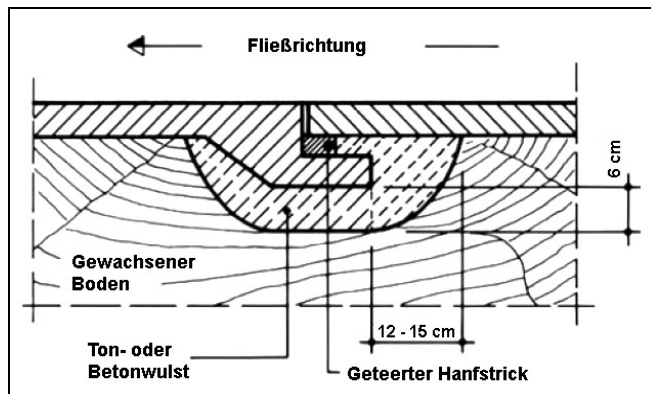


Abbildung 16: Gebräuchliches Abdichtungssystem für Steinzeugrohrverbindungen bis etwa 1910 [23]

3.3.3 Einwirkende Beanspruchungen

Auf das „*Ingenieurbauwerk Leitungsgraben*“ wirken eine Vielzahl unterschiedlicher Beanspruchungen ein. Nach [15] können folgende Beanspruchungen als innere Belastungen auftreten:

- Eigengewicht
- Wasserfüllung
- Innerer Wasserüberdruck bzw. Unterdruck
- Betriebsüberdruck, d.h. hydrostatischer und hydrometrischer Druck einschließlich Druckstößen bei störungsfreiem Betrieb
- Innere Einbauten, z.B. in Schutzrohren
- Hohe Temperaturunterschiede, starke Temperaturschwankungen
- Vorspannung, Kriechen und Schwinden, bei Spannbetonrohren und Spannbeton-druckrohren
- Längsdruckkräfte beim Vortrieb

Als äußere Belastungen werden folgende Beanspruchungen verstanden:

- Erdauflasten, abhängig von Bodenart, Wichte (Grundwasserstand), innerem Reibungswinkel, Steifemodul
- Seitlicher Erddruck
- Auflasten aus Schütt- oder Stapelgütern; spätere Dammschüttungen oder flächige Auffüllungen
- Wasserauflasten über gedichtetem Fluss-, Kanal-, oder Seebett
- Fundamentlasten
- Äußerer Wasserüberdruck (z.B. Grundwasser)
- Auflagerreaktionen, bei besondere Lagerungen z.B. Sättel, Pfahljoche
- Verkehrslasten (Straßenverkehrslasten, Eisenbahnlasten, Flugzeuglasten)

Insbesondere die Verkehrslasten unterliegen laufenden Veränderungen. In der Vergangenheit hat sich sowohl die Anzahl von PKW als auch von LKW auf den Straßen deutlich erhöht (vgl. Abbildung 17).

Jahr	Krafträder	Personen-kraftwagen	Kraft-omni-busse	Lastkraft-wagen	Zugma-schinen	Sonstige Kfz	Kraftfahr-zeug-anhänger
1.7.1970	228 604	13 941 079	47 253	1 028 116	1 446 955	91 220	632 822
1.7.1975	454 811	17 898 422	59 967	1 121 254	1 560 515	128 781	930 863
1.7.1980	738 180	23 191 616	70 458	1 277 167	1 640 132	198 598	1 328 993
1.7.1985	1 406 869	25 844 520	69 388	1 280 809	1 704 908	311 147	1 763 249
1.7.1990	1 413 674	30 684 811	70 370	1 388 505	1 756 488	434 430	2 245 616
1.7.1995	2 267 428	40 404 294	86 258	2 215 236	1 899 627	613 435	4 100 751
1.7.1998	2 925 843	41 673 787	83 285	2 370 599	1 902 627	630 347	4 521 370
1.7.1999	3 177 437	42 323 672	84 687	2 465 535	1 916 043	641 768	4 655 767
1.7.2000	3 337 848	42 639 906	85 574	2 526 896	1 919 920	654 529	4 853 066
1.1.2001	3 410 480	43 772 260	86 656	2 610 885	1 941 783	665 231	4 960 189
1.1.2002	3 557 360	44 383 323	86 461	2 649 097	1 951 077	678 612	5 105 276
1.1.2003	3 656 873	44 657 303	85 880	2 619 267	1 952 243	684 269	5 210 788
1.1.2004	3 744 971	45 022 926	86 480	2 586 329	1 952 298	689 165	5 317 433
1.1.2005	3 827 899	45 375 526	85 508	2 572 142	1 961 934	696 644	5 449 135
1.1.2006	3 902 512	46 090 303	83 904	2 573 077	1 975 979	284 092	5 570 026

Abbildung 17: Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern 1970 bis 2006 nach Fahrzeugklassen [24]

Im Zeitraum zwischen 1970 und 2006 hat sich z.B. die Anzahl der in Deutschland zugelassenen Lastkraftwagen (ohne Sattelzugmaschinen) von 1.028.116 auf 2.573.077 erhöht. Dies entspricht einer Zunahme um 150 %. Für die Zukunft kann eine weitere Erhöhung des Verkehrsaufkommens erwartet werden. Nicht berücksichtigt sind dabei ausländische Lkw im Import- oder Transitverkehr. In Abbildung 18 sind die Marktanteile deutscher und ausländischer Lkw im Transportverkehr in Deutschland für den Zeitraum ab 1991, mit einer Prognose bis in das Jahr 2008 nach Angaben des Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V. dargestellt. Die tatsächliche Zahl der Fahrzeuge > 7,5 t, die die Straßen frequentieren, erhöht sich danach um etwa um den Faktor 1,5.

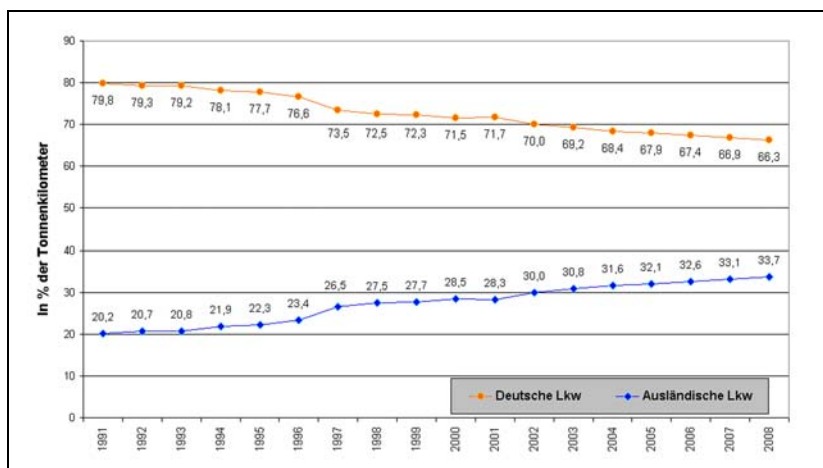


Abbildung 18: Marktanteile deutscher und ausländischer Lkw in Deutschland (1991 – 2008) [25]

Im öffentlichen Bereich wird das System aus Abwasserrohr und umgebender Leitungszone in der Regel unterhalb von befahrbaren Verkehrsflächen verlegt. Die Überschüttung der Leitungszone stellt somit gleichzeitig das Fundament für den Straßenoberbau dar. Die statische Bemessung der Abwasserrohre aber auch die Dimensionierung des Straßenoberbaus orientieren sich dabei an den im technischen Regelwerk definierten Achslasten. Bei der Verände-

rungen möglicher Verkehrsbelastungen, z.B. durch die Zulassung von LKW mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 60 t (vgl. Abbildung 19), werden aus bautechnischer Sicht erwartete Probleme, z.B. bei der Durchfahrt von Kreisverkehren oder hinsichtlich der Tragfähigkeit von Brücken diskutiert.



Abbildung 19: Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 60 t (Krone Giga Liner [26], Fiegl Combi Train [27])

Der in Abbildung 20 dargestellte Zeitungsartikel vom 13.01.2007 zeigt, wie kontrovers die Diskussion geführt wird.

**Infrastruktur der Citys für Gigaliner ungeeignet
Städte lehnen Riesen-Lkw ab**

Düsseldorf. (ddp) Die NRW-Kommunen warnen vor negativen Folgen für die Innenstädte durch den Einsatz von Riesen-Lkw.

Für solche Fahrzeuge sei die innerstädtische Verkehrsinfrastruktur nicht ausgelegt, sagte der Hauptgeschäftsführer des Städte- und Gemeindebundes NRW, Bernd Jürgen Schneider, gestern in Düsseldorf. Insbesondere die Kreisverkehre stünden den so genannten Gigaliner im Weg. An Kreuzungen, in Kurven, und Unterführungen blieben sie zwangsläufig hängen und würden für ein Verkehrschaos sorgen. Schneider kritisierte den Modellversuch der Landesregierung mit den Gigaliner. Zwar sei der Versuch auf außerörtliche Strecken be-

Sind bis 25 Meter lang: Die Gigaliner, die derzeit im Modellversuch über die Straßen in NRW rollen. (WR-Bild: Gregor Boldt)

schränkt. Es sei aber illusorisch, solche „Monstertrucks“ aus den Innenstädten herauszuhalten, wenn erste Tests aus Sicht der Spediteure positiv verlaufen sollten. NRW-Verkehrsminister Oliver Wittke hatte im letzten Jahr grünes Licht für den Modellversuch gegeben.



Abbildung 20: Westfälische Rundschau vom 13.01.2007.

Eine Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes der Fahrzeuge kann aber auch zu einer Erhöhung der auf die Kanalisation wirkenden äußeren Belastungen führen. Daneben verändert sich die Beanspruchung des Untergrundes zusätzlich durch Achsabstand der ca. 25 m langen Fahrzeuge.

Die Belastung einer Straße hängt nicht allein vom Gesamtgewicht eines LKW ab, sondern vielmehr von der Achslast, der Bereifung (Single- oder Zwillingsbereifung, vgl. Abbildung 21) sowie der Art der Federung (Luft- oder Blattfeder). Ergebnisse zu Untersuchungen über den Einfluss unterschiedlicher Reifentypen in Verbindung mit verschiedenen Achslasten und Asphalttypen finden sich in [28] (vgl. Abbildung 22).



Abbildung 21: Single- und Zwillingsbereifung [28]

Reifen können sich in ihrer Geometrie unterscheiden. Eine typische Reifengröße wird z.B. durch die Bezeichnung 315/80R22,5 gekennzeichnet. Dabei steht die 315 für die Lauffläche des Reifens, hier 315 mm. Die 80 beschreibt das prozentuale Verhältnis von Flankenhöhe zu Reifenbreite. In diesem Beispiel beträgt die Flankenhöhe 252 mm (0,8 x 315 mm). Das R steht für die radiale Bauweise des Reifensklasse. Die 22,5 gibt den Felgendurchmesser für diesen Reifen in Zoll an. Nach [28] wird in Deutschland von den folgenden Verhältnissen ausgegangen (Stand 2001):

- Lastkraftwagen und Zugmaschinen sind zu annähernd selben Anteilen mit den Reifentypen 315/80R22,5 (23%) und 295/80R22,5 (27%) ausgestattet. Bei 17% der Fahrzeuge war der Reifentyp nicht bekannt.
- Die Forderachsen von Lastkraftwagen und Zugmaschinen werden zunehmend mit Single-Breitreifen 385/65R22,5 ausgestattet. 2001 betrug der Anteil 4%.
- Bei Anhängern und Sattelaufliegern sind die Reifentypen 385/60R22,5 mit 45% und 365/80R20 mit 20% vertreten. Bei 17% der Fahrzeuge war der Reifentyp nicht bekannt. Der Reifen des Typs 425/65R22,5 haben lediglich einen Anteil von 1%. Alle Reifentypen sind hier in der Regel als Single-Bereifung ausgeführt.

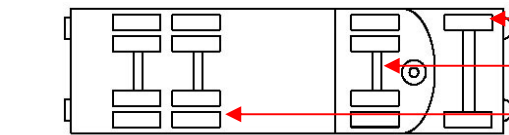
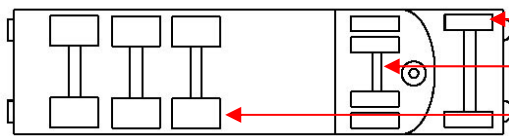
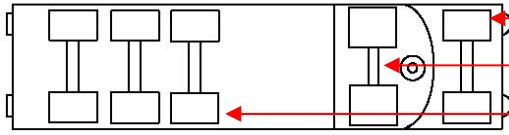
		Achse	Reifenbreite
Vergangenheit 38 t		Lenkachse	295 – 315 mm
		Antriebsachse	295 – 315 mm
		Zusatzachsen	245 – 280 mm
Gegenwart 40 t		Lenkachse	295 – 315 mm
		Antriebsachse	295 – 315 mm
		Zusatzachsen	385 mm
Zukunft ≥ 40 t		Lenkachse	385 mm
		Antriebsachse	495 mm
		Zusatzachsen	485 mm
	Achslast	8 t 8 t 8 t 11,5 t 7 t	

Abbildung 22: Für Sattelschlepper in der Vergangenheit und Gegenwart gebräuchliche Reifentypen, Gewichte und Achslasten sowie für die Zukunft erwartete Entwicklung, nach [28]

Nach [28] wird der Straßenoberbau bei gleicher Achslast durch eine Achse mit Single-Bereifung ebenso beansprucht wie durch zwei Achsen mit Zwillingsbereifung. Der Abnutzungseffekt des Straßenoberbaus durch die aufgebrachte Achslast steigt nach [28] etwa in

der 4. Potenz (3,6 bis 4,6) mit dem Gewicht. Bei einer Erhöhung der Achslast von 8 t auf 10 t entspricht dies:

$$\frac{N_y}{N_x} = \left(\frac{P_x}{P_y} \right)^4 = \left(\frac{10}{8} \right)^4 = 2,44$$

mit: Achslasten P_x , P_y und korrespondierenden Beanspruchungen N_x , N_y

Das bedeutet, dass bei einer Achslast von 8 t die Anzahl der Beanspruchungen (Überfahrten) um den Faktor 2,44 gesteigert werden müsste, um die gleiche Abnutzung hervorzurufen, die eine Achslast von 10 t verursacht. Eine Erhöhung der Achslast auf 11 t erhöht den Faktor bereits auf 4,27. Die durchschnittlich kalkulierbare Achslasten liegen nach [28] bei 6 bis 7 t für die Lenkachse, 11,5 t für die Antriebsachse und 8 t für Zusatzachsen (Schleppachse, Nachlaufachse oder Vorlaufachse).

Der Einfluss der hier entstehenden Belastung des Straßenkörpers und der darunter liegenden Kanalisation wird z.Z. im Rahmen des Forschungsvorhabens [29] untersucht.

3.4 Bisherige IKT - Forschungsarbeiten

Geophysikalische Messverfahren gewinnen im Bereich des unterirdischen Leitungsbaus zunehmend an Bedeutung. Sie können sinnvoll sowohl zur Trassenvorerkundung bei Neubau-maßnahmen als auch zur Untersuchung bestehender Kanäle und Leitungen im Vorfeld der Sanierungsplanung eingesetzt werden. Die Auswahl eines Sanierungsverfahrens, z.B. einer Linersanierung oder Erneuerungsmaßnahme, basiert allerdings bisher häufig allein auf den Ergebnissen der optischen Inspektion. Darüber hinaus liegen bei älteren Kanälen aus Ortbeton oder Stahlbeton in den Kanalkatastern nicht immer Aufzeichnungen über ausgeführte Wanddicken oder eingelegte Bewehrungslagen vor. Weitergehende Informationen über den Zustand des Kanalbauwerkes und des umgebenden Bodenkörpers werden zur Planung von Sanierungsmaßnahmen lediglich in Einzelfällen durch Kernbohrungen bzw. Sondierungen punktuell gewonnen. Zur wirklichkeitsnahen Einschätzung von Standsicherheit und Schadensbild des Bauwerkes sind jedoch Anomalien, Lagerungsdefekte und Hohlräume in der Leitungszone oder Fehlstellen im Rohrkörper in die Beurteilung einzubeziehen, da sie die Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit des Rohr-Boden-Systems entscheidend beeinflussen. Nur so kann sich der Netzbetreiber vor kostspieligen Fehlentscheidungen, z.B. bei der Wahl der Sanierungspriorität (vgl. [30]) und des Sanierungsverfahrens, zuverlässig schützen. Der Einsatz geophysikalischer Messverfahren bietet sich beispielsweise an für eine

- Schadensanalyse (unsichtbares Schadensausmaß und Ursachen),
- Festlegung der Untersuchungspunkte für bodenmechanische Baugrunderkundungen und zerstörende Bauwerksprüfung (Lage von Inhomogenitäten),
- Überprüfung der Standsicherheit (Eingangsparameter für die Statik).

Die Geophysik kennt eine Vielzahl unterschiedlicher Messverfahren. Im Anwendungsbereich des unterirdischen Leitungsbaus ist das Georadarverfahren ein bereits bekanntes, erfolgreich erprobtes Messverfahren. Neben dem Georadar existiert eine Reihe weiterer Verfahren, die im Bereich des unterirdischen Leitungsbaus zweckmäßig angewendet werden können. Das Know-how über die Anwendung geophysikalischer Verfahren ist jedoch nicht weit verbreitet. Zur Festlegung einheitlicher Anforderungen an die Durchführung und Auswertung geophysikalischer Untersuchungen der Umgebung erdverlegter Leitungen wird aktuell durch die DWA-Arbeitsgruppe ES-8.13 „*Detektion von Lagerungsdefekten*“ ein Merkblatt erarbeitet (vgl. [4]).

Die Möglichkeiten der Weiterentwicklung bzw. Adaption von geophysikalischen Messverfahren zur zerstörungsfreien Aufnahme von Schäden hinter der Kanalinnenwand bei der Inspektion von Abwasserkanälen und -leitungen wurden von der HOCHTIEF Construction AG, GS CEW, Köln, der DMT GmbH, Exploration & Geosurvey, Essen und dem IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen gemeinsam im Auftrag der Stadtentwässerungsbe-

triebe Köln AöR untersucht [31]. Gefördert wurde das Vorhaben durch das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.

Es wurden sowohl Untersuchungen in einer Versuchsstrecke mit bekannten Anomalien zur Auswahl und Kalibrierung der am Markt verfügbaren Messverfahren als auch praktische Einsätze im Kanalnetz der Stadtentwässerungsbetriebe Köln AöR durchgeführt. Ziel war es, die heute verbreiteten Untersuchungsmethoden, wie die optische Inspektion oder Sondierung des Baugrundes, durch den Einsatz geophysikalischer Methoden in wirtschaftlich sinnvoller Weise zu ergänzen und damit die Aussagekraft der Zustandserfassung mit Blick auf die Sanierungsplanung zu erhöhen.

Im ersten Schritt wurde auf dem Gelände des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur in Gelsenkirchen ein 40 m langer begehbare unterirdischer Kanal erstellt (Abbildung 23). Diese Versuchsstrecke besteht aus Ortbeton- bzw. Mauerwerksabschnitten mit Eiprofil der Nennweite DN 2000/1800 sowie werksgemauerten Stahlbetonrohren der Nennweite DN 2200 für den Rohrvortrieb bzw. die offene Verlegung. Die Begebarkeit der Versuchsstrecke ermöglichte die Erprobung der geophysikalischen Messtechniken, ohne zuvor eine aufwendige Miniaturisierung der Geräte vornehmen zu müssen.



Abbildung 23: Versuchsstrecke auf dem Gelände des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur in Gelsenkirchen; vor Bodeneinbau und Überschüttung [22]

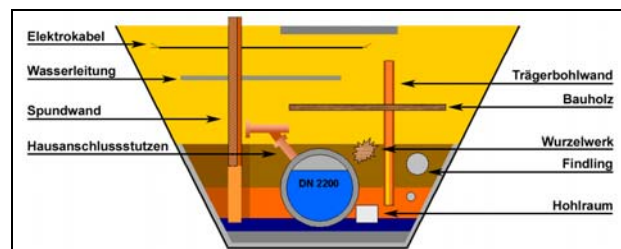


Abbildung 24: Querschnitt der Versuchsstrecke, Skizze [22]

Das Bauwerk wurde u.a. mit definierten Betonqualitäten und Wanddicken, verschiedenen Fugen- und Dichtungsbändern sowie simulierten Betonschäden, wie z.B. Kiesnester oder Risse, hergestellt. Die Bodenbereiche, die den Kanal umgeben, haben planmäßig Zonen unterschiedlicher Verdichtung und wechselnde Bodenarten. Darüber hinaus wurden Anomalien, wie z.B. Findlinge, Hohlräume (Polystyrol-Körper) und Verbauelemente, eingebaut, eingemessen und kartiert (Abbildung 24 und Abbildung 25). So wurden in der Versuchsstrecke vielfältige Randbedingungen eines in offener Bauweise erstellten Kanals gezielt nachempfunden.



Abbildung 25: Einbau verschiedener Bodenarten und Anomalien in der Versuchshaltung [22]

- (1) Wechselnde Bodenarten
- (2) Spundwand parallel zum Kanal (rechts)
- (3) Einbau von bindigem Bodenmaterial in der Leitungszone
- (4) Hohlraum (Polystyrol-Körper) unmittelbar an der Kanalausßenwand
- (5) Einbau einer Trägerbohlwand in der Kanalumgebung
- (6) Findling in der Kanalumgebung

In der Versuchshaltung wurden im Inneren des Kanals Verfahrenskombinationen aus Seismik, Georadar, Bohrlochgeophysik und Impact-Echomessungen sowie die Verfahren Gravimetrie, Elektromagnetik und Thermographie eingesetzt. Darüber hinaus kamen von der Erdoberfläche die Verfahren Seismik, Geoelektrik und seismische Tomographie zur Anwendung. Anhand des bekannten Rohr-Boden-Systems einschließlich Anomalien (vgl. Abbildung 25) konnten die Verfahren auf ihre Eignung zur Beschreibung der Kanalgeometrie, der Werkstoffeigenschaften und der Bettungssituation gezielt getestet werden.

Um Störzonen oder Anomalien zu erkennen, müssen deren physikalische Eigenschaften, wie z.B. Leitfähigkeit oder Permeabilität, von den Eigenschaften der unmittelbaren Umgebung abweichen. Die Auswertung der Messungen in der Versuchsstrecke zeigte, dass alternativ zu einer Untersuchung der Leitungszone von der Geländeoberfläche - abhängig von der Fragestellung - eine Erkundung aus dem Kanal heraus zweckmäßig ist, da die eingesetzten Messverfahren im Nahbereich die höchste Auflösung haben. Mögliche Störzonen und Anomalien in der Kanalumgebung oder das Kanalbauwerk selbst können so besser untersucht werden.

Die Messverfahren Georadar, Seismik, seismische Tomographie sowie Impact-Echo konnten in der Versuchsstrecke die vorgegebenen Untersuchungsziele am effektivsten erreichen und boten sich somit für einen In-situ-Einsatz an. Für eine Untersuchung des Kanalbauwerkes selbst eignete sich dabei besonders das Verfahren Georadar in Kombination mit Impact-Echo. So konnten die Wanddicke und der Wandaufbau sowie die einliegenden Bewehrungslagen, Fugen- und Dichtungsbänder sowie Fehlstellen im Beton erfolgreich lokalisiert werden. Bei der Erkundung der Kanalumgebung aus dem Kanal heraus und von der Geländeoberfläche aus konnten gute Ergebnisse insbesondere durch eine Kombination der Verfahren Georadar, Seismik und seismische Tomographie erzielt werden. Alle im Bereich des Leitungsgrabens eingebauten Anomalien wurden mit mindestens einem der eingesetzten Verfahren erkannt. Hohlräume hinter der Kanalwand konnten ebenso erkannt werden wie inhomogene Verfüllmaterialien. Grundsätzlich ist es möglich, Bereiche abzugrenzen, in denen sicher keine Anomalien zu erwarten sind und damit für den Auftraggeber einer Kanalbaumaßnahme nur ein geringes „Baugrundrisiko“ besteht.

Im Rahmen der Messkampagne wurden Erfahrungen an dem relativ komplexen Untersuchungsgegenstand eines dickwandigen Kanals aus Mauerwerk, Beton und Stahlbeton gewonnen. Der in der IKT-Versuchsstrecke eingesetzte Systemträger wurde fortlaufend so weiter entwickelt, dass er auch bei den anschließenden Messungen während des In-situ-Einsatzes verwendet werden konnte (vgl. Abbildung 26).

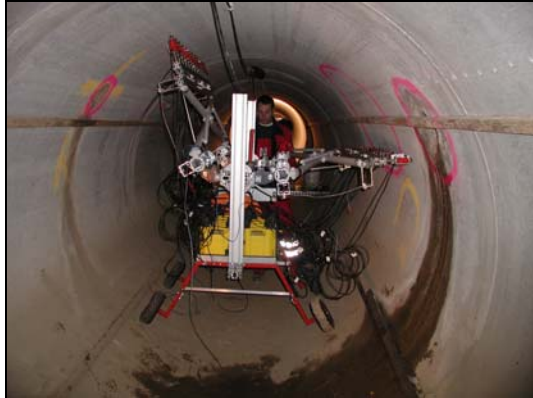


Abbildung 26: Mobiler Systemträger, in der IKT-Versuchsstrecke [22]

Der neu entwickelte Systemträger (vgl. Abbildung 26) wurde erstmals unter In-situ-Bedingungen im Kanalnetz der Stadtentwässerungsbetriebe Köln AöR in den Sammlern „*Brück-Rath*“ bzw. „*Ostmerheim*“ eingesetzt [32]. Bei beiden Sammlern handelt es sich um begehbare Ortbetonkanäle. Im Bereich des Sammlers „*Brück-Rath*“ sollte zunächst die Praktikabilität und Zuverlässigkeit der Verfahren grundsätzlich überprüft werden. Dazu wurden die Leitungszone und die Überschüttung eines vorhandenen Kanals erkundet und die Ergebnisse für die Bauplanung eines Regenüberlaufbauwerkes am selben Ort herangezogen. Während der anschließenden Aufgrabung konnten dann die Erkundungsergebnisse auch mit den tatsächlichen Baugrundverhältnissen verglichen werden. Der Sammler „*Ostmerheim*“ sollte in geringem Abstand mittels Microtunneling unterfahren werden. In diesem Fall war festzustellen, ob in der Kanalumgebung und hier vor allem im Bereich eines Einsteigschachtes mit Vortriebshindernissen, wie Verbau- und Schalungsresten, zu rechnen ist. Die Untersuchungen wurden bei Trockenwetterabfluss durchgeführt und der Kanal vorher gereinigt.

Für die Untersuchung des Kanalbauwerks und der Kanalumgebung des Sammlers „*Brück-Rath*“ [32] wurden die Verfahren Seismik, Georadar und seismische Tomographie ausgewählt. Bei den Messungen im Kanal kam der mobile Systemträger, der ein zügiges und zerstörungsfreies Abtasten der Kanalwand ermöglichte, zum Einsatz.

Die seismischen Messungen wurden entlang von 2 Messlinien, jeweils 60 cm in linker und rechter Umfangsrichtung vom Rohrscheitel entfernt, durchgeführt. Dabei wurden 12 akkubetriebene, 2-kanalige „*Summit-Boxen*“ und 24 Geophone mit einem Geophonabstand von 12 cm verwendet. Als Schlagquelle diente ein 4 kg Hammer mit piezoelektrischer Keramik als Impulsgeber bei einem Schlagpunktabstand von 60 cm. Die Messdaten wurden von einem Mess-PC direkt am Systemträger aufgezeichnet.

Die Auswertung der seismischen Messungen zeigt Reflexionen, die möglichen Auflockungszonen, verfestigten Bereichen, Hohlräumen oder Findlingen zuzuordnen sind. Aus der Reflexionslaufzeit und der Wellengeschwindigkeit können die Tiefenlage und qualitativ die Lagerungsdichte bestimmt werden. Eine weitere Charakterisierung der erkannten Anomalien ist anhand des Reflexionsbildes allein nicht möglich. Insgesamt wurden alle erkannten Anomalien als relativ schwach eingestuft.

Entlang einer 34 m langen Messlinie im Kanal oberhalb des Kämpfers wurden weiterhin Georadmessungen mit Frequenzen zwischen 225 MHz und 450 MHz zur Erkundung des

Kanalbauwerks durchgeführt. Neben den Längsprofilen wurden auch Umfangsprofile oberhalb des Trockenwetterabflusses vermessen.

Der in Abbildung 27 dargestellte Ausschnitt eines Radargramms zwischen den Profilmeter 20.00 und 25.00 zeigt deutlich die für ein Dehnungsfugenband typische Reflexionshyperbel. Die Georadaruntersuchung wurden im Frequenzbereich zwischen 225 MHz und 450 MHz durchgeführt, um eine ausreichende Auflösung sicherzustellen. Weitergehende Informationen über die Kanalumgebung sind bei der hier vorgefundenen Wanddicke von bis zu 0,7 m nur mit deutlich niedrigeren Frequenzen, allerdings dann mit schlechterer Auflösung, zu erzielen.

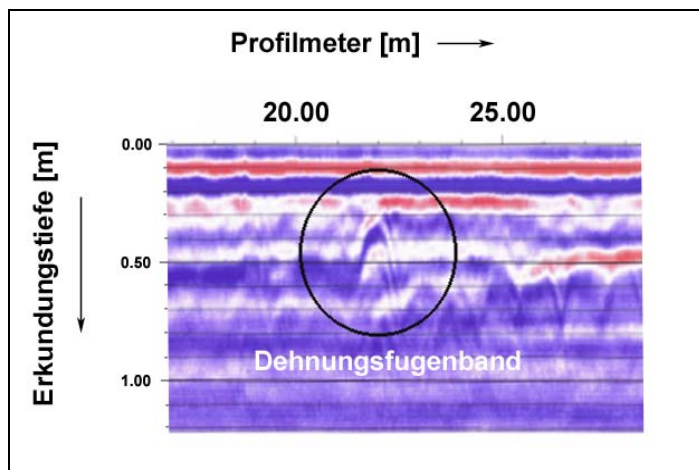


Abbildung 27: Radargramm (225 MHz) mit Reflexionshyperbel aufgrund eines Dehnungsfugenbandes [32]

Bei Anwendung der seismischen Tomographie wurden 30 akkubetriebene, 2-kanalige „Summit-Boxen“ und 60 Geophone an der Geländeoberfläche mit einem Geophonabstand von 60 cm eingesetzt. Als Schlagquelle diente ein 4 kg Hammer mit piezoelektrischer Keramik als Impulsgeber bei einem Schlagpunktabstand von 60 cm.

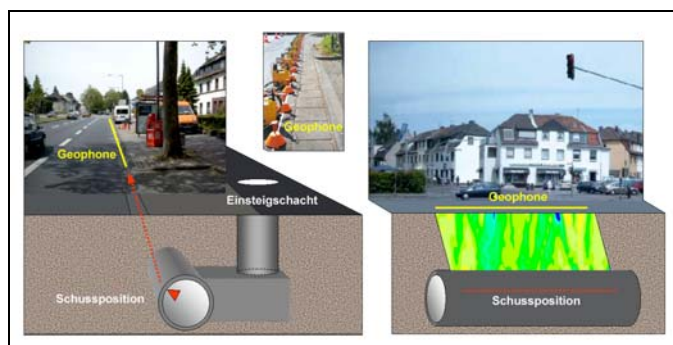


Abbildung 28: Tomographische Messung im Abwassernetz der Stadtentwässerungsbetriebe Köln, AöR [22]

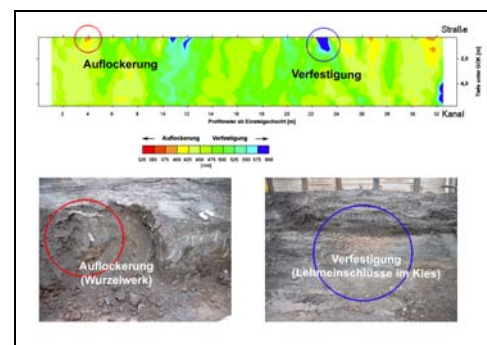


Abbildung 29: Beispiel für die Geschwindigkeitsverteilung der seismischen P-Wellen mit erkannten und bestätigten Anomaliebereichen [22]

Die Abbildungen 28 und 29 zeigen beispielhaft die mit seismischer Tomographie erkundete Kanalumgebung des Sammlers „Brück-Rath“. Die mittlere Geschwindigkeit der dargestellten seismischen P-Wellen liegt bei ca. 500 m/s. Bereiche, an denen der lokale Geschwindigkeitswert um mehr als 10 bis 15 % von der mittleren Geschwindigkeit abweicht, sind farblich

unterschieden. Die Bereiche mit relativ hoher seismischer Geschwindigkeit deuten auf eine Verfestigung des Untergrundes oder z.B. einen Findling hin. Die Bereiche mit relativ geringer seismischer Geschwindigkeit deuten auf eine Auflockerung oder einen Hohlraum hin.

Zur Auswertung der sich entlang der Oberfläche des Kanalbauwerks ausbreitenden Wellen (Oberflächenwellen), die nur eine geringe Eindringtiefe aufweisen, wurden die Messdaten einer weiteren seismischen Untersuchung gezielt gefiltert. Bei dieser Messung wurden die seismischen Wellen an der Erdoberfläche mit einem 4 kg Hammer erzeugt und die gleichen Messapparaturen verwendet, wie bei der Messung mittels seismischer Tomographie.

Mit Hilfe einer Geschwindigkeitsanalyse der Oberflächenwellen kann die Tiefenlage eines erkannten Verdachtsbereiches abgeschätzt werden. Die Bedeutung als Anomalie wird statistisch aus den Messergebnissen abgeleitet. Die Analyse der Oberflächenwellen bestätigte die Messergebnisse aus der seismischen Tomographie.

Aufbauend auf den Ergebnissen der geophysikalischen Erkundung wurden Sondierungen lediglich in Bereichen mit relativ großen erkennbaren Änderungen in den Messdaten durchgeführt. Auf einer Kanallänge von 32 m reichten 5 Rammsondierungen aus, um ein genaues Bild der Kanalumgebung zu erhalten. Die Ergebnisse der Rammsondierungen bestätigten ebenso wie die durchgeführten Aufgrabungen, dass es sich bei den durch geophysikalische Messungen identifizierten Verdachtsbereichen nur um schwache Anomalien handelte, wie z.B. Wurzelwerk und bindiges Bodenmaterial (vgl. Abbildung 29). Bei der späteren Aufgrabung wurden in den Messquerschnitten nur Anomalien entdeckt, die bereits vorher mit den geophysikalischen Messungen erkannt worden waren.

Bei der Untersuchung des Sammlers „*Ostmerheim*“ [32] sollten insbesondere Informationen über den Wandaufbau und die Umgebung eines Einsteigschachtes gewonnen werden. Dazu wurde der Einsteigschacht mit Georadar in Frequenzen zwischen 225 MHz und 1.200 MHz untersucht. Mit dem Impact-Echo-Verfahren wurden sowohl Messungen im Einsteigschacht als auch im Kanal durchgeführt.

Die Georadarmessungen lieferten zerstörungsfrei eine erste Aussage zur Wanddicke des Einsteigschachtes. Die für einen Bewehrungsstahl typischen Reflexionen traten nicht auf. Daraus wurde abgeleitet, dass es sich um ein unbewehrtes Ortbetonbauwerk handelt. Auch das Vorhandensein von Verbauresten im Boden konnte ausgeschlossen werden. Während die Wanddickenwerte aus dem Impact-Echo-Verfahren im Detail von den Radarergebnissen abwichen, bestätigten sich die Annahme einer Bauwerksumgebung ohne Verbaureste. Zwischenzeitlich konnte der auf dieser Basis freigegebene Rohrvortrieb erfolgreich abgeschlossen werden.

Teil eines IKT-Projektes mit dem Thema „*Versagensmechanismen von profilierten Großrohren aus Kunststoff – Erkennen, Bewerten, Prüfen*“ (vgl. [33]) war der Einsatz geophysikalischer Verfahren mit dem Ziel festzustellen, inwieweit unterschiedliche Bettungsmaterialien erkannt werden können bzw. die Wandstruktur eines profilierten Kunststoffrohrs detektiert werden kann.

Der dazu errichtete Versuchsaufbau bestand aus vier jeweils 3,0 m langen Rohrviertelschalen (Werkstoff: PE 80) der Nennweite DN 1600 mit profilierter Wandung (PKS-Profilkanalrohrsystem, Fa. Frank GmbH). Mit Hilfe des Extrusionsschweißverfahrens wurden die Rohrelemente zu einem Strang verbunden und anschließend abschnittsweise in unterschiedliche Materialien (Kies-Sand 0/8 mm, Kies 8/6 mm, Splitt 2/ mm) gebettet (vgl. Abbildung 30). Die Vorteile der Prüfstrecke im Vergleich zu einem in Betrieb befindlichen Kanal lagen zum einen in der einfachen Zugänglichkeit der Rohrschaleninnenwand. Darüber hinaus lagen sowohl Informationen über das Rohr, d.h. den Werkstoff, das Profil und die Verbindungstechnik, als auch über das Material und die Lage der verschiedenen Bettungsabschnitte vor. Anomalien, wie z.B. Findlinge oder Hohlräume, wurden nicht eingebaut.

Die Mehrzahl der am Markt verfügbaren geophysikalischen Verfahren scheinen für den Einsatz in profilierten Großrohren aus Kunststoff nicht geeignet. Lediglich das Radarverfahren bot sich für den vorliegenden Anwendungsfall an und wurde eingesetzt.

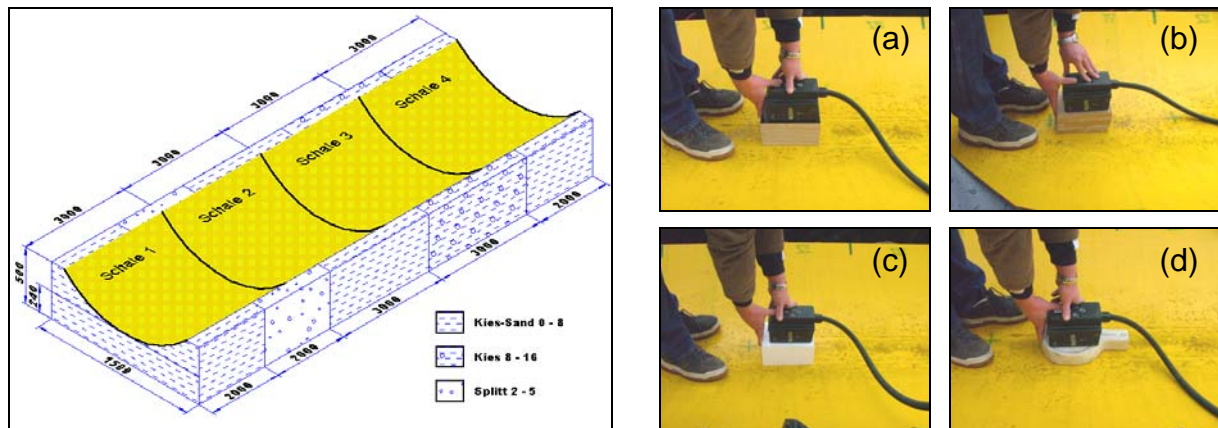


Abbildung 30: Aufbau und Bettung des aus Rohrviertelschalen bestehenden Versuchsaufbaus und Radar-Messungen mit einer 1.200-MHz-Antenne und Abstandhaltern aus unterschiedlichen Materialien [33]

- (a) Abstandhaltern aus Holz, $h = 100 \text{ mm}$
- (b) Abstandhaltern aus MDF-Platte, $h = 100 \text{ mm}$
- (c) Abstandhaltern aus Polystyrol, $h = 100 \text{ mm}$
- (d) Abstandhaltern aus POM-Kunststoff, $h = 50 \text{ mm}$

Im Rahmen der ersten Messkampagne wurden an dem Versuchsaufbau sowohl Längsprofile entlang der Sohle als auch einige Querprofile vermessen. Die Sendefrequenzen lagen bei 900 MHz und 1.200 MHz

Die Auswertung der Messwerte zeigte jedoch, dass die Eindringtiefe der Radarstrahlen geringer war als erwartet. Aus diesem Grund wurde in einer zweiten Messkampagne versucht, die Erkundungstiefe auf die profilierte Rohrwandung einzustellen. Dazu wurden während der Einzelmessungen, deren Weg jeweils in Längsrichtung entlang der Sohle führte, 5 cm bzw. 10 cm hohe Abstandhalter zwischen der 1.200-MHz-Antenne und der Prüfstrecke angeordnet (vgl. Abbildung 30). Bei jeder Messung bestand der Abstandhalter aus einem anderen Material, um bei der Datenauswertung den Einfluss dieses Parameters auf die Ergebnisse berücksichtigen zu können.

Weitere geophysikalische Untersuchungen wurden im Rahmen des Projektes „Qualitäts- und Kostensicherung beim Bau begehbare Abwasserkanäle aus Stahlbetonrohren“ (vgl. [34]) durchgeführt. Ziel war es, das Rissbild von Stahlbetonrohren aufzunehmen. Zum Einsatz kam hier das Ultraschallverfahren (vgl. Abbildung 31).

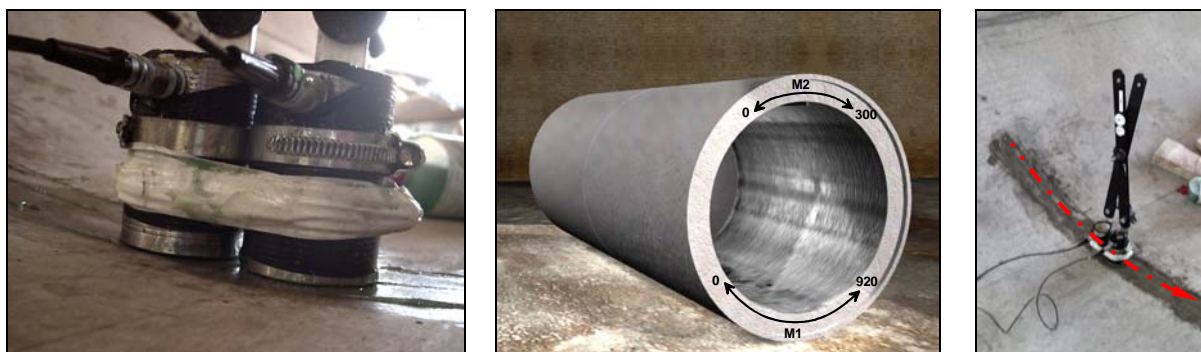


Abbildung 31: Empfangskopf bei Ultraschallmessungen in der Rohrsohle [34], Darstellung der Messgeometrie [35]

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 bzw. Bauteils korrelierbar sind. Bei nur einseitiger Zugänglichkeit eines Bauteils müssen Prüfverfahren eingesetzt werden, die nach dem Echoprinzip arbeiten. Ein angekoppelter Sendeprüfkopf leitet hierbei einen kurzen Ultraschallimpuls in das zu untersuchende Bauteil. Ein Empfangsprüfkopf nimmt die reflektierten Impulsanteile (Echos) von Konstruktionselementen oder Fehlstellen (Reflektoren) auf. 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 [35].

Zur Durchführung der Messungen wurden Ultraschallmessköpfe mit Frequenzen von 40 kHz ausgewählt, da für diesen Frequenzbereich Messweiten von etwa 300-500 mm (Zweiwegentfernung zwischen Messebene und Rückwand) erreicht und somit Risstiefen von größer als 100 mm erfasst werden können. Der Abstand zwischen dem Sende- und Empfangskopf betrug etwa 1 mm [35].

Aus sämtlichen Untersuchungen ([3], [31], [32], [33], [34]) am IKT lässt sich das folgende Fazit ziehen:

- Von den in der IKT-Versuchsstrecke (begehbare Haltung) erprobten Messverfahren waren insbesondere die Verfahren Seismik, Georadar und Impact-Echo in Kombination für den Einsatz im Kanalbauwerk geeignet. Ergänzend erlaubt die seismische Tomographie weitergehende Aussagen über Messquerschnitte zwischen Erdoberfläche und Kanal. Grundsätzlich können somit hinter der Kanalwand liegende Hohlräume, inhomogene Bodenverhältnisse oder Verbaureste in der Kanalumgebung erkannt und lokalisiert werden. Ihre Anwendungsgrenzen finden die Messverfahren in der Regel dann, wenn der zu untersuchende Kanal im Grundwasser liegt [3].
- Abhängig von der jeweiligen Problemstellung reicht ggf. der Einsatz weniger Messverfahren aus, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Ein Beispiel ist der dargestellte In-situ-Einsatz zur Erkennung von Verbauresten mit Hilfe des Georadar- und Impact-Echo-Verfahrens [3].
- Der Erfolg einer Messkampagne hängt grundsätzlich davon ab, ob ein messbarer Unterschied zwischen den physikalischen Eigenschaften einer Störzone oder Anomalie und vergleichsweise ungestörten Bereichen vorliegt. Bei einer Messung im Inneren eines Abwasserkanals kann das Messergebnis wesentlich durch den Rohrwerkstoff beeinflusst werden. Die in der Versuchsstrecke (begehbare Haltung) verbauten Materialien (Mauerwerk, Beton und Stahlbeton) erschweren insbesondere den Einsatz von Verfahren, die auf der Messung des elektrischen Widerstandes beruhen (z.B. Geoelektrik) [3].
- Die Messungen an profilierten Kunststoffrohren haben gezeigt, dass die Radarwellen durch das Rohrmaterial (Grundwanddicke 10 mm) nahezu vollständig absorbiert wurden und somit die Rohrwandung kaum durchdringen konnten. Die untersuchten Rohre ließen demnach weder eine Erkundung des Rohrprofils noch der Bettung mit dem Radarverfahren zu. Dieses Ergebnis kann jedoch nicht grundsätzlich auf alle für den Bau von Abwasserkanälen und -leitungen verwendeten Kunststoffe übertragen werden. Der entscheidende physikalische Parameter für die Ausbreitung und Dämpfung der Radarwellen ist die Dielektrizitätskonstante des Materials [36]. Während die Literatur ausreichende Angaben für natürliche Materialien, Minerale und Böden bereitstellt, stehen entsprechende Informationen für komplexe und variationsreiche Werkstoffe, wie z.B. Kunststoffe, kaum zur Verfügung. Offen bleibt daher, ob hier möglicherweise andere Kunststoffe weitergehende Messungen zulassen [33].

- Der Einsatz des Ultraschallecho-Verfahrens zur Detektion von Rissen und zur Bestimmung der Risstiefen an Stahlbetonrohren hat gezeigt, dass mit den generierten und registrierten Messsignalen optisch bereits erkennbare Risse nicht erfasst wurden. Ursache hierfür sind offenbar die schwer kontrollierbaren Ankopplungsbedingungen der Ultraschallprüfköpfe, die einen relativ starken Einfluss auf das in den Beton abgestrahlte und registrierte Ultraschallsignal besitzen. Somit führen die unterschiedlichen Ankopplungsbedingungen von Ort zu Ort zu einer stärkeren Beeinflussung der registrierten Ultraschallsignale als mögliche Risse mit einer Breite von etwa einem Millimeter. Eine Verbesserung könnte die Verwendung von flächenhaften Registriersystemen (Verwendung von mehr als etwa 4 Registrierprüfköpfe) schaffen, da unterschiedliche Ankopplungsbedingungen durch die sog. Stapelung der registrierten Messsignale (Summierung der Amplituden) ausgeglichen werden können. Weiterhin sollten nach Möglichkeit Ultraschallsendeprüfköpfe entwickelt werden, die Signalfrequenzen von einigen 100 kHz generieren und sich dabei über Distanzen von etwa 500 mm im Beton ausbreiten können. Derartige Ultraschallsignale hätten sowohl das Auflösungsvermögen, als auch die Signalreichweiten, um Risse mit Breiten im Millimeterbereich zu erfassen [35].
- Risse an der Rohraußenseite können mit der heutigen Technik und vertretbarem Aufwand aus dem Rohrinternen heraus nicht erkannt werden [35].
- Die Untersuchung von Kanälen mit geophysikalischen Methoden erfordert ein spezifisches Know-how. Dies gilt insbesondere für die Planung der Messungen und die Interpretation der Ergebnisse. Entsprechende Standards für die Durchführung und Auswertung geophysikalischer Untersuchungen werden derzeit unter der Federführung der DWA erarbeitet (vgl. [4]).

Im Rahmen der beschriebenen Vorhaben wurden zahlreiche der am Markt verbreiteten, geophysikalischen Erkundungsverfahren sowohl in einer begehbaren Versuchsstrecke als auch im Kanalnetz eingesetzt. Die Untersuchungsergebnisse unterstützen aber nicht nur die Auswahl zuverlässiger Methoden für den Einsatz in begehbaren Kanälen, sondern bieten darüber hinaus Perspektiven für die Weiterentwicklung und Miniaturisierung der Gerätetechnik für den nicht begehbaren Bereich.

4 Anforderungsprofil an die Zustandserfassung

Der Einsatz von Inspektions- oder Messverfahren zur Zustandserfassung bedarf vorab der Klärung, welche Zielstellung für eine Zustandserfassung definiert wird. Grundsätzlich können im Rahmen der Zustandserfassung Informationen über

- das Rohr, die Rohrrinnenkontur und den Abnutzungsgrad,
- das Rohr-Boden-System, d.h. das für die Tragfähigkeit der Rohre in der statischen Bemessung angenommene Zusammenspiel zwischen Bodenkörper und Rohr, oder
- den Bodenkörper über der Leitungszone, der einerseits selbst eine Beanspruchung des Rohres verursacht, gleichzeitig aber auch Verkehrslasten dämpft.,

gewonnen werden (vgl. Abbildung 32). Die Zustandserfassung kann als routinemäßige Inspektion, zur konkreten Planung von Sanierungsmaßnahmen oder der Abnahme von Bauleistungen dienen.

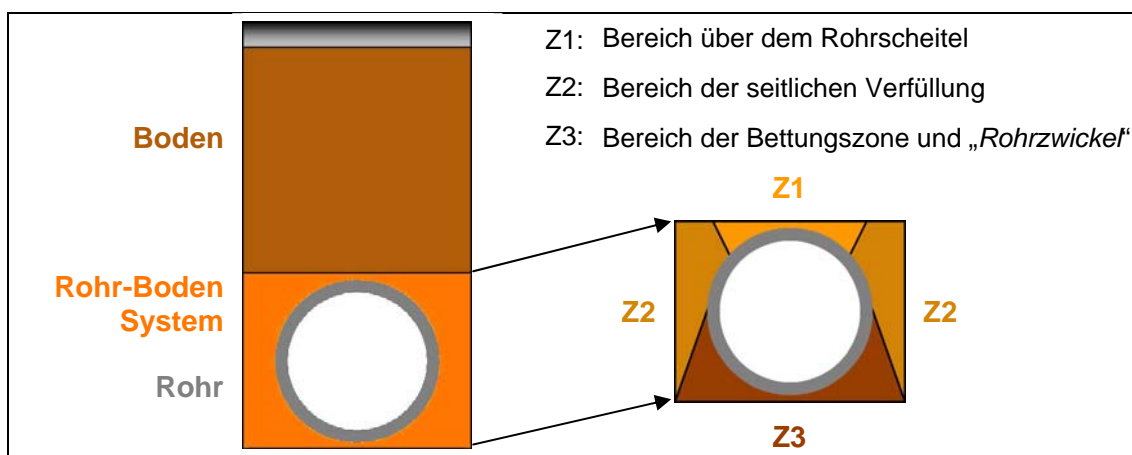


Abbildung 32: Zielobjekt der Inspektion

In vielen Fällen reicht die optische Feststellung des Ist-Zustandes allein nicht aus, um z.B. ein Schadensbild hinreichend zu beschreiben. Daher ist es für die vollständige Erfassung des Ist-Zustandes erforderlich, neben einer qualitativen Zustandserfassung durch eine optische Inspektion auch eine quantitative Zustandserfassung mit Hilfe von Messgeräten durchzuführen. Bei der Schadensbeurteilung, aber auch Entscheidung für ein geeignetes Sanierungsverfahren spielt z.B. die Kenntnis der Bettungsverhältnisse des bestehenden Kanals eine wichtige Rolle, da diese in vielen Fällen ursächlich für die Schäden sind. [15].

Die in Kapitel 5 beschriebenen Verfahren zur Zustandserfassung sind entsprechend dieser Einteilung gegliedert. Die Zustandserfassung des Rohres beinhaltet dabei schwerpunktmäßig Verfahren zur optischen Inspektion der Rohre, aber auch Methoden, die im Bereich der Materialprüfung eingesetzt werden. Die Zustandserfassung des Rohr-Boden-Systems umfasst Verfahren, mit denen z.B. Lagerungsdefekte und Hohlräume im direkten Umfeld der Abwasserrohre, im Bereich der Leitungszone detektiert werden können. Derartige Schadensbilder beeinflussen den bei dem statischen Nachweis der Rohre angesetzten Erd- und Bettungsreaktionsdruck. Die Zustandserfassung des Bereichs Boden beinhaltet den Bereich des Rohrgrabens über dem Rohr bis zur Geländeoberfläche einschließlich des Straßenoberbaus.

In erster Linie von Bedeutung ist es festzustellen, welche Schadenstypen oder Schadensmechanismen im nicht begehbaren Nennweitenbereich hier jeweils von Relevanz sind.

Das DWA Merkblatt M 149 [30] dient der Klassifizierung und Bewertung von Entwässerungssystemen im Rahmen bestehender Anforderungen mit dem Ziel der Festlegung von Sanierungsprioritäten. Als Maßstab zur Einordnung des baulichen und betrieblichen Zustandes von Kanälen der Ortsentwässerung werden Zustandsklassen verwendet.

Zustandsklasse 0	= Sofortmaßnahmen (sehr schwerer Schaden)
Zustandsklasse 1	= kurzfristige Maßnahmen (schwerer Schaden)
Zustandsklasse 2	= mittelfristige Maßnahmen (mittlerer Schaden)
Zustandsklasse 3	= langfristige Maßnahmen (leichter Schaden)
Zustandsklasse 4	= kein Handlungsbedarf (vernachlässigbarer Schaden)

Anders als bei der heute üblichen Inspektionspraxis dienen die nachfolgend beschriebenen Inspektionsverfahren und -methoden nicht allein der Feststellung von Schäden im Sinne der DWA Merkblatt M 143-1 [37] und DWA Merkblatt M 149 [30], sondern vielmehr einer weitergehenden Beurteilung des baulichen und betrieblichen Zustandes. Dazu können im einzelnen, z.B. Schadensbilder, Materialkennwerte und die Geometrie des Kanals erfasst werden.

4.1.1 Rohre

Die Erfassung des Zustandes der Rohre beinhaltet die Beschreibung der Rohrinnekontur und des Abnutzungsgrads des Rohrwerkstoffes. Betrachtet werden hier insbesondere Veränderungen, die ihre direkt Ursache im transportierten Medium oder der Kanalatmosphäre haben, z.B. mechanischer Verschleiß oder Korrosion sowie Abflusshindernisse (vgl. Abbildung 33 und 34)

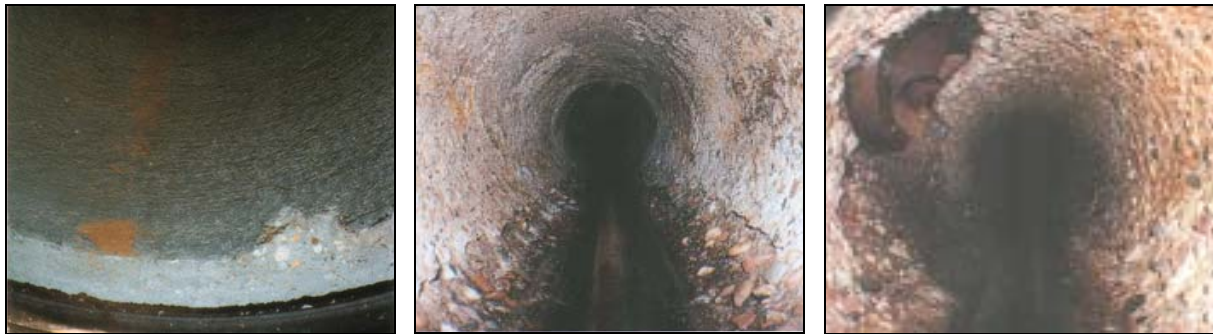


Abbildung 33: Mechanischer Verschleiß und Korrosion [38]



Abbildung 34: Ablagerungen, Abflusshindernisse und Inkrustationen [38], [22]

Die aktuelle Umfrage zum Zustand der Kanalisation in Deutschland der DWA [18] zeigt, dass die Schadensbilder Korrosion und Abflusshindernisse 23 % der Gesamtschäden darstellen (vgl. Abbildung 35).

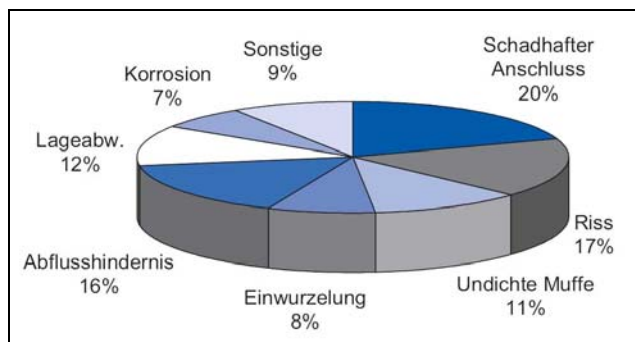


Abbildung 35: Schadensverteilung (Stand 2004) [18]

Eine „vorbeugende“ Inspektion kann bereits die Überwachung der Abwasserzusammensetzung, z.B. mit dem Ziel der Verhinderung einer betonangreifenden Atmosphäre darstellen. Sensoren, die die Beschaffenheit des Abwassers oder die Atmosphäre im Gasraum überwachen, können dem Kanalnetzbetreiber hier Informationen über das Schadensbild Korrosion liefern, noch bevor optisch ein Materialabtrag erkennbar oder messtechnisch erfassbar wird.

Für die Einleitung von Abwasser in öffentliche Abwasseranlagen besteht die gesetzliche Forderung, Schadstoffe durch produktions- und abwassertechnische Maßnahmen auf ein Minimum zu begrenzen. Es ist sicherzustellen, dass die Anlagen in ihrem Bestand und ihrer bestimmungsgemäßen Funktion nicht beeinträchtigt und dass das in ihnen beschäftigte Personal gesundheitlich nicht gefährdet werden. Eine Hauptaufgabe der Abwassertechnik ist deshalb, Abwasser in aerobem, d.h. frischem und sauerstoffreichem Zustand dem Klärprozess zuzuführen. Geht Abwasser in den anaeroben, d.h. sauerstofffreien Zustand über, können aus einem zunächst völlig harmlosen Abwasser neue Probleme, sog. Sulfidprobleme, entstehen (vgl. Abbildung 36 und 37). Sulfidprobleme erfordern eine laufende Überwachung der vorhandenen Bedingungen (z.B. Sauerstoffgehalt, pH-Wert). Durch systematische Abwasseruntersuchungen können kritische Bereiche rechtzeitig identifiziert werden und geeignete Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, bevor es zu einer Schädigung der Kanalbauwerkes kommen muss. Um möglichen Schädigungsmechanismen frühzeitig entgegenzuwirken, kann das Abwasser durch Oberflächenverwirbelung, Einspeisung von Sauerstoff, Sauerstoffperoxid oder Nitrat aerob gehalten werden. Die Zugabe von Kalkhydrat in das Abwasser erhöht den pH-Wert und kann der Sielhautbildung entgegenwirken. Geringe Chlorung zerstört Sulfide, erhöhte Chlorzugabe wirkt hemmend auf die sulfidproduzierenden Bakterien. Durch Zugabe von Eisen-, Kupfer- oder Zinksalz wird gelöstes Sulfid zu unlöslichem Metallsulfid gebunden [39].

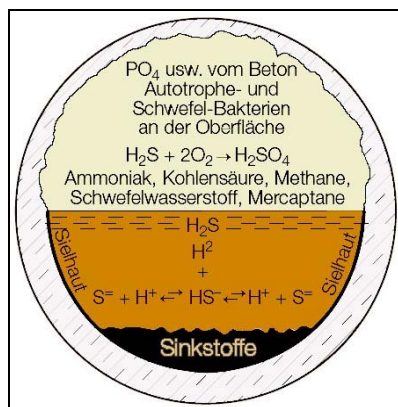


Abbildung 36: Entwicklung von Schwefelsäure [39]

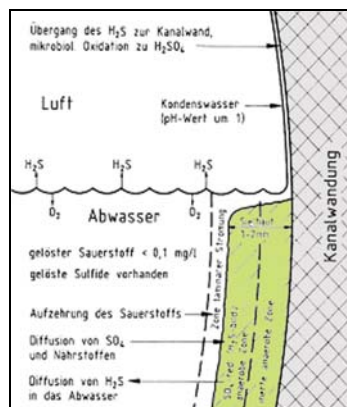


Abbildung 37: H₂S Bildung in Abwasserkanälen bei anaeroben Verhältnissen [40]

Ein weiteres Aufgabengebiet der Zustandserfassung der Rohre stellt die Qualitätssicherung nach Durchführung von Sanierungsmaßnahmen (vgl. Abbildung 38) dar. Stichprobenuntersuchungen sanierter Kanäle (vgl. [41]) haben gezeigt, dass in der Vergangenheit häufig nur geringe oder keine Qualitätsanforderungen an die Schlauchliner gestellt wurden, eindeutige Ausführungsfehler bei Einbau aufgetreten sind und keine Qualitätssicherung bei der Bauausführung durchgeführt wurde. Im Labor vorgenommene Materialuntersuchungen zeigten, dass Schlauchliner z.T. intakt aussahen, aber geforderte Werkstoffkennwerte nicht eingehalten wurden.



Abbildung 38: Ausbau eines Rohres mit einem 10 Jahre alten Schlauchliner, Detaildarstellung des Kontaktbereiches zwischen Schlauchliner und Altrrohr ohne Ringspalt [41]

Bei der Verwendung von Schlauchlinern können bei ungenauer Kalibrierung vor dem Einbau nach der Sanierung Ringspalte zwischen Schlauchliner und Altrrohr vorhanden sein (vgl. Abbildung 39). Diese sind allein optisch nicht zu erkennen. Geeignete Detektionsverfahren könnten hier z.B. im Rahmen der Qualitätssicherung sowie im Zuge der Gewährleistungsabnahme eingesetzt werden.



Abbildung 39: Rohr mit einem 10 Jahre alten Schlauchliner, Detaildarstellung des Kontaktbereiches zwischen Schlauchliner und Altrrohr mit Ringspalt [41]

Verfahren zur Zustandserfassung der Rohre werden in Abschnitt 5.2 dargestellt.

4.1.2 Rohr-Boden System

Bei der Betrachtung des Rohr-Boden- Systems wird der Bodenkörper im direkten Umfeld der Rohre berücksichtigt. Innerhalb dieser Zone kann unterschieden werden zwischen Schäden oberhalb des Rohrscheitels, im Bereich der seitlichen Verfüllung und im Bereich der Bettungszone, insbesondere der „Rohrzwickel“.

Die Herstellung von Kanalisationen in der offenen Bauweise erfolgt durch Ausheben eines Grabens, Verlegen der Leitung im Schutze einer Böschung oder eines Verbaus und anschließendes lagenweises Verfüllen des Grabens und sorgfältiges Verdichten des eingefüllten Materials. Die wichtigste Norm für den Bau von Kanälen in offener Bauweise ist die DIN EN 1610 [9]. Bei dieser Bauweise ergeben sich unterschiedliche Baugrundzonen. Diese werden als ungestörter Baugrund und als Leitungsgraben bezeichnet. Im Leitungsgraben unterscheidet man wiederum zwischen der Bettung, Seitenverfüllung, Abdeckung und Hauptverfüllung. Die Bettung umfasst den Bereich zwischen Grabensohle und der durch den Auflagerwinkel gegebenen Höhe am Rohrumfang. Bei direkter Auflagerung auf gewachsenen Boden gehört auch dieser zur Bettung. Die Abdeckung stellt den Bereich im Leitungsgraben unmittelbar über dem Rohrscheitel dar. Ihre Mindestwerte betragen nach [9] 150 mm über dem Rohrschaft bzw. 100 mm über der Rohrverbindung. Die Seitenverfüllung ist gemäß [9] der Bereich zwischen Bettung und Abdeckung. Der Bereich oberhalb der Abdeckung bis zu einer gegebenenfalls vorhandenen Straßen- oder Gleiskonstruktion wird als Hauptverfüllung bezeichnet. Je nach Erfordernis sind unterschiedliche Grabenquerschnitte vom geböschten Graben bis hin zu Gräben mit senkrechten Wänden möglich. Die Mindestbreite von Rohrgräben ist in DIN EN 1610 [9] festgelegt. Das Rohrauflager soll eine gleichmäßige Druckverteilung sicherstellen und muss daher in Anpassung an die Werkstoff- und Verbindungsart der einzelnen Rohre ausgebildet sein.

Als Voraussetzung für alle weiteren Arbeitsgänge wird zunächst eine stabile und feste Unterlage zur Aufbringung der Rohrleitung geschaffen, um spätere Bodensetzungen und Rohrverschiebungen zu vermeiden. Nach erfolgter Rohrauflagerung ist die Einbettung der Rohre herzustellen. Dabei gilt der Grundsatz, dass die eingebaute Rohrleitung mit Bodenmaterial umgeben sein muss, dessen Zusammensetzung (z.B. Größtkorn 20 mm; kein Brechsand oder Splitt > 11 mm) im Hinblick auf die mechanische Widerstandsfähigkeit der Rohre und der Rohrumhüllung geeignet ist. In Verkehrsflächen ist nach [42] für den Bereich der Leitungszone, also bis 300 mm über Rohrscheitel, ein gut verdichtbarer Füllboden einzubringen, sofern nicht besondere Vereinbarungen oder Anforderungen vorliegen. Die Einbettung ist lagenweise einzubauen und ausreichend zu verdichten. Bei Außendurchmessern der Rohre von mehr als 400 mm muss die Leitungszone in mehr als zwei Arbeitsgängen verfüllt und verdichtet werden. Bereiche der Leitungszone, die sich nicht einwandfrei verfüllen und verdichten lassen (z.B. Zwickel unter beengten Verhältnissen), sind mit Beton, Porenleichtbeton oder einem Boden-Bindemittel-Gemisch zu verfüllen [43]. Rohrleitungen werden im allgemeinen auf einer vorbereiteten ebenen Auflagerfläche oder unmittelbar auf der Grabensohle verlegt. Das Auflager selbst wird durch Unterstopfen mit verdichtungsfähigem, nichtbindigem Material hergestellt. Unterhalb des Rohres verbleibt ein sog. Zwickelbereich, der besonders in schmalen Rohrleitungsgräben durch eine eingeschränkte Erreichbarkeit erhebliche Schwierigkeiten bei der Unterstopfung und Verdichtung mit sich bringt.

Insbesondere die Lagerung und Bettung der Rohre stellt eine Grundvoraussetzung für die Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit des Kanalbauwerkes. Von besonderer Bedeutung ist daher die Einhaltung der in der statischen Berechnung getroffenen Annahmen, z.B. Auflagerwinkel. Verdichtungskontrollen zur Qualitätssicherung bzw. Abnahmeprüfungen sparen den besonders wichtigen Zwickelbereich der Rohre in der Regel aus (vgl. Abbildung 40).



Abbildung 40: Herstellung der Verdichtung der Rohrbettung (Zwickelbereich) [44]

Die Zustanderfassung sollte hier bereits damit beginnen, nach Abschluss der Baumaßnahme den Ist-Zustand des Bauwerkes zu dokumentieren.

Für den fachgerechten Einbau der Rohrleitung ist für die obere Bettungsschicht eine Lagerungsdichte herzustellen, die mindestens der Lagerungsdichte der unteren Bettungsschicht entspricht. Hierbei ist das Beistopfen im Bereich der seitlichen Rohrzwickel mit besonderer Sorgfalt durchzuführen. Der Einsatz von schmalen, dem Rohrliniendurchmesser angepassten, Handstampfern ist in der Regel hier unumgänglich [45]. Die bestehenden Schwierigkeiten bei der Verdichtung des Zwickelbereichs haben in der Praxis dazu geführt, dass häufig das einzubauende Bodenmaterial bis auf Höhe des Kämpfers geschüttet wird und anschließend eine Bodenverdichtung erfolgt (vgl. Abbildung 4) [46]. Dies geschieht in der Hoffnung, dass die Bodenverdichtung bis in den Zwickelbereich hineinreicht. Es wird deutlich, dass eine solche Verdichtungsart oftmals nicht den Forderungen des Norm- und Regelwerkes nach einem definierten Verdichtungsgrad im Zwickelbereich, der dem des Bodens unterhalb des Rohres entspricht, gerecht wird [46]. Neben dem Einsatz von Schüttgütern als Verfüllmaterial bieten sich daher fließfähige selbststabilisierende Verfüllstoffe zur Herstellung der Leitungszone an. Eine detaillierte Beurteilung verschiedener Materialien findet sich in [47].



Abbildung 41: Verdichtung der Seitenverfüllung und Abdeckung [48]



Abbildung 42: Einbau eines flüssigen, selbstverdichtenden Verfüllmaterials [49]

Fließfähige Verfüllmaterialien (vgl. Abbildung 42) zeichnen sich dadurch aus, dass sie nach ihrer Herstellung für eine gewisse Zeit in einem fließfähigen Zustand verbleiben und sich danach durch einen gezielten Abbindeprozess stabilisieren bzw. verfestigen. Die Plastizität sowie die zu erreichenden Festigkeiten sind meist einstellbar und werden auf die aus unterschiedlichen Anwendungsfällen resultierenden Anforderungen angepasst. Diese fließfähigen Verfüllmassen sind in ihrer Herstellung und Verarbeitung vergleichbar mit Mörtel und Fließ-

estrich, unterscheiden sich aber z. T. in ihren Ausgangs- und Zusatzstoffen und je nach Anwendungsgebiet in ihren Endprodukteigenschaften.

Im Bestand werden im Rahmen der optischen Inspektion Schadensbilder aufgenommen, deren maßgebende Ursache außerhalb des Kanals liegen kann. Hier zu nennen sind Rohrbruch und Einsturz, Verformungen (vgl. Abbildung 43), Lageabweichungen oder Rissbildung (vgl. Abbildung 44).



Abbildung 43: Rohrbruch, Einsturz und Verformung [38], [22]

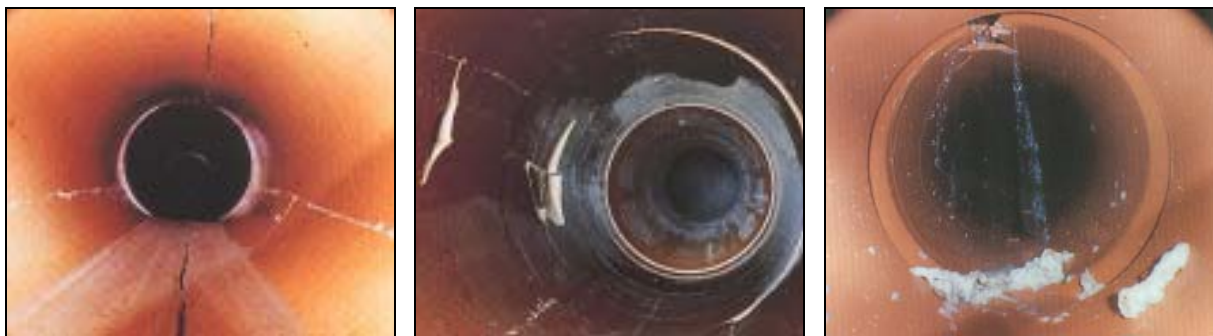


Abbildung 44: Risse, Scherbenbildung und Lageabweichungen [38]

Spätestens dann, wenn Lageabweichungen, Scherbenbildung, Risse oder große Verformungen erkannt werden, bedarf es der Betrachtung der Umgebung der Rohre, um sicher festzustellen, welches Schadensausmaß vorliegt. Die aktuelle Umfrage zum Zustand der Kanalisation in Deutschland der DWA [18] zeigt, dass diese Schadensbilder mindestens 29 % der Gesamtschäden darstellen (vgl. Abbildung 35).



Abbildung 45: Schadhafter Anschluss, undichte Rohrverbindung und einragende Dichtungen [38], [22]

Ebenfalls Einfluss auf den Zustand des Rohr-Boden Systems können undichte Rohrverbindungen und schadhafte Anschlüsse haben (vgl. Abbildung 45). Nach [18] machen diese Schadensbilder allein 31 % aller Kanalschäden aus (vgl. Abbildung 35).

Die Schadensursache kann z.B. durch die in der Vergangenheit verwendeten mangelhaften Dichtungsmaterialien (z.B. Teerstricke) oder Einbaufehler begründet sein. Im Rahmen der Schadensstatistik wird nicht aufgeführt, inwieweit diese Schadensbilder zu Bodeneinspülungen und zur Entstehung von Lagerungsdefekten bis zur Hohlbildung außerhalb des Kanals geführt haben.

Ein weiteres Schadensbild, dessen Ursache außerhalb des Kanals liegt, ist der Wurzeleinwuchs. Das Schadensbild selbst ist dadurch definiert, dass die Wurzeln in den Kanal hinein wachsen (vgl. Abbildung 46). Nach [18] beträgt der Anteil des Wurzeleinwuchses an den festgestellten Gesamtschäden 8 %.



Abbildung 46: Wurzeleinwuchs in den Kanal [38]

Nicht berücksichtigt ist dabei, dass Baumwurzeln bereits vor dem erkennbaren Einwachsen in den Kanal im Bereich der Leitungszone zu erheblichen Beeinträchtigungen führen können (vgl. Abbildung 47).



Abbildung 47: Wurzeleinwuchs in der Leitungszone [50]

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass bei mindestens 68 % der nach [18] dokumentierten Kanalschäden auch Schäden an dem, den Kanal umgebenden Bodenkörper nicht auszuschließen sind.

Zur Behebung von Undichtigkeit werden häufig Sanierungsverfahren wie z.B. das Schlauchlining eingesetzt. Sind hinter der Kanalwand Hohlräume vorhanden, wird durch den Einbau eines Schlauchliners jedoch nur der sichtbare Schaden behoben. Die Fremdwasserzufuhr wird gestoppt, die Gefahr von Tagesbrüchen bleibt jedoch erhalten. Daher sollten mögliche Hohlräume im Bereich der Undichtigkeit zuvor verfüllt werden. Dazu müsste jedoch die Lage und Ausdehnung eines Hohlraumes bekannt sein sowie der Erfolg der Verpressung im Rahmen der Qualitätssicherung überprüft werden.

Im Bereich der Undichtigkeiten oder der vermuteten Hohlräume werden durch die Kanal- oder Bauwerkswandungen Bohrungen hergestellt. In diese Bohrungen werden anschließend Injektionslanzen oder -stutzen eingesetzt, über die das Injektionsmittel eingebracht wird. Bei typischen Längsrissen wird das Injektionsmittel im Allgemeinen durch in den Kämpfern eingesetzte Injektionspacker eingepresst. Der Injektionsvorgang wird abgebrochen, wenn das Injektionsmittel aus den Rissen wieder austritt [51]. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass die Hohlräume vollständig verfüllt sind.

In Abschnitt 5.3 werden Verfahren zur Zustandserfassung des Rohr-Boden-Systems beschrieben.

4.1.3 Boden

Ein weiteres Zielgebiet der Zustandserfassung stellt die Untersuchung des Bodenkörpers über der Leitungszone dar. Die Überschüttung der Rohre verursacht schon durch ihr Eigengewicht eine Beanspruchung der Rohre. Darüber hinaus werden durch sie Verkehrslasten gedämpft und entsprechend dem wirkenden Lastausbreitungswinkel im Erdreich verteilt. Auch die Qualität der Überschüttung beeinflusst somit die Beanspruchung des Kanalbauwerkes.

Von Bedeutung ist auch hier die Einhaltung der in der statischen Berechnung getroffenen Annahmen, auch über die Bauabnahme hinaus. Nach [9] darf die sachgemäße Ausführung der Leitungszone durch Verdichtungskontrollen oder Messungen der Rohrverformungen geprüft werden. Die Prüfung der Hauptverfüllung muss durch eine Verdichtungskontrolle erfolgen. Die Ergebnisse der aus dem Grundbau bekannten „klassischen“ Verfahren, z.B. Rammsondierung oder Lastplattendruckversuche, können einen Bodenkörper allerdings nur punktuell beschreiben (vgl. Abbildung 48 und 49). Eine über die Haltungslänge kontinuierliche Prüfung der Verdichtung ist nicht möglich. Bei der Neuverlegung von Abwasserkanälen und –leitungen kann dies möglicherweise dadurch ausgeglichen werden, dass insbesondere kritische Bereiche, z.B. am Abzweigen, Hausanschlüssen oder Schachtbauwerken, geprüft werden.



Abbildung 48: Verdichtungskontrolle durch Rammsondierung [44]



Abbildung 49: Verdichtungskontrolle durch einen Lastplattendruckversuch [22]



Lagerungsdefekte und Hohlräume im Bereich der Hauptverfüllung können aus Schadensbildern im Bereich der Kanalisation hervorgehen, indem diese sich möglicherweise bis in den Straßenoberbau fortpflanzen. Ebenso kann eine Schadensursache in der Verlegung oder dem Betrieb anderer Leitungen liegen. Diese Schadensbilder kündigen sich nicht durch die bei der Kanalinspektion gewonnenen Hinweise wie Undichtigkeiten oder Bodeneinspülungen an.

Im Bestand ist es kaum möglich, Bereiche mit Auflockerungszonen oder Hohlräumen zu erkennen, um gezielt zu sondieren. Diese Bereiche müssen erst mittels geeigneter flächig arbeitender Erkundungsverfahren detektiert werden. Erst dann ist eine punktuelle Verifizierung der Messung an diese Stellen sinnvoll. Der Einsatz z.B. geophysikalischer Verfahren ohne anschließende Sondierung kritischer Bereiche scheint nicht zielführend, da in der Regel relative Veränderungen des Bodenaufbaus oder der Verdichtung erkannt werden, nicht aber absolute Werte des Verdichtungsgrades.

In Abschnitt 5.4 werden Verfahren zur Zustandserfassung des Bodens beschrieben.

5 Stand der Technik der Zustandserfassung

5.1 Zielstellung

Die Zustandserfassung und -bewertung besitzen im Rahmen der Instandhaltung von Entwässerungssystemen eine zentrale Bedeutung. Nur bei Kenntnis des Ist-Zustandes, möglicher Schäden und deren Ursachen lassen sich geeignete Unterhaltungs- und Sanierungsmaßnahmen wählen.

Die Zustandserfassung von Kanälen setzt sich in der Regel aus den zwei getrennten Arbeitsschritten optische Inspektion und Bewertung zusammen. Im ersten Schritt wird der Kanal optisch inspiziert. Bei nicht begehbaren Kanälen (< DN 800) kommen dabei häufig Kanalfernseh-Systeme zum Einsatz. Im zweiten Schritt bewertet der Inspekteur den Ist-Zustand der Kanäle auf der Basis der Bildinformationen. Dazu werden den beobachteten Abweichungen vom Soll-Zustand des Kanals standardisierte Schadenstypen zugeordnet.

Das Regelwerk Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) enthält mit dem Merkblatt M 143 ein in Deutschland häufig angewandtes Schadensklassifizierungssystem. Während in Teil 1 des Merkblattes ATV-M 143 [37] Schadenstypen, mögliche Schadensursachen und -folgen grundsätzlich beschrieben sind, enthält Teil 2 dieses Merkblattes [52] genaue Vorgaben hinsichtlich der Zustandsbeschreibung.

Nach [53] kann die Verwendung eines Zustandsbildreferenzkatalogs (vgl. z.B. [38]) zur Zustandserkennung als empirisches Verfahren bezeichnet werden. Die darin enthaltenen Musterbilder und Erläuterungen sind nach [53] jedoch nicht geeignet, Beziehungen zu den jeweiligen Verursachern von Schäden herzustellen oder Zusammenhänge zwischen mehreren Schäden darzustellen. Ergebnis der Inspektion ist lediglich die Aufnahme eines Resultats. Der Auslöser, der zu einem Schaden geführt hat, und der es erst ermöglicht, zweifelsfrei einen Schaden oder die Zusammenhänge zwischen mehreren Schäden zu erkennen, wird nicht bestimmt. Eine hiervon abweichende Interpretation der Zustandbewertung wird in [53] dargestellt. Nach einem „Ursache-Wirkungs-Prinzip“ (vgl. Abbildung 50) werden „Globalen Verursachern“ ihre arttypischen Zustände (Schäden), für die sie verantwortlich sind, zugeordnet. Hier erfolgt eine prinzipielle Unterteilung der Schadensbilder in primäre und sekundäre Schäden. Es wird aufgezeigt, dass eine Undichtigkeit in der Regel „sekundärer“ Natur ist, da sie stets die Folge eines „primären“ Schadens ist.

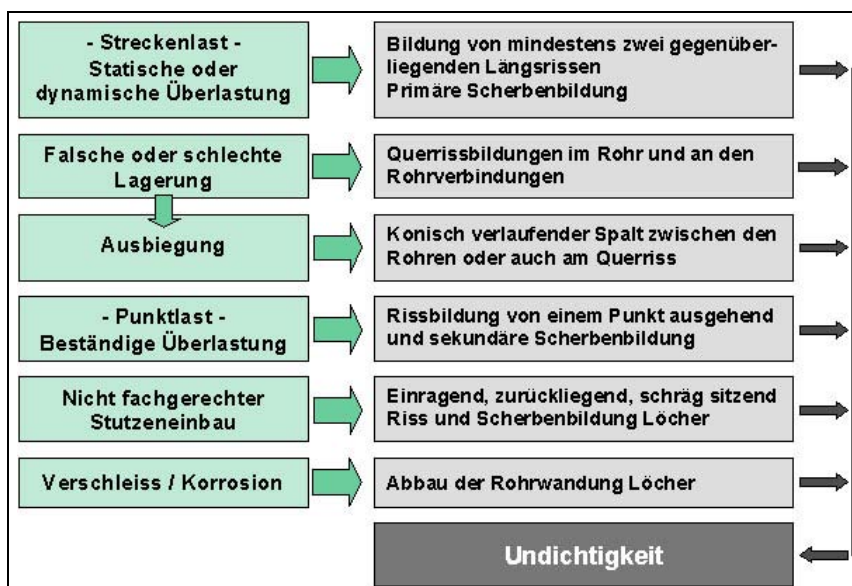


Abbildung 50 : „Ursache-Wirkungs-Prinzip“ von Schadensbildern, nach [53]

Nach [53] stellt der nicht erkannte Unterschied zwischen einem „Primärschaden“ und einem „Sekundärschaden“ im Erkennen und in der Erfassung eine der häufigsten Fehlerquellen in der Dokumentation dar. Die Einstufung eines Schadensereignisses ist jedoch von entscheidender Bedeutung, da sich aus diesem Ergebnis unterschiedliche Lösungen z.B. für die Sanierung ergeben können.

Nachfolgend werden unterschiedliche Verfahren zur Zustandserfassung dargestellt, mit denen Schadensbilder primärer oder sekundärer Natur erkannt und Informationen über die Schadensursache gewonnen werden können.

5.2 Verfahren zur Untersuchung des Rohres

5.2.1 Optische Verfahren

In Nordrhein-Westfalen fordert die Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen [1] bzw. der Runderlass „Anforderungen an den Betrieb und die Unterhaltung von Kanalisationsnetzen“ [2] die planmäßige, regelmäßige und systematische Erfassung des baulichen und betrieblichen Zustandes der Kanalisation. Diese erfolgt qualitativ mit Hilfe optischer Verfahren und quantitativ durch Einsatz geeigneter Mess- und Prüfverfahren [8].

Die Entwicklung der optischen Inspektionsverfahren im nicht begehbaren Nennweitenbereich reicht vom einfachen Durchschauen über die Kanalspiegelung, die Kanalfotografie, die Kanalverfilmung bis zum heutigen Kanalfernsehen (vgl. [53]). Zum Einsatz kommen dabei ferngelenkte, über mehrere Achsen angetriebene Fahrwagen, die häufig über integrierte Sensoren z.B. zur elektronische Neigungs- und Temperaturmessung oder Drucküberwachung, verfügen. Mittels Hubeinrichtung können die einzelnen Systeme in Rohren unterschiedlicher Nennweite eingesetzt werden. Die Fahrwagen sind in der Regel mit Dreh-/ Schwenkkopfkameras ausgestattet.

Kanalfernseh-Systeme für den nicht begehbaren Nennweitenbereich werden von einer Vielzahl von Anbietern bereitgestellt. Hersteller von TV-Inspektionssystemen im deutschsprachigen Raum sind insbesondere

- Cabere GmbH, Wermelskirchen (www.cabere.de)
- GE Inspection Technologies (EversetVit), Hürth (www.geinspectiontechnologies.com)
- Gejos GmbH, Kempten (www.gejos.de)
- Gullyver GmbH, Bremen (www.gullyver.de)
- Ibak - Helmut Hunger GmbH, Kiel (www.ibak.de)
- IOGIS Knobbe oHG, Essen (www.iogis.de)
- ipek GmbH, Hirschegg (www.ipek.at)
- itv - gesellschaft für industrie-tv mbH, Betzigau (www.itv.de)
- JT-elektronik GmbH, Lindau (www.jt-elektronik.de)
- NICOM Technologie, Sulzberg (www.nicom-electronic.de)
- OPTIMESS GmbH, Gera (www.optimes.com)
- OPTOMAX Vertriebsgesellschaft, Fellbach (www.optomax.eu)
- Radiodetection CE, Emmerich
- RICO EAB, Kempten (www.rico-eab.de)
- RITEC Rohrinspektionstechnik GmbH, Haldenwang (www.ritec-tv.de)
- TV-IS GmbH, Winnenden Birkmannsweiler (www.tv-is.de)
- Wolfgang Rausch GmbH, Weißenberg (www.rauschtv.de)

Die Abbildung 51 zeigt beispielhaft 3 aktuelle Modelle von TV-Inspektionssystemen.

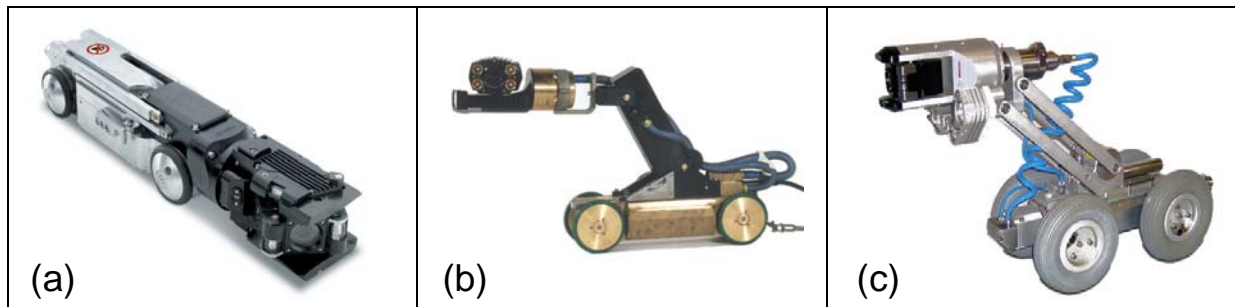


Abbildung 51: TV-Inspektionssysteme

- (a) Kamerafahrwagen KRA 75 für den Einsatz in Kanälen ab der Nennweite DN 150, ausgestattet mit einer Schwenkkopfkamera System Argus mit integriertem Laser zur Durchmesserbestimmung, Temperaturfühler und optionaler Ex Zulassung [54]
- (b) Kamerafahrwagen Turbo II-ex für den Einsatz in Kanälen ab der Nennweite DN 350, exgeschützte Ausführung mit Sensoren zur elektronischen Neigungs- und Temperaturmessung sowie Drucküberwachung, ausgestattet mit einer Dreh-/ Schwenkkopfkeras Typ Rota-RZL [55]
- (c) Kamerafahrwagen FW200 mit Hubeinrichtung für den Einsatz in Kanälen ab der Nennweite DN 400 mit integrierten Neigungssensoren, Kippschutz sowie einer internen Temperatur- und Drucküberwachung, ausgestattet mit einer Schwenk-/Roto-Kamerasonde SR100 Zoom [56]

Die Abbildung 52 gibt einen Überblick über weitere TV-Inspektionssysteme.

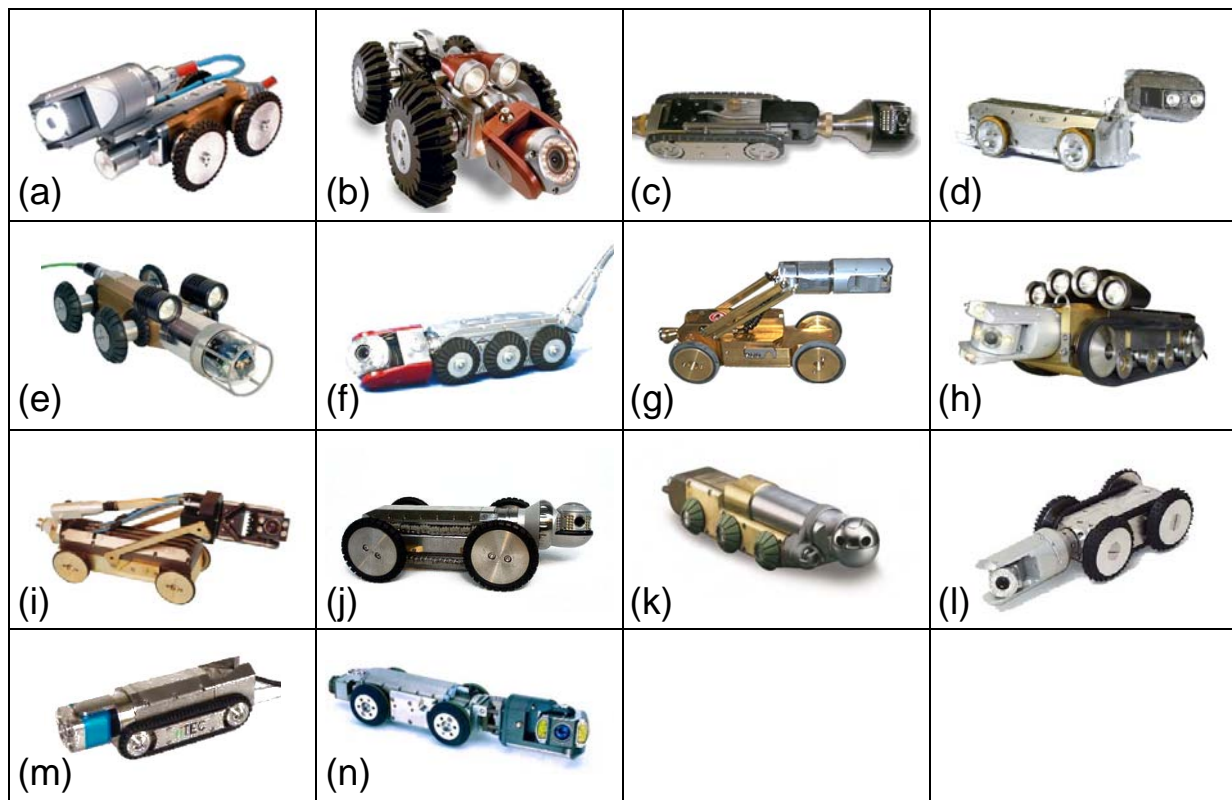


Abbildung 52: TV-Inspektionssysteme

- (a) Inspektionssystem CX7500, Nennweitenbereich: DN 75 bis zu DN 500, ausgestattet mit einer Dreh-/Schwenkkopfkamera [57]
- (b) Rover 600, basierend auf einen Fahrwagen FW125 der Fa. IPEK, Nennweitenbereich: DN 150 bis DN 400, ausgestattet mit einer SUPERVISION-Kamera [58]
- (c) Raupenfahrwagen, Nennweitenbereich: ab DN 300, ausgestattet mit einem Schwenk-Kamerakopf [59]
- (d) Rohrinspektionssystem Gullyver, akkubetriebener Fahrwagen Nennweitenbereich: DN 200 bis DN 1200, ausgestattet mit einer digitalen Farbe- Schwenkkopfkamera [60]
- (e) Mini Pipe Cruiser, Nennweitenbereich: ab DN 80, ausgestattet mit einer Schwenkkopfkamera mit Laser- vermessungskopf [61]
- (f) Fahrwagen FW95 SV Nennweitenbereich: DN 100 bis DN 300, ausgestattet mit einer SUPERVISION- Kamera [62]
- (g) Fahrwagen CT 250 W, Nennweitenbereich: DN 250 bis DN 1500, ausgestattet mit einer Farbschwenk- kopf-Zoomkamera [63]
- (h) Raupenfahrwagen ROB200, Nennweitenbereich: bis DN 400, ausgestattet mit einer Schwenk- Rotationskamera [64]
- (i) Fahrwagen KFW200A, Nennweitenbereich: DN 200 bis DN 1400, ausgestattet mit einer Dreh- und Schwenkkopf-Farbkamera [65]
- (j) Fahrwagen CC100-4, Nennweitenbereich: bis DN 400 ausgestattet mit einer Schwenkkopfkamera [66]
- (k) Fahrwagen P42, Nennweitenbereich: ab DN 150, ausgestattet mit einer digitalen Schwenkkopfkamera [67]
- (l) Fahrwagen FW100, Nennweitenbereich: ab DN 100, ausgestattet mit einer Schwenkkopf-Farbkamera [68]
- (m) Fahrwagen FW6 Plus, Nennweitenbereich: ab DN 100, vorbereitet für eine Roto-Schwenk-Kamera [69]
- (n) Fahrwagen L150, Nennweitenbereich: DN 150 bis DN 1000, ausgestattet mit einer Kreis- und Schwenk- kopfkamera [70]

Darüber hinaus werden TV-Inspektionssysteme auch durch weitere internationale Anbieter angeboten. Die Systeme bestehen ebenfalls aus unterschiedlichen, mit Kamertechnik ausgestatteten Fahrwagen. Anbieter sind z.B.:

- Aries Industries, Waukesha WI, USA (www.ariesind.com)
- Cobra Technologies Smyrna GA, USA (www.cobratec.com)
- Exavision, Nîmes, Frankreich (www.exavision.fr).
- IBOS s.r.o., Dobrovodská, Czech Republic (www.ibos.cz)
- Empire Industries, Inc., Arlington TX , USA (www.sewerrat.com)
- RoboProbe Technologies, Inc., Palatine IL, USA (www.roboprobe.com)
- Scanprobe/Renoline Ltd. Warlingham, UK (www.scanprobe.com)
- TARIS Corporation, Moscow, Russia (www.taris.ru)

Die Abbildung 53 zeigt beispielhaft Systeme dieser Anbieter.

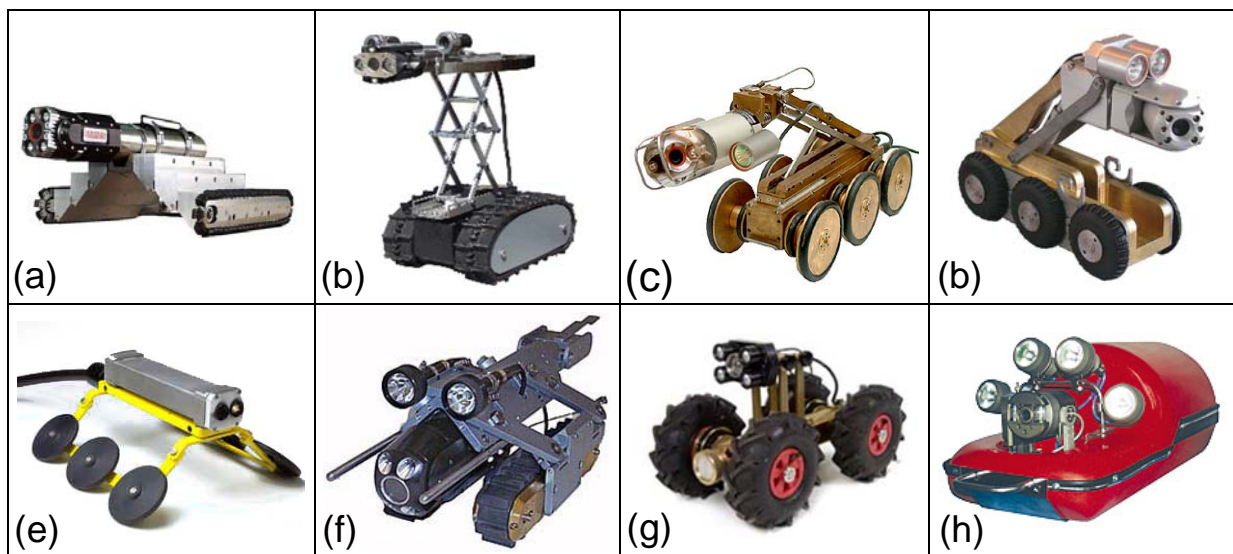


Abbildung 53: TV-Inspektionssysteme

- (a) Inspektionsplattform TR2000 [71]
- (b) Steerable Crawler zur Inspektion von Abwasserkanälen der Nennweite DN 300 bis DN 3000 [72]
- (c) Robot VECTOR geeignet zur Inspektion von Abwasserkanälen ab der Nennweite DN 150 bis DN 800 mit einer Schwenkkopfkamera ausgestattet. [73]
- (d) Inspektionssystem Revi 1200 für die Inspektion von Abwasserkanälen der Nennweite DN 200 bis DN 1200 ausgestattet mit einem Drehbarer und kipparer Kamerakopf [74]
- (e) Sewer Rat Camera System zur Inspektion von Abwasserkanälen der Nennweite DN 375 bis DN 600 [75]
- (f) Kamerafahrwagen VersaTrax 150 für die Inspektion von Abwasserkanälen ab der Nennweite DN 250 ausgestattet mit einer Videokamera [76]
- (g) Fahrwagen Colourprobe 1000 zur Inspektion von Abwasserkanäle der Nennweite DN 150 bis DN 1000 [77]
- (h) Floating Module W100 geeignet für die Inspektion von teilgefüllten Abwasserkanälen der Nennweite DN 400 bis DN 1200 [78]

Neben dem „traditionellen“ Kanalfernsehen (CCTV-Kameras) werden aktuell vermehrt digitale Systeme angeboten, die eine höhere Inspektionsgeschwindigkeit versprechen.

Ein Beispiel ist hier das seit 2003 angebotene System PANORAMO der IBAK Helmut Hunger GmbH, Kiel. Bei diesem Inspektionssystem handelt es sich um einen 3D Kugelbildscanner, bei dem zwei unbewegliche, hochauflösende digitale Fotokameras mit 186°Weitwinkel-

objektiven (spezielle Fischaugenlinse) verwendet weder. Die Kameras sind jeweils am vorderen und hinteren Gehäuseteil angeordnet. Computergesteuert werden bei der Rohrinspektion mit bis zu 35 cm/s Fahrgeschwindigkeit in 5 cm-Intervallen jeweils am gleichen Punkt des Rohres halbsphärische Einzelbilder fotografiert und zu sogenannten Kugelbildern zusammengesetzt. Eine rechnergestützte Bildaufbereitung erlaubt es, eine kontinuierlich ablaufende Bildfolge darzustellen. Neben der perspektivischen ist auch eine zweidimensionale Abwicklung der Rohrwand darstellbar.



Abbildung 54: Inspektionssysteme PANORAMO und ARGUS [54]

Die Aufgabe des Bedieners beschränkt sich auf das Einsetzen bzw. die Entnahme der Kamera und die Funktionsüberwachung während der Inspektion. Die PANORAMO-spezifische Bildaufnahmetechnik erfordert keine Stopps zur Schadensaufnahme. Außerdem ist das System nicht an die, für herkömmliche Videosysteme vorgegebene Höchstgeschwindigkeit von 15 cm/s (vgl. [52]) gebunden. Die Auswertung und Schadenscodierung erfolgt nach Abschluss der Inspektion in einem gesonderten Arbeitsprozess im Büro [79].

Tabelle 1: Bewertung der Bildqualität und -schärfe anhand beispielhaft ausgewählter Schadensbilder/Anlagenteile [79]

Schadenbild / Anlagenteil / Phänomen	ARGUS 4	PANORAMO	
		Perspektive	Abwicklung
Stützen, einragend	+	++	++
Wurzeleinwuchs	++	+	++
Riss im Verbindungsbereich	++	+	+
Querriss	++	+	+
Scherbenbildung	+	+	+
Inkrustation	++	+	++
Einsturz	++	++	++
Abzweig	++	+	0
Abzweig verschlossen	+	+	+
Abflusshindernis im Abzweig	++	+	0
Absturzbauwerk	++	+	0
Nennweitenveränderung	++	++	+
Gekrümmte Linienführung	+	+	0
Einsteigschacht	++	-	-

- ++ Alle relevanten Details sind tiefenscharf und optimal ausgeleuchtet (Aufnahme optimal)
- + Schaden/Anlagenteil/Phänomen ist zu erkennen, Details sind weniger gut zu erkennen (Aufnahme o.k.)
- 0 Nur Abwicklung: keine zusätzlichen Erkenntnisse
- Bild ist nicht verwertbar (Aufnahme ist nicht brauchbar)

Ein Vergleich des digitalen Inspektionssystems PANORAMO mit einem „traditionellen“ TV-Inspektionssystem (vgl. Abbildung 54) findet sich in [80]. Eine aus dieser Studie folgende

zusammenfassende Übersicht und Bewertung einiger Fallbeispiele hinsichtlich Bildqualität und -schärfe enthält die Tabelle 1. Die durchgeführten Vergleichsuntersuchungen mit den Inspektionssystemen ARGUS 4 und PANORAMO zeigten, dass beide Systeme bei fachgerechter und sorgfältiger Handhabung die Anforderungen an die optische Zustandserfassung und -beschreibung von Abwasserleitungen und -kanälen nach Arbeitsblatt M 143-1 [37] und -2 [52] erfüllen [80]. Die in den untersuchten Haltungen vorhandenen Schäden, Objekte und Anlagenteile konnten erfasst und qualitativ beurteilt werden.

Ein weiteres aktuelles Produktbeispiel für die optische Inspektion stellt das System SPHERIX der JT–elektronik GmbH (vgl. Abbildung 55) dar. Mit diesem System werden nach [55] die darstellungstechnischen Möglichkeiten hochauflösender „analoger“ Kameraoptiken mit den zusätzlichen Optionen, die die aktuelle Technik des vollflächigen scannens der Rohrwand mit einer hoch auflösenden Digitalkamera bietet, kombiniert. Zunehmend wird von Auftraggebern neben der lückenlosen digitale Erfassung der Rohrwand zusätzlich die Option einer „Abwicklungsdarstellung“ gefordert. Dabei wird die Rohrwand aus der räumlichen Dimension auf eine flächige Darstellung reduziert. Bei dem System SPHERIX wird die Kanalhaltung bei der Befahrung zunächst mit einem sphärischen Frontobjektiv digital gefilmt. Der Inspekteur hat zusätzlich die Möglichkeit mit einer seitlich in den Objektivkörper integrierten Schwenkopptik Detailbereiche wie Muffen und Hausanschlüsse zu inspiziert. Im Rückwärtsgang folgt mit konstanter Fahrgeschwindigkeit der digitale sphärische Scan des Kanals. Speziell zur Deformationsmessung im Kanal dient ein integriertes Zweikreis-Lasermesssystem, das an jeweils 12 Messpunkten den Abstand zur Rohrwand ermittelt. Nach der Inspektion stehen zwei separate Datensätze zur Verfügung. Zum einen der Digitalscan, aus dem sich rechnerisch eine herkömmliche axiale Rohrbefahrung einschließlich beliebiger Schwenks und digitaler Zooms generieren lässt, zum anderen eine plane Darstellung der Rohrwand in einer Breite von bis zu 3200 Pixeln.

Eine ähnliches Funktionsprinzip weist die RPP®DuoVision-Hybridkamera des Anbieters RICO EAB (vgl. Abbildung 56) auf. Dieses Inspektionssystem kombiniert nach [56] die herkömmliche TV-Inspektion mit einer Dreh-/Schwenkkopfkamera und 10-fach-Zoomobjektiv mit den digitalisierten Aufnahmen eines Fischaugenobjektivs in Form einer 2-D-Darstellung (Aufklappung).



Abbildung 55: Inspektionssystem SPHERIX [55]



Abbildung 56: RPP®DuoVision-Hybridkamera [56]

Nachteil der optischen Inspektion ist, dass das Erkennen und Kodieren der Defekte von der Qualifikation und Motivation des Bedienungspersonals abhängt und folglich immer subjektiv ist [81].

Neben diesen Inspektionssystemen existieren speziell für den Unterwassereinsatz konstruierte Überwachungssysteme (Unterwasser-Fernlenkmanipulatoren). Die Abbildung 57 zeigt einen kleinen und extrem manövrierfähigen Unterwasser-Fernlenkmanipulator und Beobachtungsfahrzeug [82].

Das Gesamtgewicht des Systems inkl. Kabeltrommel und Steuerung beträgt nach [82] 18 kg. Der Manipulator mit den Abmessungen 203 mm x 152 mm x 146 mm hat ein Gewicht von 3

kg. Das System ist CE-zertifiziert für alle „nassen“ Anwendungen auf See, in Binnengewässern und in Rohren. Vier horizontale Strahlrohrantriebe („*thruster*“) bewegen das Gerät vorwärts, rückwärts und seitwärts und erlauben durch ihre Anordnung auch Schräg- und Diagonalbewegungen sowie das Halten der Position in jeder Strömung aus beliebiger Richtung. Zwei weitere Strahlrohrantriebe dienen der vertikalen Bewegung. Das System ist bis zu einer Tiefe von 75 m einsetzbar. Eine Durchfahrweite von 190 mm und eine Absenkweite von 210 mm erlauben dem System die Arbeit auch in sehr engen Räumen oder Rohren.

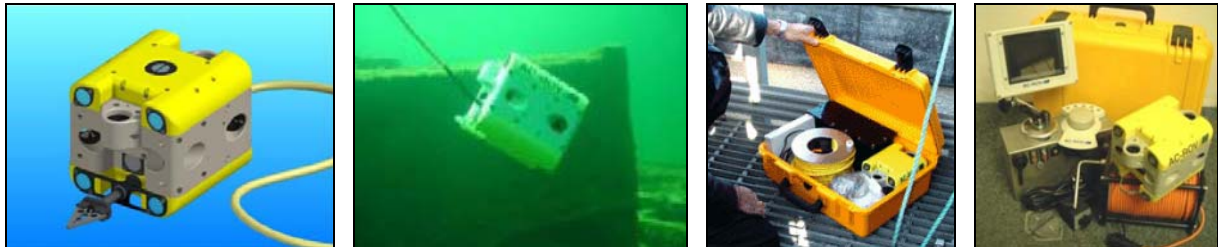


Abbildung 57: Unterwasser-Fernlenkmanipulator und Beobachtungsfahrzeug [82]

Ein weiterer unbemannter Geräteträger (Hyball) für die videogestützte Unterwasser-Beobachtung des französischen Anbieters Exavision ist in Abbildung 58 dargestellt. Der Geräteträger ist bis zu einer Tiefe von 300 m einsetzbar.

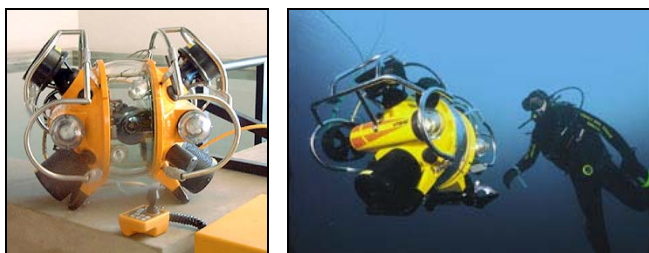


Abbildung 58: Hyball [73], [83]

Die Unterwasser-Fernlenkmanipulatoren sind nach Herstellerangaben auch bei eingeschränkter Sicht einsetzbar. Erfahrungen mit der Inspektion gefüllter oder teilgefüllter Abwasserrohre liegen noch nicht vor.

5.2.2 Lasermessverfahren

Grundlage für die Sanierungsplanung der Kanalnetzbetreiber ist die Zustandserfassung der Kanäle. Diese beinhaltet in der Regel erstens die optische Inspektion und zweitens die Schadensbewertung. Für die Zustandsklassifizierung nach ATV-M 149 [30] ist neben der Benennung der Zustandsart auch das Ausmaß des Schadens zu beschreiben. So ist beispielsweise bei der Verformung biegeweicher Rohre die Querschnittsreduktion in Prozent (%) anzugeben. Bei einer rein optischen Inspektion basiert dieser Wert auf einer subjektiven Schätzung des Inspektors. Der Einsatz von z.B. lasergestützten Systemen zur Querschnittsvermessung von Kanälen kann die optische Kanalinspektion ergänzen und durch eindeutige Messwerte eine objektive Schadensklassifizierung ermöglichen.

Bei den Lasermesssystemen können zwei Gruppen unterschieden werden. Bei der ersten Gruppe wird die Lasertechnik eingesetzt, um einen Lichtring an die Rohrwand zu projizieren. Dieser Lichtring wird dann z.B. von einer Kamera aufgezeichnet und mit Hilfe eines Maßstabes vermessen. Der Laser wird somit lediglich als Lichtquelle eingesetzt.

Bei der zweiten Gruppe, der optischen Abstandsmessung (Laserentfernungsmessung), wird der Laser benutzt, um die Distanz zwischen einem Abstandssensor und einem Objekt zu

messen. Nach [84] unterscheidet man dabei zwischen den sogenannten Laufzeitverfahren und der Lasertriangulation.

Ein Beispiel für ein aktuelles Lichtring-Messsystem stellt der, von der Firma CleanFlow Systems aus Albany (Neuseeland) entwickelte „*Clearline Profiler*“ (vgl. [54]) dar. Das Messsystem (vgl. Abbildung 59) ist als adaptives Gerät konzipiert, d.h. es nutzt marktübliche Kanalinspektionsroboter als Trägereinheit und für die Bildaufzeichnung. Die wesentlichen Systemkomponenten sind der Laser (vgl. Abbildung 60) und die Auswertungssoftware. Der Laser wird am verwendeten Kanalinspektionsroboter mit Hilfe einer auf diesen abgestimmten Halterung montiert. Bei der lasergestützten Querschnittsvermessung von Kanälen mit dem System „*Clearline Profiler*“ wird mit Hilfe eines Lasers ein zur Rohrlängsachse senkrecht ausgegerichteter Lichtring erzeugt. Die Bilder des durch den Laserlichtring beleuchteten Rohrprofils werden mit Hilfe der Kamera des Inspektionsroboters aufgezeichnet. Dieser Vorgang wird als Scannen bezeichnet. Anschließend werden die digitalen Lichtringbilder mit der „*Clearline Profiler*“ - Software vermessen und z.B. hinsichtlich Verformungen, Kapazitätsänderungen oder Restwanddicken ausgewertet. Als Bezugsgröße dient das digitalisierte Bild eines Längenmaßstabes (vgl. Abbildung 61). Die Genauigkeit des Systems wird vom Hersteller [54] mit 0,5 % angegeben.

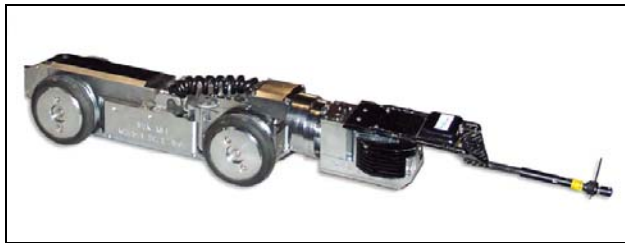


Abbildung 59: Messsystem „*Clearline Profiler*“ [54]

Mit Hilfe der Software können die Messdaten u.a. zur Bestimmung der Kapazität (Größe der Rohrquerschnittsfläche), der Ovalität, der Nennweite, des Materialabtrags infolge Korrosion und insbesondere der Querschnittsverformungen genutzt werden. Dabei kann das Ergebnis der Messung – wie auch das einer Kanalinspektion – durch Ablagerungen oder (Schmutz)-Wasser eingeschränkt werden, denn nicht nur natürliches Licht, sondern auch Laserlicht wird von Flüssigkeiten gebrochen und kann Feststoffe nicht durchdringen. Aus diesem Grund sollten im Rahmen der Vorbereitung einer Kanalvermessung Ablagerungen durch Maßnahmen der Kanalreinigung beseitigt und während des Laserscans die Höhe des (Schmutz)-Wasserstandes auf ein Minimum reduziert werden. Unter diesen Randbedingungen ist der „*Clearline Profiler*“ auch ein geeignetes Hilfsmittel für die Kanalvermessung im Rahmen der Bau- oder Gewährleistungsabnahme.



Abbildung 60: Montage des Lasers an der Halterung [22]



Abbildung 61: Roboter mit Maßstab [22]

Nach gleichem Prinzip arbeitet auch die externe Deformationsmessvorrichtung der JT - elektronik GmbH, Lindau. Nach [55] können Verformungen, Stauchung und Versätze im Rohr vermessen werden. Dazu wird von der Messeinrichtung ein Laserkreis an die Rohrwandung projiziert (vgl. Abbildung 62). Dieser wird mit einem in der Auswertesoftware erzeugten Kreis, dessen Durchmesser dem des Rohres entspricht, verglichen. An den Stellen, an denen sich die Kreise (Laserkreis; Softwarekreis) nicht decken, kann über die Software die Differenz errechnet und angezeigt werden.



Abbildung 62: Externe Deformationsmessvorrichtung und an die Rohrwandung projektierter Laserkreis [55]

Bei der Laufzeitmessung wird ein zeitlich modulierter Lichtimpuls ausgesandt und die Pulslaufzeit gemessen, die der Lichtstrahl benötigt, um zur Quelle reflektiert zu werden. Durch Messen dieser Laufzeit kann, mit Hilfe der konstanten Lichtgeschwindigkeit, die Distanz zwischen Quelle und Objekt ermittelt werden. Mit diesem Verfahren können nach [84] Abstände zwischen einem Meter und mehreren Kilometern gemessen werden. Nachteil ist, dass es sich bei der Messung der Pulslaufzeit um eine sehr hohe Geschwindigkeit (ungefähr 300000 km/s) handelt, die nach [84] die direkte Messung der Laufzeiten bei kurzen Entfernungen erschwert. Bei der Messung geringer Abstände wird daher auf indirekte Verfahren zurückgegriffen. Ein indirektes Verfahren stellt dabei die Lasertriangulation dar. Bei der Lasertriangulation wird ein Laserlichtpunkt auf das Messobjekt projiziert und mit einer Kamera beobachtet. Ändert sich die Entfernung des Messobjektes vom Laserprojektor, so ändert sich auch der Winkel unter dem der Lichtpunkt beobachtet wird sowie die Position seines Abbildes in der Kamera. Aus der Positionsänderung wird mit Hilfe einfacher geometrischer Beziehungen die Entfernung des Objektes vom Laserprojektor berechnet. Beim Sensor handelt es sich um ein lichtempfindliches ortsauflösendes optisches Element, das die Position des Lichtpunktes im Bild bestimmt. Aus dieser Bildposition wird die Distanz zwischen Sensor und Objekt berechnet. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es sich um rein trigonometrische Berechnungen handelt. Die Messung kann daher sehr schnell durchgeführt und wiederholt werden und eignet sich damit auch zur Abstandsmessung an bewegten Objekten.

Bereits 1994 wurde mit dem System TriScan von der OPIMESS GmbH, Gera ein TV-Inspektionssystem für Abwasserkanäle mit einem integrierten Laserabstandssensor entwickelt (vgl. Abbildung 63). Das System arbeitet nach [85] hochauflösend bei Abständen zwischen 50 und 250 mm und liefert räumliche Koordinaten der vermessenen Objekte.

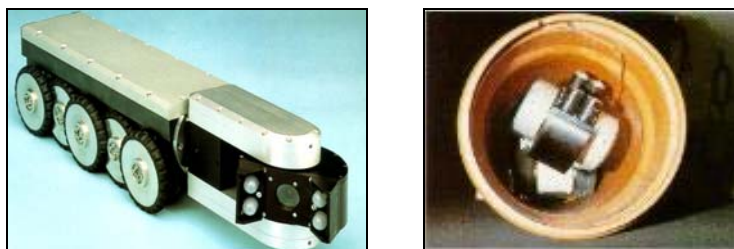


Abbildung 63: Inspektionssystem TriScan [65]

Das Lasermesssystem OptiScan der Optimes GmbH, Gera ist ebenfalls für die Vermessung der Rohrrinnenkontur konzipiert (vgl. Abbildung 64). Aufgenommen werden im einzelnen Verformungen, im Rohrquerschnitt und in der Rohrlängsachse, Querschnittsveränderungen, Ablagerungsdicke, Innenkorrosion, Kaliber und Muffenversätze. Das System ist nach [65] insbesondere geeignet für die Untersuchung von Groß-, Sonder-, Rund- und auch Eiprofilen. Der verwendete Rotations-Laserscanner arbeitet im Nennweitenbereich von DN 200 bis DN 2500. Bei 60-120 Umdrehungen pro Minute nimmt er bis zu 720 Messpunkte, dies entspricht einem Raster von $0,5^\circ$, je Umdrehung auf. Die Messgenauigkeit wird nach [65] mit < 1 mm (radial) und $< 0,1$ mm (longitudinal) angegeben. Die Messgenauigkeit der Winkelposition wird nach [65] mit $< 0,1$ % angegeben.

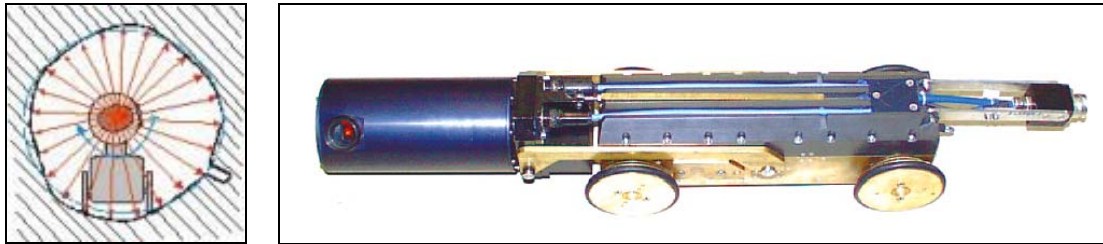


Abbildung 64: Lasermesssystem OptiScan [65]

Ein weiteres Lasermesssystem stellt ein sogenannter optischer Sensor zur hochpräzisen Vermessung von Kanalrohren der ProKasro Mechatronik GmbH, Karlsruhe dar (vgl. Abbildung 65). Bei diesem, gemeinsam mit dem Fraunhofer Institut für Informations- und Datenverarbeitung IITB entwickelten Inspektionssystem handelt es sich z.Z. um eine prototypische Realisierung des Sensorkonzeptes mit einer 3D- und 2D-Darstellung der Messergebnisse (vgl. Abbildung 66), das auf der Fachmesse „Entsorga 2007“ vorgestellt wurde. Basierend auf dem Lasertriangulationsverfahren ist es möglich, die Rohrgeometrie sehr genau zu vermessen. Durch Drehung der Triangulationseinheit und gleichzeitiger Vorwärtsbewegung ist es möglich, die Rohrrinnenfläche abzutasten. Die Sensoren sind in einen Kamerakopf integriert. Eine Analysesoftware übernimmt die Geometriebestimmung der gescannten Rohre. Ergebnis der Untersuchung soll eine Hochgenaue 3D-Vermessung von Rohren, eine Automatische Schadensdetektion und Klassifikation durch Analyse der Rohrgeometrie, eine 3D-Kartographierung von überprüften Rohrsystemen und die objektive Quantifizierung von Schäden und Anomalien werden [86].

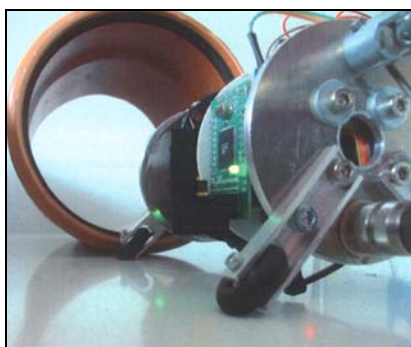


Abbildung 65: Prototyp eines optischen Sensors zur Vermessung von Kanalrohren [86]

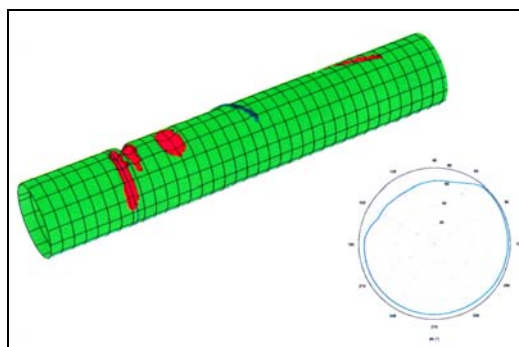


Abbildung 66: 2D- und 3D-Darstellung der Messergebnisse [86]

Eine weitere Anwendung hat die Laserabstandsmessung als Komponente eines autonom arbeitenden Roboters zur automatisierte Sanierung gemauerter Abwasserkanäle gefunden (vgl. Abbildung 67).

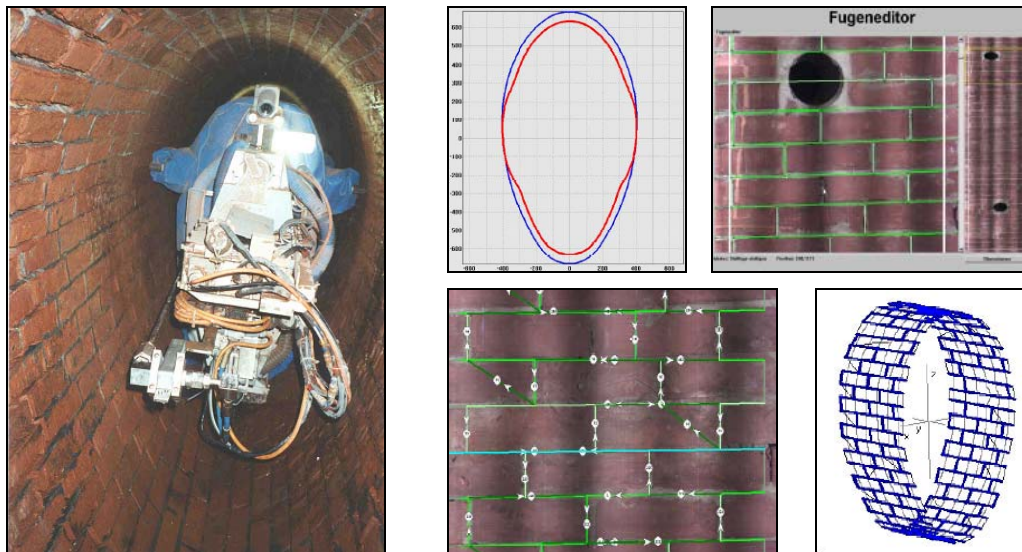


Abbildung 67: Verfahren zur automatisierten Sanierung gemauerter Abwasserkanäle [87]

Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Systems zur sog. automatisierten Sanierung gemauerter Abwasserkanäle war nach [87] der Sachverhalt, dass durch Thiobazillen unter ungünstigen Bedingungen an den Wandoberflächen eines Abwasserkanals eine hohe Schwefelsäurekonzentration ($\text{pH-Werte} < 1$) auftreten kann. Diese starke chemische Beanspruchung kann zusammen mit mechanischem Abrieb bei gemauerten Abwasserkanälen zu Schäden im Bereich der Fugen führen. Der im Rahmen eines durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojektes entwickelte Roboter vermisst die Rohrrinnenkontur, erkennt automatisch die Lage der Fugen des Mauerwerks, erstellt einen sogenannten Bahnplan und berechnet die 3D-Koordinaten der Fugen. Anschließend werden die Fugen mit einem Hochdruckwasserstrahl freigeschnitten. Auch dieser Arbeitsschritt erfolgt vollautomatisch. In einem weiteren Arbeitsschritt werden die vorbereiteten Fugen durch ein mechanisiertes Verfahren mit einem Spezialmörtel verschlossen [87].

An dem Projekt beteiligt waren die HOCHTIEF Construction AG mit dem Arbeitsschwerpunkt Kanalsanierung, das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, IPA in Stuttgart mit dem Arbeitsschwerpunkt Robotersteuerung, die JENOPTIK Sielmetric GmbH mit dem Arbeitsschwerpunkt Roboter sowie die Technische Universität Berlin mit dem Arbeitsschwerpunkt Materialforschung.

5.2.3 Mechanische Verfahren

5.2.3.1 Deformations- und Kalibermessung

Die Deformation von biegeweichen Rohren kann auf mechanische Weise mit den von der OPTIMESS GmbH, Gera entwickelten Deformations- und Kalibermessgeräten DKM 150 (Einsatzbereich DN 150 bis DN 400) und DKM 400 (Einsatzbereich DN 450 bis DN 800) gemessen werden (vgl. Abbildung 68). Hier wird das Rohr separat oder während der TV-Inspektion durch ein mechanisches Abtastverfahren vermessen. Nach [65] wird für die Messsonden eine, vom Rohrdurchmesser unabhängige Messgenauigkeit von < 1 mm angegeben.

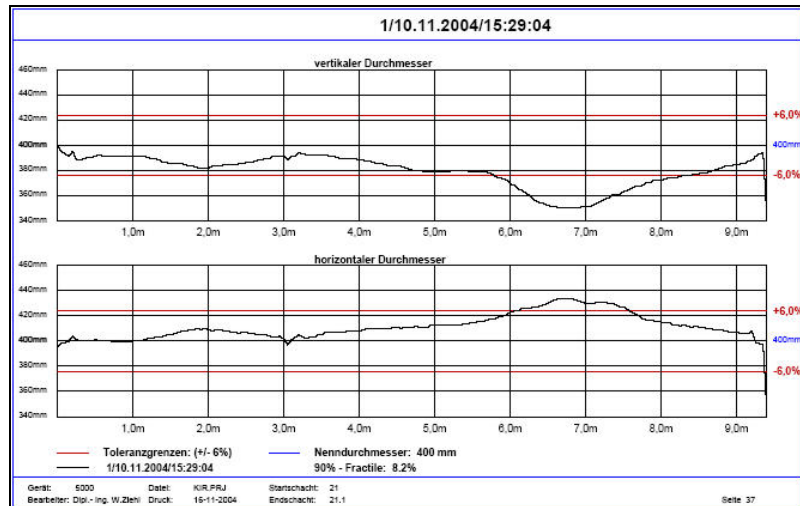
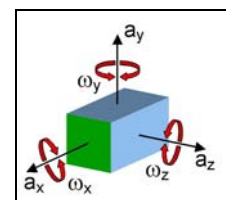


Abbildung 68: Deformations- und Kalibermessgerät, Ergebnisprotokoll [65]

Die Messergebnisse werden durch übliche Temperaturschwankungen nicht beeinflusst. Eine kontinuierliche Messung ist nach [65] auch im Wasser, bei Feuchtigkeit und Dämpfen möglich.

5.2.3.2 Lagevermessung

Die Inertialmessmethode – auch Trägheitsmessmethode – beruht auf dem Prinzip der Integration gemessener Beschleunigungen und Drehungen zur Bestimmung von Lagewinkeln, Geschwindigkeit und Position im Raum. Das Verfahren dient zur Messung der Orientierungs- und Positionsänderungen eines bewegten Objektes relativ zu einem Bezugssystem. Hochsensible Beschleunigungsmesser in drei Achsen registrieren Beschleunigungen in den drei Raumrichtungen. Über die Zeit integriert, ermitteln sie Geschwindigkeiten und nochmals integriert zurückgelegte Wegstrecken in eben diesen Raumrichtungen. Das Inertialmesssystem besteht aus einer Kreiselplattform auf der sich drei Beschleunigungsmesser befinden. Die Plattform wird elektronisch durch zwei Kreisel (Laserkreisel mit Lageregelung) stabilisiert. Jeder der zwei Kreisel misst Drehbewegungen in einer Ebene. Im Idealfall (meist durch Reibung verfälscht) besitzt die Kreiselplattform absolute Raumstabilität, womit eindeutig die Lage des Objekts im Raum festgelegt werden kann. Auf der Plattform befinden sich 3 Beschleunigungsmesser, deren Messwerte zwischen 20 und 100 mal je Sekunde erfasst werden [88].



$a_{x,y,z}$: lineare Bewegungsänderung
 $\omega_{x,y,z}$: Lageänderung

Abbildung 69: Inertialmesssystem IMU 5 [89]

Mit dem Inertialmesssystem IMU 5 (vgl. Abbildung 69) der DMT GmbH, Essen werden Beschleunigungs- und Drehgeschwindigkeitswerte in drei Messachsen gemessen und gespeichert, um die Bewegung eines Trägerfahrzeuges hochgenau zu bestimmen. Dabei werden zuerst die Beschleunigungsmessdaten in ein Referenzkoordinatensystem transformiert und anschließend zweifach integriert. Der auf diese Weise berechnete Streckenverlauf ent-

spricht nach [89] dem zurückgelegten Weg des Trägerfahrzeuges. Das System ist nach [89] für die Lagevermessung von Abwasserkanälen mit sehr geringem Gefälle geeignet. Im Messeinsatz arbeitet das Inertialmesssystem autark, d. h. alle zum Betrieb notwendigen Komponenten (Energieversorgung, Sensorik, Speichermedien usw.) sind innerhalb einer druckfesten Kapselung eingebaut. Die druckfeste Kapselung ermöglicht einen gefahrlosen Betrieb des Inertialmesssystems in ex-gefährdeten Bereichen.

Der 3D Messmolch (vgl. Abbildung 70) der Gullyver Gesellschaft für mobile Inspektionssysteme mbH, Bremen wird mittels Kamerawagen oder mit einem Seil durch die zu vermessende Rohrleitung gezogen. Dabei werden die Form des Rohres und die Neigung vermessen, und über der Position gespeichert. Die Genauigkeit der Vermessung liegt nach [60] im mm-Bereich.

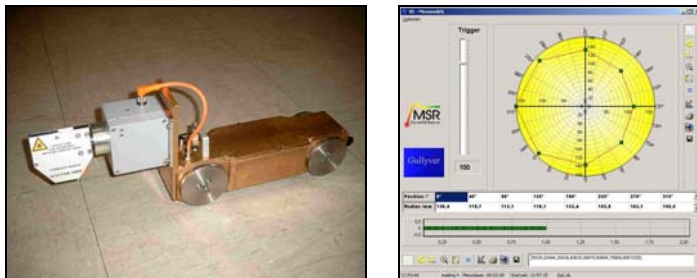


Abbildung 70: 3D Messmolch [60]

Neben diesen speziellen Geräten sind Neigungsmesser bereits in eine Vielzahl von TV-Inspektions- und Vermessungssystemen integriert worden.

5.2.4 Physikalische Verfahren

5.2.4.1 Ultraschallmessung

Ein Messverfahren, das sowohl in der Bauwerksdiagnostik als auch im medizinischen Bereich eingesetzt wird, stellt das Ultraschallverfahren dar. Die hier dargestellte Untersuchungsmethode mittels der Ultraschalltechnik [90] wird im medizinischen Bereich als Sonographie [91] bezeichnet.

In der Abbildung 71 ist ein Teil einer Hausanschlussleitung mit dem Schadensbild Wurzel- einwuchs zu sehen. An dem dargestellten Abschnitt wurde vermutet, dass die Wurzel bereits bis in den Bereich der Dichtung des Rohres vorgedrungen war. Der Rohrabschnitt wurde freigelegt, herausgetrennt und mittels Ultraschall untersucht.



Abbildung 71: Bergung des Probekörpers [22]

Die Abbildung 72 zeigt die Untersuchung des Rohres aus PVC mittels eines 7,5 MHz Ultraschall-Sensors.



Abbildung 72: Untersuchung einer Rohrverbindung mit Wurzeleinwuchs mittels Ultraschall (7,5 MHz) [22]

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 [89].

Mit Ultraschall bezeichnet man Schall oberhalb der menschlichen Hörschwelle, mit Frequenzen zwischen 20 kHz und 1 GHz [90]. In der Diagnostik verwendet man Frequenzen zwischen 1 MHz und 40 MHz bei einer mittleren Schallintensität von 100 mW/cm^2 [91].

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 [89].

Ultraschall breitet sich als Longitudinalwelle in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern aus. Festkörper besitzen neben der Volumenelastizität zusätzlich Formelastizität. Dadurch können in Festkörpern zusätzlich auch Transversalwellen auftreten. Der Übergang von Luftschall in Festkörper oder Flüssigkeiten erfolgt nur, wenn die Schallwellen in unmittelbarer Nähe abgestrahlt werden oder ein Koppelmedium angepasster akustischer Eigenschaften sowie bestimmter Dicke dazwischen ist. Ultraschall wird je nach Material eines Hindernisses an diesem reflektiert oder absorbiert [90].

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 ($z = \rho \cdot v$), unterscheiden, desto größer ist der reflektierte und um so geringer der transmittierte Anteil. An Grenzflächen zwischen mineralischen Baustoffen und Luft, wie sie beispielsweise bei Hohlräumen und Rissen auftreten, wird Ultraschall nahezu vollständig reflektiert. Deshalb können Ultraschallwellen selbst dünne Luftschichten im Bauteil nicht durchdringen [89].

An der Grenzfläche zweier Stoffe mit großem Impedanzunterschied wird der Schall stark reflektiert. Daher wird die Ultraschallsonde mittels eines stark wasserhaltigen Gels angekoppelt, damit der Schall nicht von der Luft zwischen dem Sondenkopf und der Oberfläche des zu untersuchenden Körpers reflektiert wird. Von Bedeutung für die Schallausbreitung in einem Material ist ebenfalls die Impedanz, also der Widerstand, der der Ausbreitung von Wellen entgegenwirkt. Die Ultraschallsonde sendet kurze, gerichtete Schallwellenimpulse aus, die in den durchschallten Schichten unterschiedlich stark reflektiert und gestreut werden, was als Echogenität bezeichnet wird. Aus der Laufzeit der reflektierten Signale kann die Tiefe der reflektierenden Struktur rekonstruiert werden [91].



Abbildung 73: Ergebnis der Ultraschalluntersuchung einer Rohrverbindung mit Wurzeinwuchs [22]

Die Stärke der Reflexion wird vom Ultraschallgerät als Grauwert auf einem Monitor dargestellt (vgl. Abbildung 73). So stellen sich Strukturen geringer Echogenität als schwarze, Strukturen hoher Echogenität als weiße Bildpunkte dar. Gering echogen sind vor allem Flüssigkeiten. Eine hohe Echogenität besitzen Knochen, Gase und sonstige stark schallreflektierende Materialien [91].

Die Abbildung zeigt den freigeschnittenen Bereich des PVC-Rohres, in dem zuvor der Wurzeinwuchs detektiert wurde (vgl. Abbildung 74). Das Ergebnis der Untersuchung konnte somit bestätigt werden.

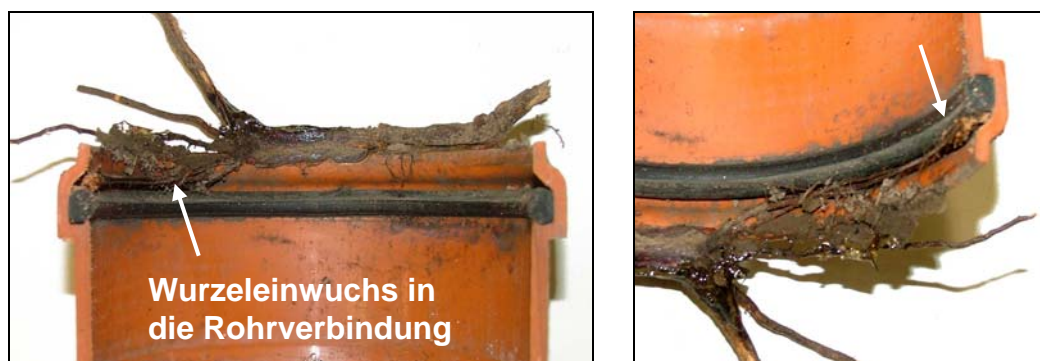


Abbildung 74: Aufgeschnittenes PVC-Rohr mit Wurzeinwuchs nahe der Dichtung [22]

In der Ultraschall-Prüftechnik (vgl. [3]) 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 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. 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 z.B. Wellenlängen von $\lambda = 2$ 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 [3].

Nachfolgend werden mit dem Inspektionssystem C200 Cutter [78] und dem Sonomolch [92] zwei Inspektionssysteme dargestellt, mit denen Abwasserkanäle im nicht begehbaren Nennweitenbereich mittels Ultraschalltechnik untersucht werden können.

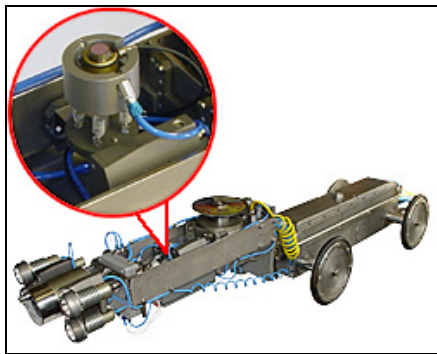


Abbildung 75: Inspektionssystem C200 Cutter mit integriertem Ultraschallsensor und Fräskopf [78]



Abbildung 76: Sonomolch [92]

In das System C200 Cutter der TARIS Corporation, Moskau (vgl. Abbildung 75) ist ein Ultraschallsensor zur Wanddickenmessung metallischer Leitungen integriert. Das System kann nach [78] bis zu 300 m in eine Haltung fahren und dort eine, von einem Operateur gesteuerte Messung durchführen. An der zu vermessenden Stelle wird der Sensor dazu bis zum Kontakt an die Kanalwand geführt. Der Rotationskopf ermöglicht eine Messung an jeder beliebigen Stelle des Querschnitts. Ablagerungen an der Kanalwand können vor der Messung mit dem integrierten Fräskopf entfernt werden. Zur besseren Ankopplung des Sensors an die Rohrwand, wird in die Kontaktfläche ein spezielles Gleitmittel injiziert.

Die Entwicklung des Sonomolchs (vgl. Abbildung 76) geht nach [92] von dem Ziel aus, ein automatisiertes Ultraschallgerätes zur Detektion von Schäden in Abwassersystemen zu konzipieren. Ergebnis der Entwicklung ist ein Ultraschallsystem für den Einsatz in Abwasserkanälen der Nennweite DN 600 und DN 700. Das System ist nach [92] in der Lage, Risse in Beton-, Stahlbeton- und Steinzeugrohren zu erkennen und deren Verlauf und Ausdehnung zu vermessen. Ebenfalls kann die Restwandstärke, vor allem bei Korrosion an der Außenseite, nach [92] erfasst und das Schadensausmaß graphisch dargestellt werden. Bei einer Untersuchung des Bereichs der Rohrverbindung können Schäden am Dichtungsmaterial festgestellt werden. Im Laborversuch konnten auch Unterschiede in der Rohrbettung messtechnisch festgestellt werden.

Bei der Inspektion von Öl- oder Gaspipelines werden häufig Ultraschall-Messsysteme eingesetzt. Dabei kann zwischen Systemen unterschieden werden, die nach dem Prinzip der Molchtechnik durch den Vorschub des Mediums in einer Leitung selbst vorangetrieben wer-

den und Sensoren, die auf einem Fahrwagen montiert sind. Ziele der Inspektion sind hier z.B. die Wanddickenmessung, Rissdetektion und Schweißnahtkontrolle. Die Zustandsermittlung beschränkt sich dabei jedoch auf metallische Leitungen [93].

Nachfolgend sind in den Abbildungen 77 bis 82 beispielhaft verschiedenen Systeme zur Inspektion von Öl- oder Gaspipelines dargestellt.



Abbildung 77: TIGRE - Modular aufgebautes System zur Inspektion von Öl- und Gasleitungen [94]



Abbildung 78: PipeTrack - System zur Inspektion von Öl- und Gasleitungen [95]

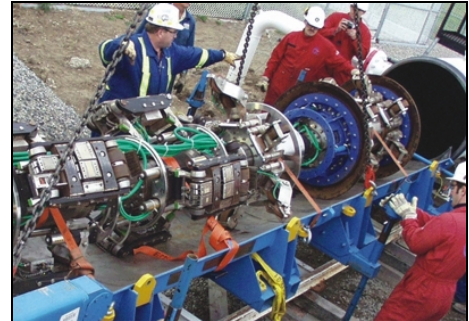


Abbildung 79: EMAT-Molch [96]



Abbildung 80: Ultraschallmolch TranScan [97]



Abbildung 81: Ultraschall-Molch LineExplorer UC [98]



Abbildung 82: Ultraschallmesssystem Weldscan [99]

Das System OptiSonic (vg. Abbildung 83) dient der Bestimmung der Restwandstärke von Metallrohren durch Ultraschall. Nach [65] wurde das System für den Einsatz in Raffinerien und Rohrleitungen chemischer Fabriken, in küstennahen Rohrleitungen, in Verladeleitungen (off- und on-shore) sowie Prozess- und Kühlwasserleitungen entwickelt. Es ist anwendbar im Nennweitenbereich DN 200 bis DN 1200. Erkennbare bzw. messbare Schäden sind Beulen, Innenkorrosion, Außenkorrosion und Verformungen. Ein rotierender Ultraschallsensor misst dazu den Abstand des Sensors zur Rohrwand. Er erreicht nach Herstellerangaben eine Messgenauigkeit +/- 0,1 mm.



Abbildung 83: Ultraschallfahrwagen OptiSonic [65]

Das Ultraschallverfahren stellt eine bewährte Methode zur Zustandserfassung metallischer Leitungen dar. Inwieweit die dabei eingesetzte Technik unter den speziellen Randbedingungen eines Abwasserkanals eingesetzt werden kann, ist noch offen. Insbesondere vor dem Hintergrund der dabei möglichen Schadensbilder, z.B. Lageabweichungen, Versätze oder einragende Hindernisse, die die Bewegungsmöglichkeiten der Systeme einschränken.

5.2.4.2 Sonarmessung

Das Sonar (*sound navigation and ranging*) ist eine Schallmesstechnik zur Ortung und Vermessung von Gegenständen unter Wasser. Bei Anwendung der Sonar-Messtechniken wird ausgenutzt, dass sich Schall unter Wasser insbesondere bei hohen Frequenzen sehr viel verlustärmer ausbreitet als in der Luft. In der Sonartechnik wird zwischen dem passiven Sonar und dem aktiven Sonar (z.B. Echolot) unterschieden. Passive Sonare können zur Lokalisierung von Objekten eingesetzt werden, die selbst Schall emittieren. Aktive Sonare benutzen das Echoprinzip, indem ein Signal ausgestrahlt und dessen Echo empfangen wird. Aus der Laufzeit des Echos kann z.B. die Entfernung bestimmt werden. Es gibt niederfrequente (50 Hz bis 3 kHz), mittelfrequente (3 kHz bis 15 kHz) und hochfrequente Aktivsonare. Als „Sonare“ werden häufig die überwiegend horizontal ortenden Systeme bezeichnet, wohingegen die „Echolote“ überwiegend vertikal orten [100].

Gängige Absperrtechnik, z.B. Dichtscheiben können nicht nur eingesetzt werden, um einen Kanalabschnitt abwasserfrei zu halten. Sie können ebenfalls dazu dienen, in einer zu inspizierenden Haltung eine Vollfüllung des Kanalabschnitt zu erreichen. Dies bietet sich dann an, wenn Inspektionssysteme eingesetzt werden, die über das Wasser an den Kanal „angekoppelt“ werden oder nur im Wasser funktionsfähig sind, z.B. Sonarsysteme.

Das dargestellte System RVS2 Sonar Pipe Inspektionssystem (vgl. Abbildung 84) des Anbieters RapidView kann nach [101] zur Untersuchung gefüllter und teilgefüllter Leitungen eingesetzt werden. Dieses „*nichtoptische*“ System ermöglicht nach [101] eine vollständige Inspektion, auch dann, wenn die Leitung mit „*undurchsichtigen*“ Flüssigkeiten gefüllt ist. Die Sensorik kann auf Kufen gleitend, auf einer Plattform schwimmend oder mittels eines Fahrwagens durch die Leitung bewegt werden. Das System ist mit einem Distanzmesser ausgestattet, der es ermöglicht, die bei der Fahrt durch eine Leitung festgestellten Schäden einzumessen.

Weitere, unter Wasser arbeitende Systeme sind der Sonar Profiler (vgl. Abbildung 85) der Cues Inc. [102] und das System Pipeeye (vgl. Abbildung 86) [94]. Diese Forschungsidee der Automatika Inc. stellt eine Weiterentwicklung eines Systems zur Untersuchung von Gas- und Ölpipelines dar. Die Inspektionsroboterplattform Pipeeye soll nach [103] unterschiedliche Sensoren sowie ein Kamerasystem aufnehmen.



Abbildung 84: RVS2 Sonar Pipe Inspection System [101]

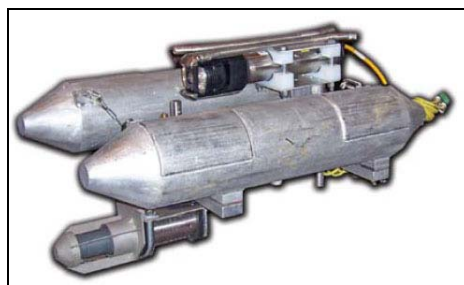


Abbildung 85: Sonar Profiler System [102]

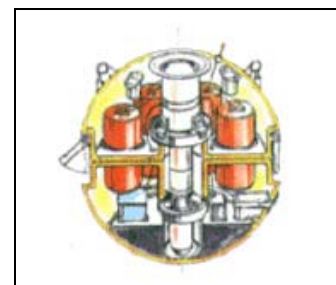


Abbildung 86: Pipeeye [103]

5.2.4.3 Geoelektrische Messung

Ein geoelektrisches Messgerät zur Untersuchung des Rohres stellt die Elektrische Kanal-messsonde AMS-4 (vgl. Abbildung 87) der Seba Dynatronic Mess- und Ortungstechnik

GmbH, Baunbach dar. Bei dem Einsatz der Kanalmesssonde AMS-4 wird die elektrische Leitfähigkeit von Wasser zur Leckortung in Abwasserkanälen genutzt. Die Sonde wird durch den bis zum Rohrscheitel aufgestauten Kanal gezogen und erzeugt durch Aussendung eines konstanten Wechselstroms dort ein elektrisches Feld. Passiert die Sonde eine Leckage, fließt aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers Strom zu eine Gegen- oder Bezugselektrode an der Geländeoberfläche.

Jeder Rohrwerkstoff besitzt einen spezifischen Widerstand, den er dem freien Fluss eines Stroms vom Kanalinneren in den umgebenden Boden entgegensetzt. Dieser spezifische elektrische Widerstand ist relativ hoch, solange die Rohrwandung des zu untersuchenden Kanalabschnittes intakt ist; an Fehlstellen, z.B. undichten Rohrverbindungen, Rissen etc., durch die Wasser infiltriert oder exfiltriert, fällt er signifikant ab (vgl. Abbildung 88) [104].

In einem Ergebnisprotokoll werden die aus den gemessenen Spannungsschwankungen berechneten Widerstandsänderungen über den Messweg ausgegeben, so dass nach [105] die hierdurch dokumentierten Fehlstellen in der Kanalwand lokalisierbar sind.



Abbildung 87: Elektrische Kanalmesssonde AMS-4 [105]

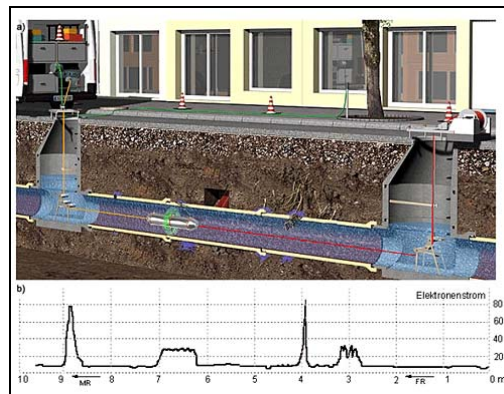


Abbildung 88: Ortung und Quantifizierung von Undichtigkeiten mit einer Kanalmesssonde (Idealisierung) [104]

Das System wurde sowohl im Laborversuch als auch in situ getestet (vgl. [104]). Dabei konnte festgestellt werden, dass bei Messungen in Kunststoffrohrleitungen und allen Leitungen, bei denen sehr lange und/oder verschweißte Rohre verwendet werden, Leckagen geringer Größe präzise geortet werden können. Die Identifikation der Leckagestelle erfolgt dabei lediglich in Axialrichtung.

Für den Einsatz in Abwasserleitungen aus Steinzeug- und Betonrohren scheint die Messsonde bei dem derzeit erreichten Entwicklungsstand als nicht geeignet. Der negative Einfluss der Rohrverbindungen überlagert hier die tatsächlichen Messergebnisse. Das Messgerät ist auf dem europäischen Markt nicht verfügbar.

5.2.5 Opto-hydraulisches Verfahren

Das nachfolgend beschriebene Verfahren zur opto-hydraulischen Inspektion (vgl. Abbildung 89), d.h. der Kombination einer optischen Inspektion und einer Dichtheitsprüfung, wurde im Rahmen des Forschungsschwerpunktes „Umweltschonende Technologien zur Sanierung undichter Kanäle“ (BMFT 02-WK9141/6, Laufzeit: 01.07.1991 - 30.06.1993) entwickelt. Mit dem Verfahren der opto-hydraulischen Inspektion wird nach [106] eine wesentliche Lücke in der Zustandserfassung von Entwässerungskanälen und -leitungen geschlossen. Die Fähigkeiten des Systems, das Erkennen und Bewerten von optisch nicht erfassbaren Undichtheiten, wurde nach [106] in bekannte und in der Praxis bewährte Inspektionsverfahren eingebettet. Die quantitative Prüfung der Wasserdichtheit an neu verlegten und in Betrieb befindli-

chen Kanälen, im Rahmen von Abnahmen oder planmäßigen Inspektionen, erhöht nach [106] die Aussagekraft der rein optischen Verfahren erheblich.



Abbildung 89: Verfahren zur opto-hydraulischen Inspektion [107]

Bei der nachfolgend dargestellte Vorrichtung zur Inspektion und Instandhaltung von Röhren (vgl. Abbildung 90) [108] handelt es sich um ein System, welches im Betriebszustand die Möglichkeit der Inspektion der Rohrwand ermöglicht. Die Vorrichtung zeichnet sich durch Verspann- und Abdichtelemente aus, die innerhalb des Rohres einen fest bestimmten Raum als Druckkammer aufspannen, der seitlich dicht abschließend an die Rohrwand grenzt. Die Druckkammer erstreckt sich dabei jedoch lediglich über einen Teil des Querschnittes des Rohres, so dass ein Teil des Querschnittes des Rohres für den Abfluss anfallender Abwässer erhalten bleibt [108]. Dieses Inspektionsvorrichtung könnte mit Sensoren kombiniert werden, die einen Abwasserfreien Arbeitsraum erfordern.

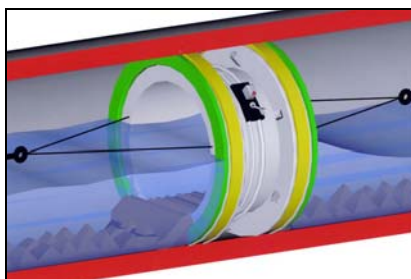


Abbildung 90: Inspektionseinrichtung [107]

5.2.6 Multisensorsysteme

Zahlreiche der bereits dargestellten Inspektions- und Messverfahren sowie Sensoren lassen sich auch in Kombination einsetzen, um die Aussagekraft der Inspektion zu erhöhen und ggf. auch durch Verschneidung von Informationen weitergehende Erkenntnisse zu gewinnen. Nachfolgend werden einige sog. Multisensorsysteme dargestellt, die sowohl auf bewährte Technik zurückgreifen als auch messtechnische Neuentwicklungen in das Gesamtsystem integrieren.

5.2.6.1 KURT

Bei dem System KURT (**K**anal-**U**ntersuchungs-**R**oboter-**T**estplattform) handelt es sich nach [103] um einen sechsrädrigen autonomen – d.h. nicht kabelgebundenen – Experimentalroboter. Seit dem ersten Prototypen wurde die Roboterplattform KURT (vgl. Abbildung 91) fortlaufend weiterentwickelt. Das System wird von der Firma KTO [109] als Forschungsroboter vermarktet.



Abbildung 91a: KURT (Kanal-Untersuchungs-Roboter-Testplattform) [103]

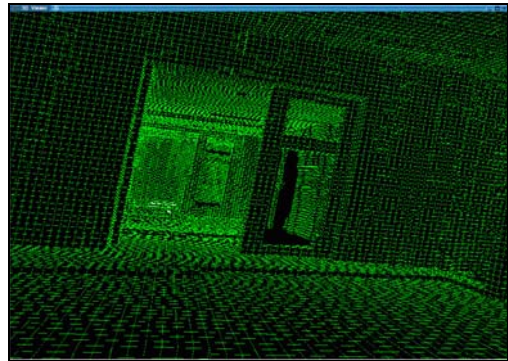


Abbildung 91b: Kamerabild [103]

KURT wurde erfolgreich in einem trockenen Abwasserkanal-Testnetz auf dem Fraunhofer-campus in Sankt Augustin eingesetzt. Der Roboter kann mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet werden. Eine Standardkonfiguration umfasst u.a. Inklinometer, Entfernungsmesser (Infrarot oder Ultraschall) und Sensoren für die Hindernisentdeckung.

5.2.6.2 PIRAT

Das Inspektionssystem PIRAT (**P**ipe **I**nspection **R**ealtime **A**ssesment **T**echnique) besteht aus einem Fahrwagen, bestückt mit einer Videokamera und einem Laserscanner (vgl. Abbildung 92). Das System wurde zwischen 1993 und 1996 in Australien von CSIRO Manufacturing Science and Technology und Melbourne Water entwickelt. Das kabelgebundene System wird von einem Inspektionsfahrzeug aus gesteuert und besitzt eine Reichweite von 250 m. In einem Abwasserkanal DN 600 wurde nach [103] mit dem Laserscanner eine Auflösung von 1,5 mm in Radialrichtung und 4 mm in Axialrichtung erreicht.

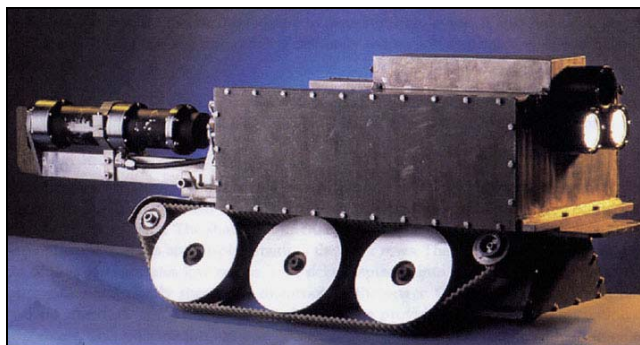


Abbildung 92: Pirat (Pipe Inspection Realtime Assessment Technique) [110]

5.2.6.3 MAKRO

Bei dem System MAKRO (**m**ehrsegmentiger **a**utonomer **K**anal**r**oboter) handelt es sich nach [103] um den Prototypen einer autonomen, kabellosen Roboter-Plattform (vgl. Abbildung 93). Das System soll in grob gereinigten Abwasserkanälen mit Durchmessern von 300 bis 600 mm selbstständig navigieren.

Das Ziel des „MAKRO-Projektes“ war, einen Roboter zu entwickeln, der in der Lage ist, vollständig autonom in Abwasserkanälen unter den oben genannten Bedingungen zu navigieren. MAKRO erhält zu Beginn einer so genannten „Mission“ eine topologische Karte des zu inspizierenden Kanalsystems, die Angabe des Start- und Zielschachtes und der Inspektionsaufgaben, die durchzuführen sind. Der Roboter berechnet sich den Weg vom Start- zum Zielpunkt und fährt dann autonom diesen Weg ab. Mit Hilfe von Infrarot- und Ultraschallsen-

soren findet MAKRO Schächte und Zuläufe. Weitere interne Sensoren ermöglichen eine zusätzliche Kontrolle der Lage des Roboters. Die Steuerung des Roboters erfolgt vollständig über die Prozessoren des Roboters.

MAKRO enthält ein Vielzahl von internen Sensoren. Ein Thermometer zur Überwachung der CPU-Temperatur, Impulszähler (Odometrie) zur Regelung der Radgeschwindigkeiten und zur Entfernungsmessung, optische Sensoren zur Regelung der Drehwinkel der Gelenke, und einige andere. Äußere Sensoren zur Wahrnehmung der Umgebung sind in den beiden identischen Kopfsegmenten untergebracht. Jedes Kopfsegment enthält eine Stereokamera, eine Beleuchtungseinrichtung, einen Ultraschall-Sensor zur Hinderniserkennung, vier Infrarot-Sensoren, einen Infrarot-Scanner zur Lokalisierung von Hausanschlüssen und einen Laser-Kreuz-Projektor, der zusammen mit einer Kamera verwendet wird, um die Lage des Roboters - insbesondere bei Abbiegevorgängen - ständig zu überprüfen.

Der MAKRO-Prototyp wurde gemeinsam von zwei deutschen Forschungsinstituten und Industriepartnern entwickelt. Das MAKRO-Projekt wurde vom Bundesministerium für Forschung Bildung und Forschung (BMBF) in der Zeit von 1997 bis 2000 gefördert. Seit Mitte 2002 läuft das wiederum vom BMBF geförderte Folgeprojekt MAKRO-PLUS. Das Ziel dieses Projektes ist die Weiterentwicklung des Roboters und die Integration weiterer Anwendungen zur autonomen Untersuchung von Abwasserkanälen.

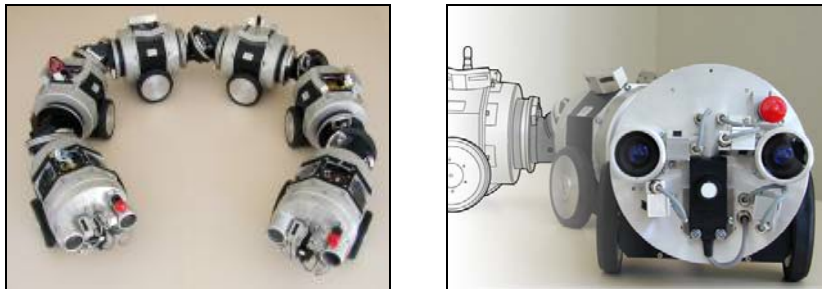


Abbildung 93: MAKRO (mehrsegmentiger autonomer Kanalroboter) [103]

5.2.6.4 Responder

Der Responder (vgl. Abbildung 94) stellt nach [111] ein System zur Inspektion und Rehabilitation von Abwasserkanälen ab der Nennweite DN 900 dar. Das System verfügt über Sonar-, Laser- und Videotechnik zur Zustandserfassung sowie einen H_2S -Detektor für den Messbereich 0 - 200 ppm. Das „*Sonar Sewer Profiling*“ ermöglicht die Darstellung des vollständigen Rohrquerschnitts inkl. des optisch nicht erkennbaren Bereiches unter den Wasserspiegel. Das System ermöglicht dadurch nach [111] eine Inspektion während des Betriebes. Das „*Active 3D Laser Scanning*“ erzeugt ein dreidimensionales Abbild der Rohroberfläche im Gasraum. Der Zustand der Oberfläche wird somit messbar. Der „*Flow Monitor*“ dient der Messung des Abwasservolumenstromes im untersuchten Kanal.

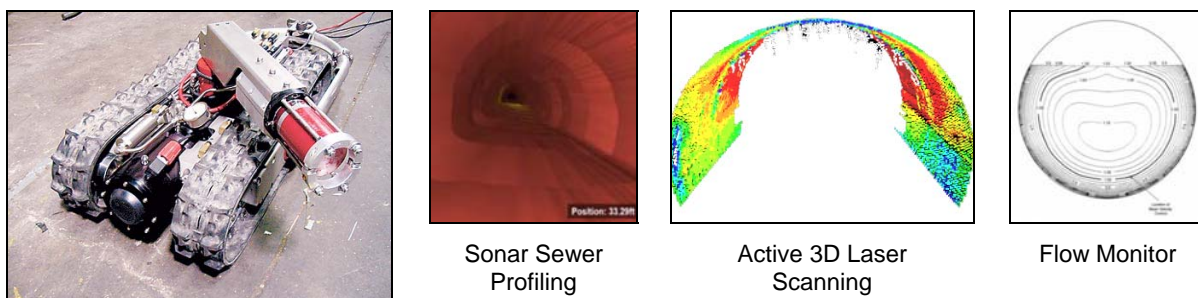


Abbildung 94: Inspektionssystem Responder [111]

5.2.6.5 Inspektionssystem für den „Abwasserkanal Emscher“

Der „Abwasserkanal Emscher“ stellt das Herzstück der zukünftigen Abwasserentsorgung im Emscherraum (Nordrhein-Westfalen) dar. Das Kanalbauwerk verbindet das Emschereinzugsgebiet mit einer Fläche von rd. 430 km² und ca. 2 Mio. Einwohnern mit den Kläranlagen in Bottrop und Dinslaken. Mit einer Gesamtlänge von 51 km und Tiefenlagen von bis zu 40 m unter Gelände stellt der „Abwasserkanal Emscher“ derzeit das größte Wasserbauvorhaben in Europa dar. Die Kanaldurchmesser liegen im Nennweitenbereich zwischen DN 1400 und DN 2800. Der „Abwasserkanal Emscher“ wird im laufenden Betrieb permanent Füllgrade zwischen 25 und 90 % aufweisen und kann auch nicht kurzzeitig trockengelegt werden. Eine herkömmliche Inspektion mittels Begehung ist somit nicht möglich. Unabhängig von der tatsächlichen Nennweite handelt es sich bei diesem Bauwerk somit um einen nicht begehbaren Abwasserkanal [112], [113].

Im Auftrag der Emschergenossenschaft entwickelt das Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung IFF, Magdeburg ein automatisiertes „*Multisensorsystem*“ zur Inspektion des „Abwasserkanals Emscher“. Dieses System ist einerseits für den Einsatz in einem Abwasserkanal aus Stahlbetonrohren begehbaren Nennweite konzipiert, andererseits stellt es ein System dar, das unbemannt auch unter der Randbedingung einer Teilfüllung das Kanals eine vollständige Zustandserfassung entsprechend der gesetzlichen Anforderungen vornehmen kann [112], [113].

Zur Inspektion und Zustandserfassung des Kanals gemäß den Anforderungen der Selbstüberwachungsverordnung Kanal NRW [1] sowie zur Erfüllung der Betreiberpflichtungen sind folgende Zustandsgrößen zuverlässig zu erkennen [112], [113]:

- Korrosion,
- Mechanischer Verschleiß,
- Abflusshindernisse,
- Ablagerungen,
- Inkrustation,
- Lageabweichung,
- Risse und
- Undichtigkeiten.

Bei der Entwicklung der Systeme zur Inspektion, die unter den gegebenen Bedingungen alle Schadensbilder zuverlässig erfassen, standen folgende Teilsysteme und deren Zusammenführung im Vordergrund [112], [113]:

- Trägersystem (Roboter) zur Bewegung und Positionierung innerhalb des Kanals.
- Sensor- und Messsysteme zur Inspektion des Rohrzustandes über und unter dem Wasserspiegel sowie zur Erkennung von Ablagerungen.
- Medienversorgung (Strom, Wasser, Datenkommunikation u.a.).
- Steuerungssystem, Navigation, Bedienung und Datenverarbeitung (Sensorspezifische Module zur Datenerfassung, -verarbeitung, -visualisierung und –archivierung, Auswertemodule, Erfassungs- und Auswertungssoftware, Datenverwaltung).
- Bergungssicherheit des Systems aus dem Kanal und Explosionsschutz.

Um die Schadensbilder nicht nur darzustellen, sondern vermessen zu können, muss das Inspektionssysteme in der Lage sein, zu jedem Zeitpunkt die exakte Position und Orientierung im Kanal zu ermitteln. Hierzu wurde ein Multisensorsystem auf Basis optischer Sensoren, Neigungssensoren und Trägheitssensoren entwickelt. Im Millisekundentakt werden so die Position und Orientierung erfasst. Im Ergebnis der Entwicklung folgt die Inspektion des „Abwasserkanals Emscher“ einer 3-stufigen Inspektionsstrategie [112], [113]:

1. Schadenerkennungssystem (SEK) zur Vorinspektion (vgl. Abbildung 95),

2. ggf. Reinigungssystem (RS) zur Beseitigung von Ablagerungen und Reinigung der Rohrwände und
3. Schadenvermessungssystem (SVM) zur detaillierten Zustandserfassung.



Abbildung 95: Prototyp des Schadenerkennungssystems (SEK) [113]

Eine umfangreiche Datenverarbeitung ermöglicht zudem den Vergleich der Sensordaten mit vorangegangenen Messungen und somit die optimale Beurteilung und ggf. eine Prognose der Schadensentwicklung. Hierzu werden sämtliche Sensordaten der jeweiligen Position im Kanal exakt zugeordnet und bei Bedarf abgerufen. In der ersten Stufe der Inspektion wird der Kanal mit einem kleinen System zur Vorinspektion, dem Schadenerkennungssystem (SEK), je nach Füllstand schwimmend oder radgeführt befahren. Es dient der Inspektion des gesamten Kanals, wobei Auffälligkeiten wie Risse, Korrosion und Undichtigkeiten im Gasraum sowie Materialabtrag, Ablagerungen und Hindernisse im Wasserraum erkannt werden. Das SEK ist mit folgenden Sensoren ausgestattet [112], [113]:

- Kameras (Auflösung ca. 0,5 mm pro Pixel) zur Risserkennung (Rissbreiten $\geq 0,5$ mm), Detektion von Korrosion und Undichtigkeiten im Gasraum sowie zur Fugenbreitenbestimmung (Messgenauigkeit ± 4 mm).
- Optischer Sensor zum Erkennen von Lageabweichungen (Messgenauigkeit ± 15 mm).
- Ultraschallscanner zur Detektion von mechanischem Verschleiss, Ablagerungen und Abflusshindernissen unter Wasser (Messgenauigkeit ± 13 mm).
- Videokamera (Zoom).

In der zweiten Inspektionsstufe beseitigt das Reinigungssystem (RS) - falls erforderlich - bei der Vorinspektion erkannte Ablagerungen und reinigt die Kanalwand mittels Wasserhochdrucktechnik vor einem Einsatz der detaillierten Inspektion mit dem SVM. In der dritten Stufe der Inspektion erfolgt eine detaillierte Zustandserfassung des Kanals durch die Schadenvermessungssysteme (SVM). Bei dem SVM handelt es sich um ein radgeführtes System, das sich während einer Messung im Stillstand befindet. Daher ist das SVM in der Lage, alle Schäden mit einer höheren Genauigkeit als das schwimmende SEK zu erfassen. Für die detaillierte Schadensfassung wurden verschiedene Sensorverfahren speziell für die Zustandserfassung des „Abwasserkanals Emscher“ entwickelt, da keine kommerziellen Systeme verfügbar waren. Mit dem SVM werden alle relevanten Schadensbilder und Messgrößen mit hoher Genauigkeit ermittelt [112], [113]:

- Eine intelligente Bildverarbeitung der Kamerabilder gibt dem Bediener automatisch Hinweise bei Verdacht auf Risse ab einer Rissbreiten $\geq 0,5$ mm und Korrosion. Ebenso werden aus den Kamerabildern und optischem Sensor die Fugenbreite mit einer Messgenauigkeit ± 5 mm sowie Versätze im Fugenbereich mit einer Messgenauigkeit ± 4 mm bestimmt.

- Durch den Einsatz von Ultraschallscannern werden die Rohrgeometrie und damit Ablagerungen, Abflusshindernisse bzw. mechanischer Verschleiß unterhalb des Wasserspiegels mit einer Messgenauigkeit ± 2 mm erfasst.
- Für die Risserkennung im wasserführenden Rohrquerschnitt wurden Sensoren auf Basis von Ultraschallverfahren entwickelt. Durch den Einsatz einer Tauchglocke wird zudem die visuelle Begutachtung der Rohrwand im wasserführenden Rohrquerschnitt ermöglicht um Risse ab einer Rissbreiten $\geq 0,5$ mm zu vermessen.
- Für die Erkennung von Infiltrationen im wasserführenden Rohrquerschnitt wurde ein thermosensorisches Verfahren auf Basis der Temperaturdifferenzmessung entwickelt, um auch geringste Mengen infiltrierendes Grundwasser ($\geq 0,1$ l/s (bei $\Delta T \geq 2 - 4^\circ\text{C}$)) zu detektieren.

In Abbildung 96 ist ein Roboter mit Antriebs- und Führungseinrichtung für die Fortbewegung und/oder Positionierung einer Sensoreinrichtung und/oder mindestens eines Werkzeugs zur Reinigung und/oder Sanierung eines Kanals dargestellt. An einem Grundkörper sind ausfahrbare und/oder klappbare Stützen zur Abstützung an der Kanalwand montiert, wobei die Stützen im Bereich der Abstützfläche Antriebseinheiten für die Fortbewegung und/oder Positionierung aufweisen. Dieser Roboter [114] stellt eine frühe Entwicklungsstufe des Inspektionssystems dar.

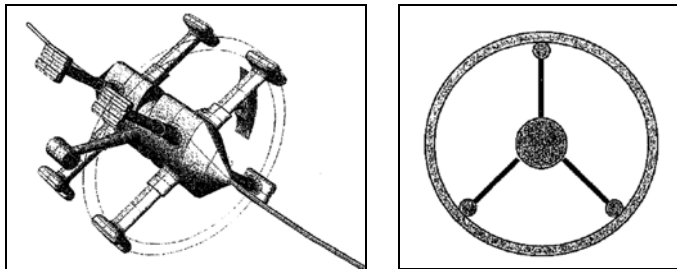


Abbildung 96: Roboter zur Inspektion und/oder Reinigung und/oder Sanierung von Kanälen [114]

5.3 Verfahren zur Untersuchung des Rohr-Boden-Systems

Erste Informationen liefern hier die zuvor in Abschnitt 5.2 dargestellten Verfahren zu Zustandserfassung der Rohre, da aus den dabei erkennbaren Schadensbildern Rückschlüsse auf den Zustand der direkten Umgebung der Rohre gezogen werden können. Die Verfahren zur optischen Inspektion und Vermessung der Rohre stellen somit indirekte Verfahren zur Zustandserfassung des Rohr-Boden-Systems dar.

5.3.1 Optische Verfahren

Werden hinter der Kanalwand Hohlräume vermutet, ist zur Beurteilung der statischen Funktionsfähigkeit des Rohr-Bodensystems eine Feststellung des Schadensausmaßes erforderlich. Eine Möglichkeit, die unmittelbare Kanalumgebung zu untersuchen, kann die Inaugenscheinnahme mittels Endoskopie (vgl. Abbildung 97) darstellen. In der Bauwerksdiagnostik werden Endoskope eingesetzt, um die Bausubstanz nicht großflächig zu schädigen oder vorhandene Schäden nicht weiter zu vergrößern. Dabei wird das Bauwerk zwar nicht zerstörungsfrei untersucht, jedoch reicht die Bohrung kleiner Löcher als Zugang aus, um z.B. feste Bestandteile eines Bauwerks (Wände, abgehängte Decken etc.) zu untersuchen. Endoskope werden hier vor allem zur Beurteilung der Bausubstanz herangezogen, wenn Schädigungen durch Insektenbefall, Rohrbruch, Schimmel, Risse, Fäulnis auftreten (vgl. Abbildung 98) [115].



Abbildung 97: Endoskopisches Inspektionssystem PORTABLE PACK in Verbindung mit einem Videoscope [115]



Abbildung 98: Endoskopische Untersuchung bei einem Termitenbefall in einer Holzkonstruktion [115]

Zu den Endoskopen zählen die starren oder flexiblen Endoskope und deren Unterarten (vgl. Abbildung 99). In der technischen Anwendung gebräuchliche Arbeitsdurchmesser von starren und flexiblen Endoskopen sind 3 bis 10 mm. In der medizinischen Praxis werden eher kleinere Durchmesser als 3 mm verwendet [116].



Abbildung 99: TELECAM® Kamerakopf, Videokamera, 2-Punkt-Lasermesssystem [115]

5.3.2 Mechanische Verfahren

Zur Überprüfung der Verdichtung der Grabenverfüllung ist in Frankreich je Haltung eine Prüfung vorgeschrieben. In der Regel wird in der Mitte der Haltung eine Rammsondierung durchgeführt. Um mehr Einzelinformationen je Haltung zu gewinnen wird von der SAGEP service MAC, Paris das sog. „Ovameter“ eingesetzt. Von diesem Messgerät stehen 4 Varianten zu Verfügung, um den Nennweitenbereich bis DN 600 abzudecken. Hauptbestandteil des „Ovameters“ sind vier horizontal angeordnete Druckluftzylinder (Druckkraft je 1.000 N), ein Drucksensor und ein Dehnungsmesssensor (vgl. Abbildung 100). Zur Ermittlung der elastischen Eigenschaften des Rohr-Boden-Systems wird das als Prototyp einsatzfähige Gerät („Ovameter“) von einem TV-Inspektionssystem durch den Kanal gezogen.

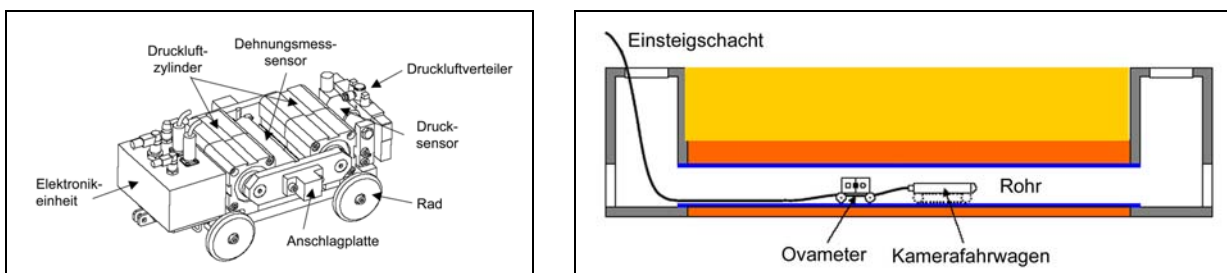


Abbildung 100: Bestandteile des „Ovameters“, nach [117]

Am 27.02.2007 konnte der Einsatz (Gussrohr, DN 250) eines „Ovameters“ der SAGEP service MAC in Paris begleitet werden (Abbildung 101).

Zur Ermittlung der horizontalen Bettungssteifigkeit werden die Druckluftzylinder ausgefahren, bis sich das Rohr um 0,1 % bezogen auf den vorhandenen Durchmesser ovalisiert hat. Die Durchmesseränderung liegt in Abhängigkeit der Bettungssteifigkeit zwischen 50 und 1.000 μm . Die dazu erforderliche Kraft wird gemessen. Die Messung wird jeweils zweimal durchgeführt, wobei nur der zweite Kraftwert protokolliert wird. Die Messungen werden entlang der Leitung in einem Abstand von einem Meter durchgeführt und dauern jeweils etwa 3 Sekunden. Aus der gemessenen Kraft und der aufgetragenen Verformung wird eine Steifigkeit berechnet. Anschließend wird unter Berücksichtigung von Berechnungsparametern für die Rohrsteifigkeit und dem mittleren Rohrdurchmesser die horizontale Bettungssteifigkeit der Leitungszone ermittelt. Dies geschieht unmittelbar während der Messkampagne und wird auf einem Monitor dargestellt.

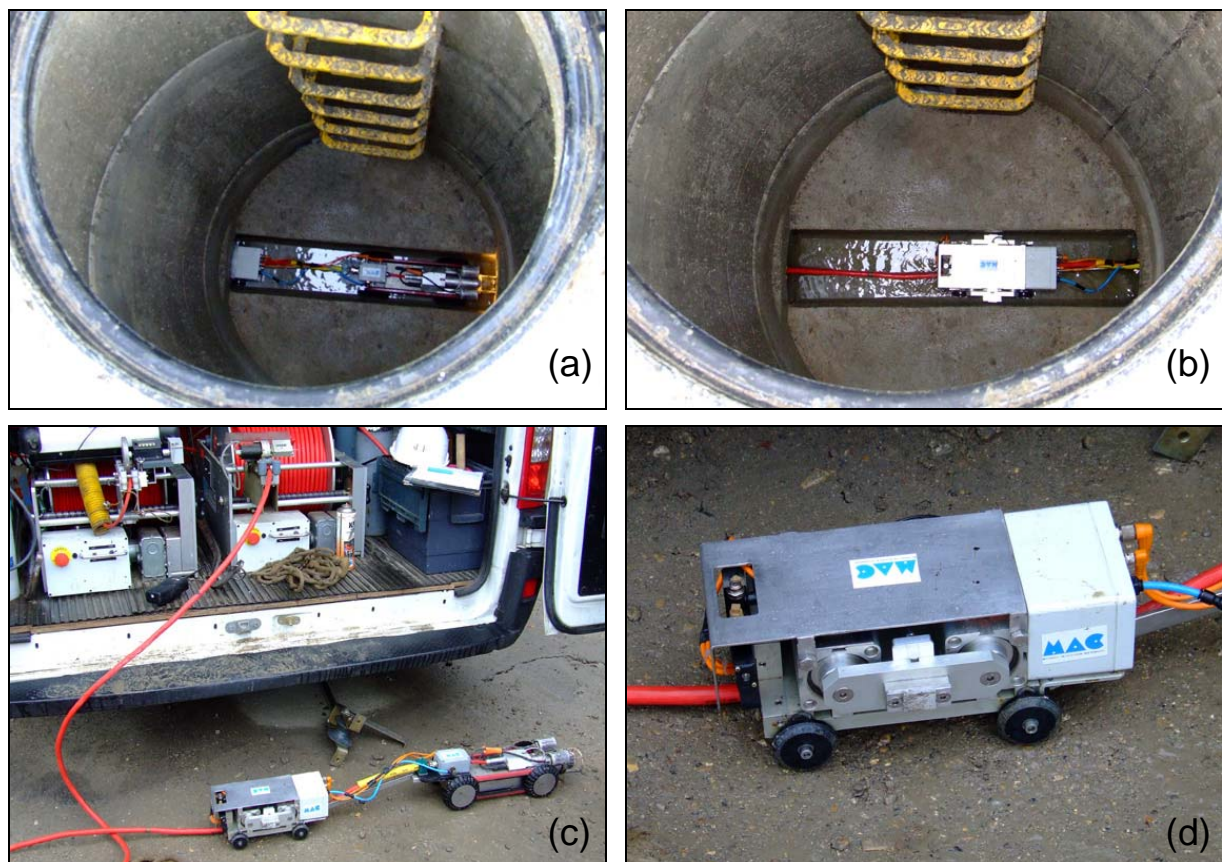


Abbildung 101: Einsatz des „Ovameters“ am 27.02.2007 in Paris [22]

- (a) „Ovameter“ und TV-Inspektionssystem im Kanal
- (b) „Ovameter“, bereit zur Messung
- (c) „Ovameter“ und TV-Inspektionssystem vor dem Inspektionsfahrzeug
- (d) „Ovameter“, Druckzylinder und Anschlagplatte im Vordergrund

Für die Interpretation der Messwerte werden im Laborversuch zwei Referenzwerte ermittelt. Der erste Referenzwert entspricht dem minimal erforderlichen Verformungsmodul E_L , der sich aus einem angenommenen Grad der Proctorverdichtung von 90 % D_{Pr} in der Leitungszone ergibt. Der zweite Referenzwert ergibt sich aus dem Verformungsmodul E_R bei einem Verdichtungsgrad von 95 % D_{Pr} in der Leitungszone. Dieser Wert stellt den ideal erreichbaren Verformungsmodul dar. Zur Ermittlung der Referenzwerte wurden in einem Versuchs-

stand Rohre mit definiert verdichteten Leitungszonen (jeweils 90 % D_{Pr} und 95% D_{Pr}) eingebaut und Testmessungen durchgeführt. Diese Referenzwerte liegen für die in Frankreich üblicherweise verwendeten Verfüllmaterialien in einer Datenbank vor und können für eine Messung vom Operateur abgerufen werden.

Das Messverfahren ist bei allen biegeweichen Rohren anwendbar. Weitere Voraussetzung ist Sand oder Sand/Kies als Verfüllmaterial in der Leitungszone. Bindige Böden erschweren die Interpretation der Messergebnisse.

Eine Verdichtung der Leitungszone gilt als ausreichend, solange 70 % der Messstrecke einen Verformungsmodul oberhalb des Referenzwertes E_L aufweist.

Die Abbildung 102 zeigt beispielhaft die Auswertung einer Messung mit dem „Ovameter“ auf dem Versuchsfeld Champcueil, Frankreich. Untersucht wurde die Hinterfüllung eines PVC Rohres DN 200. Die Abbildung 102 stellt die mittels „Ovameter“ ermittelte Steifigkeit der Hinterfüllung des Rohres (Ovametric stiffness) und die, unter Annahme einer Verdichtung von 95 % D_{Pr} in der Leitungszone, erwartete Bodensteifigkeit (Limit stiffness for q4) dar. Es ist zu erkennen, dass bis zur Station 12 m der „Ovameterwert“ weitgehend oberhalb des erforderlichen Wertes liegt. Nach der Station 12 m folgt ein Bereich mit einer Verdichtung unterhalb des erforderlichen Wertes.

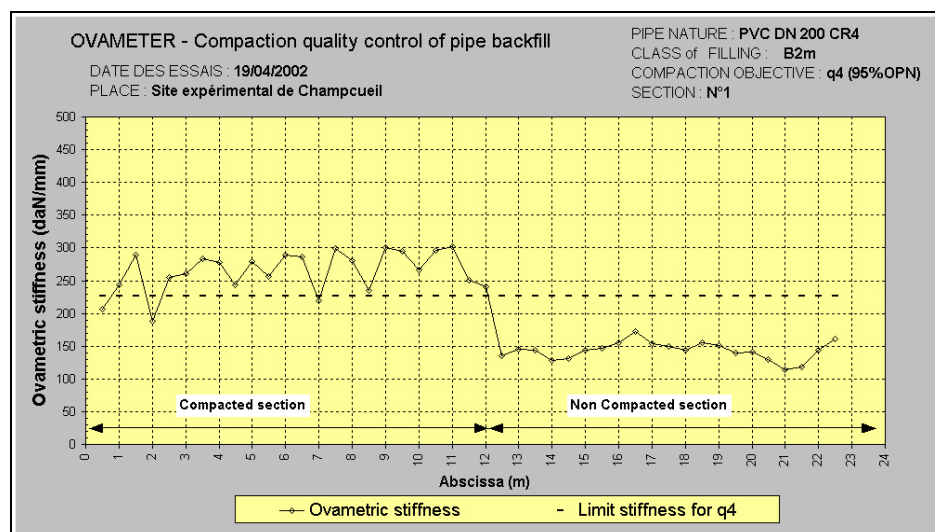


Abbildung 102: Auswertung einer „Ovametermessung“, Versuchsfeld Champcueil [118]

Die Abbildung 103 zeigt das Ergebnis einer Messung in der französischen Stadt Samoussy. Untersucht wurde ebenfalls die Hinterfüllung eines PVC Rohres DN 200. Es ist zu erkennen, die mittels „Ovameter“ ermittelte Steifigkeit der Hinterfüllung des Rohres (Ovametric stiffness) weitgehend oberhalb des erforderlichen Wertes liegt. Im Bereich der Einsteigschächte (Manhole) und eines seitlichen Anschlusses (Lateral) zeigt die gemessene Steifigkeit eine deutliche Unterschreitung des erforderlichen Wertes.

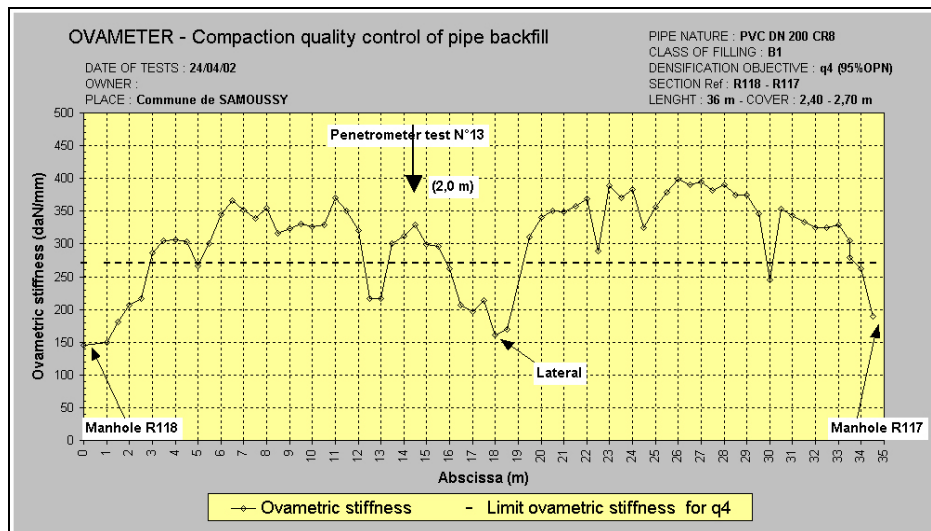


Abbildung 103: Auswertung einer „Ovametermessung“ in Samoussy [118]

Außer zur Verdichtungskontrolle können die Messwerte des Ovameters als Eingangsdaten für eine Kontrollrechnung (3D-FE-Analyse) genutzt werden.

5.3.3 Akustische Verfahren

Ein akustisches Verfahren zur Untersuchung des Rohr-Boden-Systems stellt das „Rohr.Impacto.Meter“ der GSP Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen und dynamische Prüfmethode mbH, Mannheim dar (vgl. Abbildung 104). Bei dem „Rohr.Impacto.Meter“ handelt es sich nach [119] um ein Gerät zur ferngesteuerten Klopfprüfung von Rohren der Nennweite DN 200 bis DN 300. Bei der Klopfprüfung (Schallreflexionsanalyse) wird das Rohr durch einen Hammer in Schwingung versetzt. Eine schlagartige Anregung des verlegten Abwasserrohres mit einem Hammer erzeugt im Prüfobjekt Schwingungen, die sich beim Ausschwingvorgang zu Eigenschwingungen überlagern. Durch räumlich versetzt angeordnete Aufnehmer (Beschleunigungssensoren) wird die Schwingungsantwort erfasst und vom Computer ausgewertet. Mit Hilfe numerischer Modelle werden die Auswirkungen von Fehlstellen (Risse bzw. Hohlräume im Bereich der Rohrbettung) auf die Schwingungsantwort berechnet.

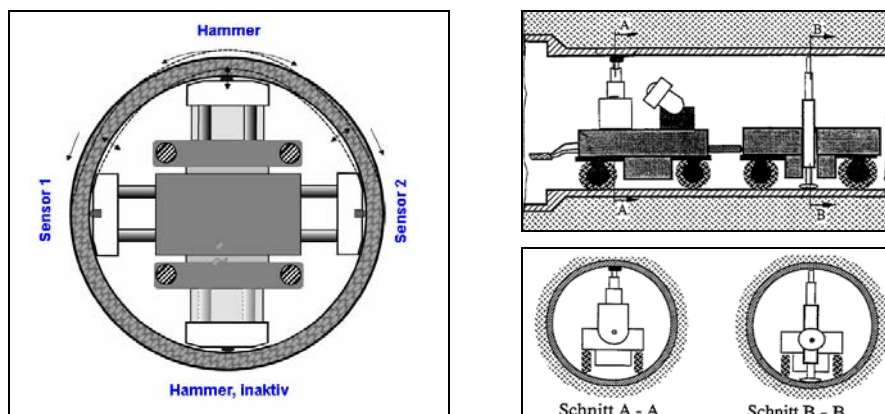


Abbildung 104: Prinzipskizze des „Rohr.Impacto.Meters“, Prototyp III, nach [120] (links), Mess- und Schlagwagen nach [121] (rechts)

Schnitt A-A: Messwagen mit Teleskopstab und Beschleunigungsaufnehmer, nach [121]

Schnitt B-B: Schlagwagen mit Schlagwerkzeug und Abstützplatte, nach [121]

Theoretische Grundlagen der Klopferschallprüfung sind in [120] dargestellt. Nach [120] ist das „*Rohr.Impacto.Meter*“ prinzipiell zur Schadensdiagnose an Abwasserrohren geeignet. Unter idealen Bedingungen können Hohlräume ab einer Querschnittsfläche von 0,4 m² und einer Mindestausdehnung von etwa 0,4 - 0,5 m erkannt werden. Ebenso werden nach [119] fehlerhaft ausgeführte Verdichtungen des Bettungsmaterials nachgewiesen. Lagerungsdefekte in Form von Änderungen der Bettungsverhältnisse ohne Materialabtrag können nach [120] ebenfalls erkannt werden. Die Rissdetektion ist mit der Klopferschallprüfung ebenfalls möglich. Es können Längs- und Querrisse oder Löcher erkannt werden sowie Haarrisse und nicht sichtbare Fehlstellen. Die Klopfprüfung ermöglicht nach [119] eine Unterscheidung zwischen durchgehenden Rissen und Oberflächenschäden. Nach [120] ist neben dem Einsatz der Klopferschalltechnik eine zusätzliche TV-Inspektion unerlässlich. Optisch erkennbare Schadensbilder z.B. Inkrustationen oder Scherbenbildung sowie Störquellen wie Muffen oder Hausanschlüsse können so für die Auswertung der Ergebnisse markiert werden und verhindern Fehlinterpretationen der Messwerte.

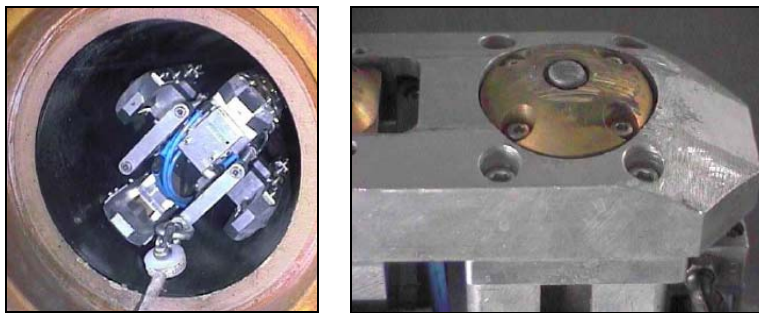


Abbildung 105: „*Rohr.Impacto.Meter*“ Prototyp III im Abwasserrohr (links), Sensorankopplung (rechts) [120]

Der in Abbildung 105 dargestellte Prototyp III des „*Rohr.Impacto.Meters*“ regt nach [120] den Impuls mit einer Schlagfrequenz von etwa $f = 40$ Hz an. Nach [120] ist das „*Rohr.Impacto.Meter*“ bei einer Vielzahl von Rohrmaterialien bzw. -typen erfolgversprechend einsetzbar (vgl. Tabelle 2). Das System ist bei den Rohrwerkstoffen Steinzeug, Beton, Guss, zementbeschichteter Guss und Stahl anwendbar. Lediglich bei Kunststoffrohren ist es aufgrund der Schwingungsdämpfung des Materials nicht einsetzbar.

Tabelle 2: Beurteilung der Aussichten zur Schadensdiagnose für unterschiedliche Rohrtypen [120]

Rohrtyp	Hohlraum/Bettung	Rissdetektion
Steinzeug	sehr gut	sehr gut
Steinzeug, wandverstärkt	gut	sehr gut
Beton	zufriedenstellend	sehr gut
Beton, armiert	ausreichend	gut
Beton, raue Rohrwand	unsicher	unsicher
Gusseisen	(sehr gut)	(sehr gut)
PVC	--	--

Das „*Rohr.Impacto.Meter*“ kontrolliert den gesamten Rohrfumfang. Eine vorherige Reinigung der Haltung ist nicht notwendig. Ablagerungen an der Rohroberfläche stören die Auswertung nicht, so dass auch optisch verdeckte Schäden entdeckt werden. Bei der Messung werden

die Spitzen der Beschleunigungsaufnehmer so an die Rohrwand angedrückt, dass sie Ablagerungen oder Sielhaut durchdringen können. Mit dem „*Rohr.Impacto.Meter*“ kann nach [119] in einem teilgefüllten Kanal bei Trockenwetterabfluss gemessen werden.

Nach [120] ist das Messprinzip zur Rissdetektion geeignet und liefert gleichzeitig Informationen über die Bettungsbedingungen des Rohres. Das Messgerät ist jedoch zur Zeit am Markt nicht verfügbar.

5.3.4 Physikalische Verfahren

5.3.4.1 Elektromagnetische Messung (Radar)

Das Radar-Verfahren ist ein elektromagnetisches Verfahren, bei dem kurze sehr schnell aufeinander folgende elektromagnetische Impulse ausgesendet und von einer Antenne in das Erdreich abgestrahlt werden. Nach der Reflexion an Schichtgrenzen oder Objekten (Leitungen, Rohren, Steinen und Fundamenten) werden diese Signale durch das selbe Gerät wieder empfangen (vgl. Abbildung 106). Laufzeiten und Amplituden der elektrischen Feldstärke E dieser Impulse werden 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 . Die Dielektrizitätskonstante ϵ setzt sich aus der elektrischen Feldkonstante ϵ_0 und der materialabhängigen Dielektrizitätszahl ϵ_r zusammen (Die Werte liegen im verwendeten Frequenzbereich für Böden zwischen $\epsilon_r = 1$ für Luft und $\epsilon_r = 81$ für Wasser [122]). Sie beschreibt die Beziehung von Materialeigenschaften und der Fortpflanzung der elektromagnetischen Welle durch das zu untersuchende Medium, d.h. sie bestimmt die Geschwindigkeit, mit der eine elektromagnetische Welle ein Medium durchläuft. Besondere Beachtung gilt ebenfalls der Leitfähigkeit σ im Ausbreitungsmedium. Je höher die Leitfähigkeit, desto geringer die Eindringtiefe [122].

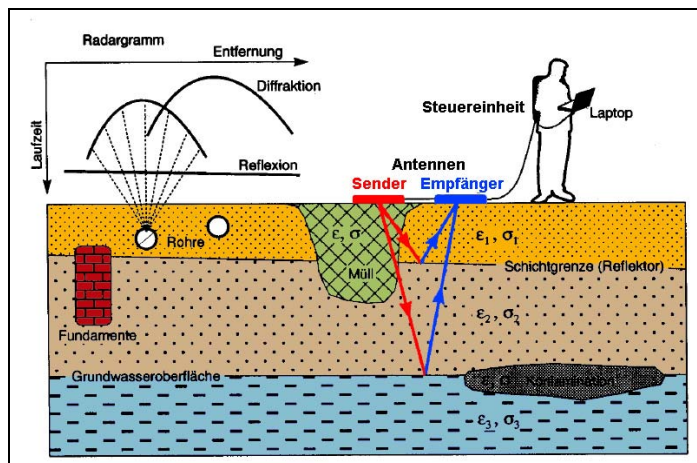


Abbildung 106: Prinzip des Radars [89]

Das Sende- und Empfangssignal wird z.B. durch breitbandige Dipolantennen abgestrahlt und empfangen. Die Arbeitsfrequenzen liegen etwa im Bereich von 300 MHz bis 1,2 GHz [122]. Eine hohe Pulsfolge der Sendesignale ermöglicht quasikontinuierliche, profilhafte Messungen durch Bewegung der Antennenanordnung. Die Messergebnisse werden als Radargramm dargestellt.

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 nie-

derfrequente Untersuchungen. Bei einem durchschnittlichen Wert der relativen Dielektrizitätskonstante $\varepsilon = 9$ für Lockergestein und Böden treten bei Frequenzen 1.200 MHz Wellenlängen λ bis 0,1 m auf. Entscheidend für eine Reflexion ist ein Grenzübergang von einem Medium mit niedrigem ε_r in eines mit hohem oder umgekehrt (Kontrast). Ausschlaggebend für die Detektion von Objekten und Schichten in Böden ist jedoch nicht nur die Reflektivität, sondern vor allem die Homogenität des Mediums, das die Objekte umgibt. Radarmessungen lassen sich vor allem bei hochohmigem Untergrund wie trockenen Sanden mit geringem Tonanteil oder Festgestein erfolgreich einsetzen [89].

Die Abbildung 107 zeigt einen Auszug aus einer Offenlegungsschrift [123] der STN Systemtechnik Nord Rheinmetall Defence Electronics GmbH, Bremen aus dem Jahr 1993. Sie betrifft eine Vorrichtung zur Materialuntersuchung, insbesondere von Wandungen und Hinterfüllungen eines Abwasserkanals. Das System verfügt über eine an einer Transporteinrichtung installierten Sende-/Empfangseinrichtung zur Erzeugung von Mikrowellen (elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge zwischen 1 m und 1 mm, entspricht einem Frequenzbereich zwischen 300 MHz und 300 GHz [124]) und mindestens einer an die Sende-/Empfangseinrichtung angeschlossenen Antenne.

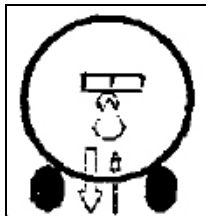


Abbildung 107: Messgerät, nach [123]

Für den speziellen Anwendungsfall in Abwasserkanälen wird derzeit von der RICO EAB Gesellschaft für Mikroelektronik mbH, Kempten bereits ein Radarsystem angeboten [56]. Dieses System wird von der niederländischen Firma M.J. OOMEN, Sprundel eingesetzt. Das Messverfahren wird darüber hinaus von unterschiedlichen Stellen weiterentwickelt [125], [126].

Bei dem System der Fa. RICO wird ein Impuls-Radar (Breitbandradar 900 MHz bis 2,5 GHz) eingesetzt, welches auf einem Trägersystem durch die Leitung gezogen wird (vgl. [127]). Als „Trackingsystem“ dient ein Fahrwagen mit TV-Inspektionskamera (vgl. Abbildung 108 und 109). Die elektromagnetische Vermessung mittels des Radarsystems sowie die TV-Inspektion werden während der Datenaufnahme simultan vom Inspekteur im Inspektionsfahrzeug überwacht. Zum Abgleich der Ergebnisse einer Radarmessung mit den Bildern der Kamerabefahrung erfolgt die Positionsbestimmung durch ein, separat an die Distanzmessung des Datenübertragungskabel gekoppeltes Messrad. In Abhängigkeit des umgebenden Bodens wird nach [127] eine Erkundungstiefe von 1,0 – 1,5 m erreicht. Prinzipiell nimmt bei einer Radarmessung die Auflösung mit steigender erforderlicher Eindringtiefe ab. Je niedriger die Frequenz ist, umso größer ist die Eindringtiefe und umso geringer ist das Auflösungsvermögen. Das Verfahren ist nach [127] einsetzbar für Messungen in Kanälen aus nichtmetallischen Werkstoffen. Bei armiertem Beton bildet sich die Bewehrung aufgrund des ausgeprägten dielektrischen Kontrastes zwischen Beton und Stahl sehr gut ab. Bei Stababständen ≤ 5 cm wird die Erkundung der Hinterfüllung eingeschränkt [127].

Messungen aus dem Kanal heraus können Informationen über die Lagerungs- und Überschüttungsverhältnisse im Nahbereich eines Kanals liefern, die durch Messungen von der Straßenoberfläche durch den Straßenoberbau hindurch nicht erreicht werden. Insbesondere sind dies die Bettungsverhältnisse im „Zwickelbereich“ und unterhalb des Kanals. Voraussetzung für die Erkennung von Anomalien ist jedoch, dass in dem zu untersuchenden Bereich eine deutliche Änderung der dielektrischen Eigenschaften (Feldkonstante, Leitfähigkeit) vorliegt. Das Radarsystem ist nicht anwendbar bei anstehendem Grundwasser.



Abbildung 108: Kanalkamerafahrwagen mit Kanalradarantenne auf einem 360°-drehbaren Trägersystem [122]



Abbildung 109: Kanalradar auf einem Träger an ein Video-Trackingsystem gekoppelt [127]

Ein laufendes F-E Projekt zur Inspektion von Abwasserkanälen mittels Radar stellt das Forschungsvorhaben „Verfahren zur Überprüfung von Qualitätsanforderungen im Bereich der Leitungszone mittels Ultra-Breitband-Radar (Radarraupe)“ des FITR Forschungsinstitut für Tief- und Rohrleitungsbau, Weimar dar. Das FITR hat mit der „Rohrraupe“ ein Trägergerät für Inspektions- und Reinigungstechniken entwickelt (vgl. Abbildung 110). Nach [126] sind Rohrleitungen, Kanäle und Hausanschlussleitungen im klassischen Rohrleitungsbau und Prozessrohre im Industrie- und Anlagenbau der Einsatzbereich dieser neuen Technik. Weitere Einsatzgebiete werden in Rohrleitungen für den Transport von Flüssigkeiten, Stäuben und Gasen sowie der Deponietechnik gesehen. Der besondere technische Anspruch gegenüber vorhandener Technik besteht nach [126] in der Überwindung von Rohrbögen bis 90°, dem Befahren von waagerechten und senkrechten Rohrleitungen und dem Überwinden von Hindernissen im Rohr (z.B. Inkrustationen). Der Antrieb und die Steuerung erfolgt elektro-pneumatisch mit einem Betriebsdruck von 4 bis 9 bar.

Im senkrechten Lauf kann das Gerät eine Nutzlast bis zu 25 kg mitführen. Die Reichweite in der Rohrleitung beträgt ca. 150 m. Die Rohrraupe arbeitet mit einer Geschwindigkeit von 60 bis 120 m/h. Der Prototyp kann in Rohren der Nennweiten DN 100 bis DN 200 eingesetzt werden. Größere Nennweiten können durch Änderung der Hebelarme erreicht werden. Zum Einsatz in unterschiedlichen Rohrmaterialien können die Füße in verschiedenen Materialien modifiziert werden.

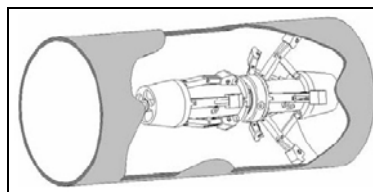
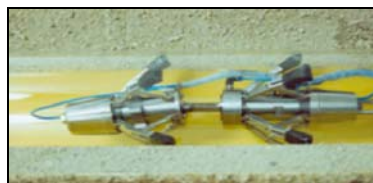
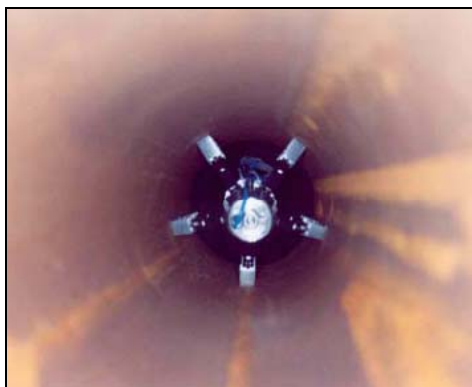


Abbildung 110: Rohrraupe [126]

Die „Rohrraupe“ soll als Trägersystem für ein Hochfrequenz-Nahbereichsradar (Ultra-Breitband-Radar) dienen. Mögliche Frequenzen liegen hier im Bereich von < 1 GHz bis ca. 10 GHz. Im Rahmen dieses Projektes soll ebenfalls eine Software entwickelt werden, die eine direkte und lagebezogene Bewertung des Messergebnisses der „Radarraupe“ ermöglicht [128].

Ein weiteres laufendes F-E-Vorhaben zur Inspektion von Abwasserkanälen mittels Georadar stellt das vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV) geförderte Forschungsprojekt „Einsatzmöglichkeiten des Georadars als Verfahren zur Detektion und Bewertung von Lagerungsdefekten und Hohlräumen im Bereich erdverlegter Abwasserkanäle“ dar. Dieses Projekt wird zur Zeit gemeinsam vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA), der GBM Wiebe Gleisbaumaschinen GmbH und der GKE Consult Beratende Ingenieure GmbH durchgeführt. Ziel des Forschungsvorhabens ist die Etablierung des Georadarverfahrens als zerstörungsfreie Erkundungsmethode für den großflächigen Einsatz zur Detektion von Lagerungsdefekten und Hohlräumen im Bereich erdverlegter Abwasserkanäle [125].

Die Abbildung 111 zeigt ein zum Patent angemeldetes sog. Kanalinspektionsfahrzeug. Nach [129] besteht das System aus einem Georadarmesskopf, einem Aufnahmeelement für den Georadarmesskopf und Mitteln zum translatorischen Bewegen des Kanalinspektionsfahrzeuges. Außerdem aus einem Antriebsmittel für das Aufnahmeelement zum Bewegen des Georadarmesskopfes auf einer ebenen, geschlossenen Bahn, die in einer Ebene liegt, die senkrecht zu der Richtung der translatorischen Bewegung verläuft. Ein Positionssensor dient zur Bestimmung der Position des Georadarmesskopfes [129].

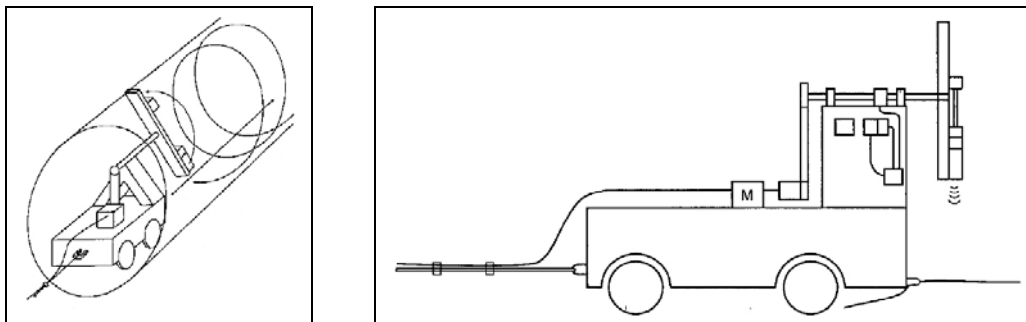


Abbildung 111: Kanalinspektionsfahrzeug und Verfahren zur Kanalinspektion, nach [129]

5.3.4.2 Radiometrische Messung

Die Computertomographie stellt ein weiteres Messverfahren dar, welches vorwiegend in der Medizin aber auch in anderen Fachgebieten, z.B. der Archäologie und der Materialprüfung, angewendet wird.

Die Röntgenstrahlen, die durch das Untersuchungsobjekt geschickt werden, werden von mehreren Detektoren gleichzeitig aufgezeichnet. Der Vergleich zwischen ausgesandter und gemessener Strahlungsintensität gibt Aufschluss über die Abschwächung (Attenuation) der Strahlung durch das zu untersuchende Gewebe. Luft hat einen Absorptionswert von -1.000 , Wasser von 0 und Metall von über 1.000 (dargestellt auf der nach oben offenen Hounsfield-Scala). Bei dem dargestellten Spiralverfahren (vgl. Abbildung 112), wird das zu untersuchende Objekt mit konstanter Geschwindigkeit entlang seiner Längsachse durch die Strahlenebene bewegt wird, während die Strahlenquellendetektoreinheit konstant rotiert. Die aufgenommenen Daten werden mittels eines mathematischen Verfahrens im Computer zu einem Volumendatensatz zusammengefügt, aus dem Schnittbilder beliebiger Ebenen rekonstruiert werden können [130]. Die Abbildung 112 zeigt die Untersuchung eines Probekörpers (KG-Rohr) bestehend aus einem Rohrabschnitt und einem umgebenden, durchwurzelt

Bodenkörper. Das Spiral-CT zeigt einen Bereich außerhalb des Rohres, der als Wurzel identifiziert wurde.

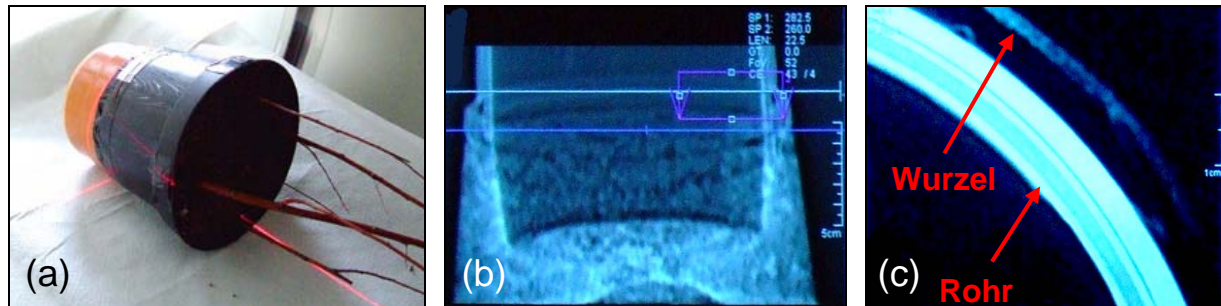


Abbildung 112: Untersuchung eines Probekörpers (KG-Rohr) mittels Spiral-CT [22]

- (a) Probekörper (KG-Rohr) während der Untersuchung
- (b) Berechnetes Computertomogramm
- (c) 2D-Schnittbild des Probekörpers

Im militärischen, polizeilichen, zoll- und sicherheitstechnischen Einsatz werden mobile Röntgengeneratoren eingesetzt. Bei Röntgenstrahlen handelt es sich um elektromagnetische Wellen. Sie entstehen zum einen, wenn schnelle Elektronen in der Elektronenhülle von Atomen gebremst werden. Die Differenz zwischen dem Energieniveau des schnellen Elektrons vor der Bremsung und des langsameren Elektrons nach der Bremsung wird als Röntgenstrahlung emittiert. Sowohl bei Röntgen- als auch Gammastrahlung handelt es sich um elektromagnetische Strahlung. Sie unterscheiden sich in ihrer Wellenlänge und ihrer Entstehungsgeschichte. Die verschiedenen Wellenlängenbereiche im elektromagnetischen Spektrum besitzen verschiedene Namen. Sie gehen aber teilweise ineinander über. Röntgenphotonen haben eine Wellenlänge von 5pm bis 10nm, was einem Energiebereich von 20 bis 250 keV (Kilo-Elektrovolt) entspricht. Der Bereich der Gammastrahlung beginnt bei 10 pm und geht bis zu unendlich kleinen Wellenlängen. Entsteht die Strahlung bei einem Kernzerfall, so spricht man von Gammastrahlung [131].



Abbildung 113: Tragbares digitales Röntgenprüfsystem [132]



Abbildung 114: INSPECTOR®-Röntgengeneratoren XR150 [82]

Das in Abbildung 113 dargestellte System SCANTRAK [132] ist ein transportables digitales Röntgenprüfsystem das zur Überprüfung verdächtiger Gegenstände vor Ort eingesetzt werden kann. Das System arbeitet mit unterschiedlichen transportablen Röntgenstrahlquellen (vgl. [82]). Die INSPECTOR®-Röntgengeneratoren (vgl. Abbildung 114) sind nach [82] außer zum Einsatz mit Polaroidfilmen und digitalen Speicherfolien auch für die Verbindung mit Real-Time-Video-Systemen geeignet. Bei letzterem steht das Röntgenbild auf dem Monitor un-

mittelbar zur Analyse zur Verfügung. Röntgengeneratoren können sich hinsichtlich ihrer Pulsrate und Pulsdauer unterscheiden.

Das System Pipe Explorer™ (SEA Science and Engineering Associates, Inc.) wurde entwickelt, um radioaktive Kontaminationen innerhalb von Leitungssystemen zu detektieren. Dabei wird eine luftdichte Membran oder ein Kunststoffschlauch in den zu untersuchenden Kanal invertiert. Die Membran ragt aus der Inversionstrommel heraus und wird unter Einsatz von Luftdruck in die zu untersuchende Leitung gestülpt und richtet sich dort auf (vgl. Abbildung 115 und 116).

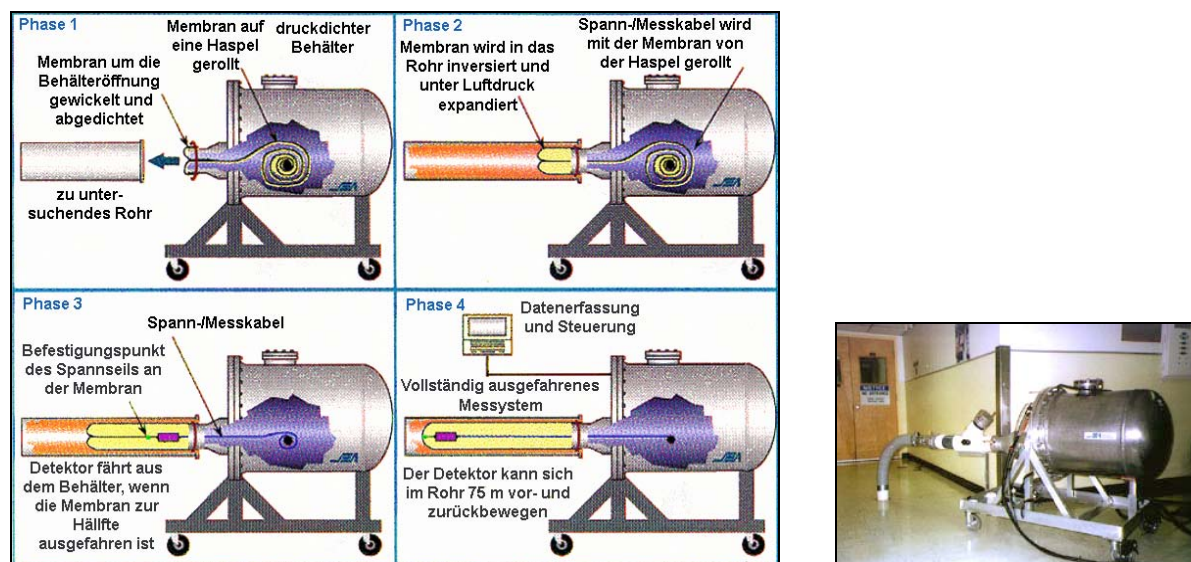


Abbildung 115: Entwicklung des Pipe Explorer™ Systems, nach [133] und [134]

Besonderheit des Systems Pipe Explorer™ ist, dass der geschützte Arbeitsraum und die Detektoren zur Messung, z.B. Inspektionssysteme wie der „Pipe Crawler“ der Radiological Services Inc. (vgl. Abbildung 117), eine geschlossene Einheit bilden. Das Messsystem ist in die Inversionstrommel integriert und an den zu invertierenden Schlauch gekoppelt. Durch den Einsatz der Membran soll verhindert werden, dass eine Kontamination durch das, sich bewegende Messsystem verteilt wird.



Abbildung 116: Pipe Explorer™ in der Praxis [133]

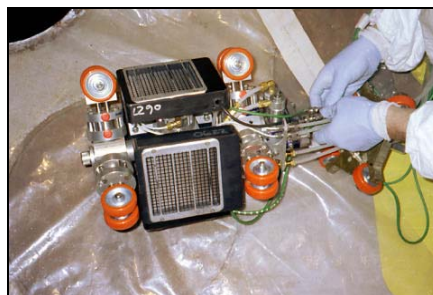


Abbildung 117: Radiologisches Vermessungssystem „Pipe Crawler“ [103]

Übertragen auf die Untersuchung von Abwasserkanälen könnte z.B. nach Einbau von Dichtscheiben zur Vorflutsicherung ein Kunststoffschlauch in den zu untersuchenden Kanal invertiert werden. Nach der Inversion kann dieser Schlauch sowohl mit Druckluft als auch mit Frischwasser gefüllt werden. Auf diese Weise wird dann im Kanal ein abwasserfreier und sauberer Arbeitsraum für Sensoren zur Kanalinspektion geschaffen. Die Inversion derarti-

ger Schläuche (Preliner) wird heute bei der Sanierung von Abwasserkanälen standardmäßig durchgeführt. Sie werden bei der Linersanierung immer dann eingesetzt, wenn eindringendes Grundwasser die Harz-Mischung aus dem Liner waschen könnte bzw. bei polyesterharzgetränkten Linern das Austreten der Harzes in das Grundwasser verhindert werden muss.

Ein für den Einsatz in Pipelines konzipiertes Inspektionssystem stellt der Pipeline X-ray Crawler des Anbieters NDT Equipment Services Ltd., Billingham Cleveland (vgl. Abbildung 118) dar. Das System ist nach [135] für den Einsatz in Rohren der Nennweite DN 250 bis DN 1500 geeignet und kann mit unterschiedlichen Strahlungsquellen ausgerüstet werden.



Abbildung 118: Pipeline X-ray Crawler [135]

Weiterreichende Information zu diesem System sind z.Z. nicht verfügbar.

5.3.5 Multisensorsysteme

Zahlreiche der bereits dargestellten Inspektions- und Messverfahren sowie Sensoren lassen sich auch in Kombination einsetzen, um die Aussagekraft der Inspektion zu erhöhen und ggf. auch durch Verschneidung von Informationen weitergehende Erkenntnisse zu gewinnen. Nachfolgend werden einige sog. Multisensorsysteme dargestellt, die sowohl auf bewährte Technik zurückgreifen als auch messtechnische Neuentwicklungen in das Gesamtsystem integrieren.

5.3.5.1 KARO

Ein erstes multisensorisches Schadensdiagnosesystem wurde Mitte der neunziger Jahre vom IITB [136] in Kooperation mit dem Forschungszentrum Karlsruhe und Industriepartnern im Rahmen des vom BMBF geförderten „KARO-Projektes“ entwickelt und prototypisch realisiert. Die Entwicklung der Sensorik konzentrierte sich nach [137] auf die Teilziele (vgl. Abbildung 119):

- Inspektion der sichtbaren Rohrbereiche durch optische 3D-Vermessung und Luftultraschallsensoren,
- Detektion verborgener Schäden mit einem Mikrowelle-Messsystem und Tauchultraschall-Sensoren, bzw. einem optionalen Radarsystem und
- umfassende objektivierte Schadenserfassung und –klassifizierung durch Multisensor-Signalauswertung.

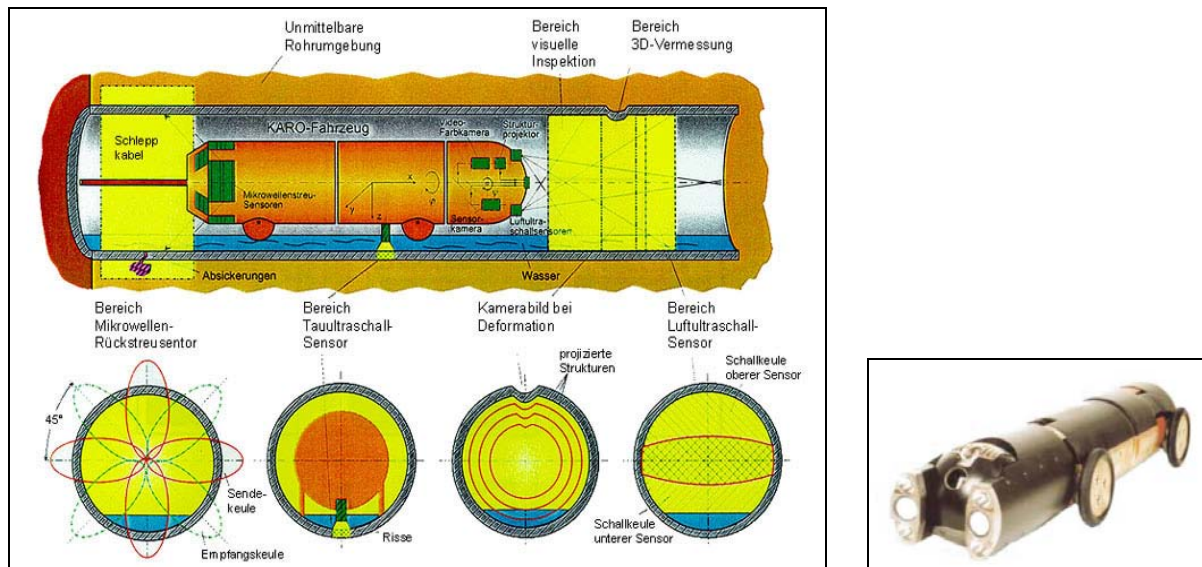


Abbildung 119: Multisensorisches Schadensdiagnosesystem KARO [103]

5.3.5.2 SAM

Die Weiterentwicklung der im „KARO-Projekte“ entwickelten Sensoren, des Mikrowellen-Rückstreu-Sensors (MRS) (vgl. Abbildung 120) und des optischen 3D-Lichtschnitt-Sensors (OLS), sowie die Schaffung einer intelligenten Neuro-Fuzzy-basierten Auswertungssoftware für eine große Bandbreite von Schadensklassen waren Gegenstand des von der DFG geförderten Verbundvorhabens „Schadensdiagnose bei Abwasserkanälen mit Multisensorsystemen SAM“ der Universität Karlsruhe und des Tiefbauamtes der Stadt Rastatt.

Im Rahmen des Projektes „Multisensorsystemen SAM“ wurde der Mikrowellen-Rückstreu-Sensor (MRS) dahingehend weiterentwickelt, dass es nach [136] möglich wurde, Hohlräume im Nahbereich eines Kanals zu detektieren. Nach [136] werden bei einer Frequenz von 2,45 GHz nichtmetallische Materialien bis zu einer Wanddicke von 75 – 120 mm durchdrungen. Frequenzbänder bei 870/434 MHz lassen nach [136] etwa die 3-fache bzw. 6-fache Eindringtiefe zu. Die unsymmetrisch geneigte Antennenanordnung (vgl. Abbildung 121) erlaubt eine schnelle radiale Erfassung der Leitungszone. Der Sensor wurde in einem realen Abwasserkanal mit gutem Erfolg erprobt. Das Verfahren ist nach [136] bei nichtmetallischen Rohwerkstoffen einsetzbar. Die Abbildung stellt das Messprinzip des Mikrowellen-Rückstreu-Sensors dar. In Tabelle 3 finden sich Eindringtiefe und Außenwand-Reflexion bei verschiedenen Rohrhinterfüllungen.

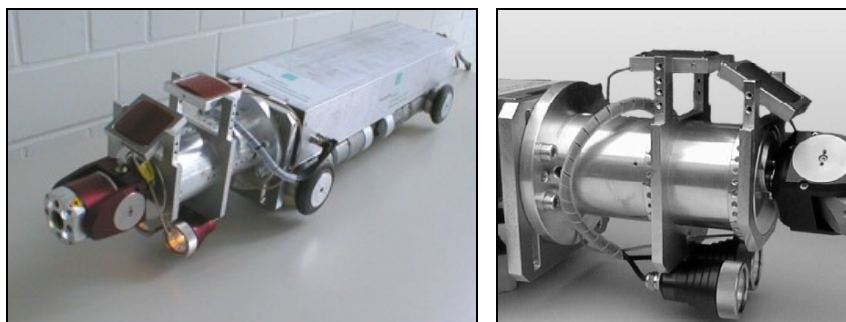


Abbildung 120: Multisensorsystem SAM und Mikrowellen-Rückstreu-Sensor (MRS) [136]

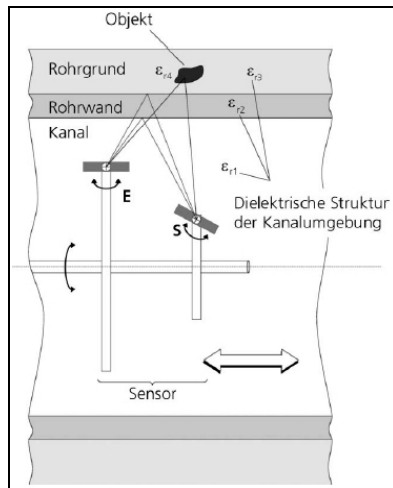


Tabelle 3: Eindringtiefe und Außenwand-Reflexion bei verschiedenen Rohrhinterfüllungen, nach [138]

Rohrhinterfüllung	Eindringtiefe [mm]	Außenwand Reflexion (bei senkrechtem Einfall)		
		Steinzeug	Beton	Kunststoff
Sand trocken	110	0 %	0 %	2%
Sand feucht	43	8 %	13 %	27%
Erde trocken	79	0 %	1 %	1%
Erde feucht	28	15 %	11 %	24%
Luft	∞	15 %	19	7 %
Wasser	35	36 %	31 %	46 %

Abbildung 121: Aufbau und Messprinzip des Mikrowellen-Rückstreu-Sensor (MRS) [138]

Ebenfalls wurde im Rahmen des „SAM-Projektes“ am Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe ein Gamma-Gamma Sensor entwickelt (vgl. Abbildung 122). Nach [136] kam eine Gamma-Gamma-Sonde aus dem Bereich der Bohrlochgeophysik zum Einsatz. Das Messsystem besteht aus der Kombination einer Gammaquelle mit einem Kristalldetektor. Zur Messung wird die Sonde mit Hilfe eines Zentrierschlittens mittig durch den Kanal gezogen. Änderungen der Kanalumgebung werden durch die Analyse der rückgestreuten Gamma-Quanten detektiert. Dabei werden Dichteänderungen erfasst. Die Verwendung einer ¹³⁷Cs-Quelle mit γ -Energie 0,66 MeV erlaubt beispielsweise eine Eindringtiefe bis zu 120 mm. Andere Gammaquellen erlauben größere Eindringtiefen. Die Messeinrichtung konnte im Laborversuch in Steinzeugkanälen mit Erfolg angewandt werden. Insgesamt ist festzustellen, dass das System im universitären Bereich entwickelt wurde und sich noch nicht in einem marktverfügbaren Entwicklungszustand befindet.



Abbildung 122: Gamma-Gamma-Rückstreu-Sensor (GGS) [136]

Ein weitere Komponente des Multisensorsystems SAM stellte ein hydrochemischer Sensor dar, mit dem Grundwasserinfiltrationen erkannt werden sollten. Mit dem Sensor konnten nur wenige Wasserparameter gemessen werden, daher muss sich zur erfolgreichen Leakageortung die Abwasserzusammensetzung signifikant von der Grundwasserchemie unterscheiden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass unter den gegebenen Randbedingungen eine Grundwasserinfiltration erkannt werden konnte. Ebenfalls zur Erkennung von Infiltrationen bzw. Exfiltrationen wurde ein geoelektrische Kanalmesssonde AMS-4 (vgl. Abschnitt 5.2.4.3)

eingesetzt. Weiterhin kam zur Klopferschallprüfung das „*Rohr.Impacto.Meter*“ (vgl. Abschnitt 5.3.2) zum Einsatz [139].

Eine Bewertung und ein Vergleich des Mikrowellen-Rückstreu-Sensor (MRS) und des Gamma-Gamma-Rückstreu-Sensor (GGS) mit den Ergebnissen der Anwendung der Klopferschallprüfung, der Geoelektrik und einer Videobefahrung ist in [120] dargestellt. Nach [120] eignen sich insbesondere die γ -Sonde und der Mikrowellen-Rückstreu-Sensor zur Detektion von Hohlräumen hinter der Kanalwand. Zur Detektion anderer Schadensbilder, z.B. Risse oder Verformungen scheinen nach [120] die Klopferschallprüfung, das geoelektrische Verfahren und die optische Inspektion besser geeignet.

5.4 Verfahren zur Untersuchung des Bodenkörpers

5.4.1 Mechanische Verfahren

Untersuchungen des Bodenkörpers erfolgen „*klassisch*“ durch Aufschlüsse, z.B. Bohrungen oder Schürfe. Direkte Verfahren der Baugrunderkundung liefern Informationen zur Baugrundsichtung und ermöglichen die Entnahme von Bodenproben. Indirekte Verfahren liefern Messwerte, die Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Baugrunds ermöglichen. Dazu werden z. B. Ramm- oder Drucksonden eingesetzt.

Rammsonden besteht aus einer Rammspitze und einem Fallgewicht. Die Sonde wird durch Schläge des Fallgewichts aus festgelegter Höhe in den Boden eingerammt. Die Schlagzahl, die für das Eindringen der Sonde um einen bestimmten Weg erforderlich ist, lässt Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Bodens zu. Von der Oberfläche aus werden leichte, mittelschwere und schwere Rammsondierungen eingesetzt [140].

Bei dem Einsatz von Drucksonden wird eine geometrisch genau festgelegt Spitze mit konstanter Geschwindigkeit in den Baugrund eingedrückt. Dabei kann der Spitzendruck, die Mantelreibung und der Porenwasserdruck gemessen werden. Aus den Messwerten können Rückschlüsse auf die Festigkeit und Zusammendrückbarkeit des Bodens gezogen werden. Zur zuverlässigen Auswertung von Drucksondierungen sind zusätzlich Informationen über die Baugrundsichtung erforderlich [140].

5.4.2 Physikalische Verfahren

5.4.2.1 Seismische Messung

5.4.2.1.1 Reflexions- und Refraktionsseismik

Das Verfahren der Seismik beruht auf der Auswertung von elastischen Wellen, die künstlich angeregt und nach dem Durchlaufen des Untergrundes aufgezeichnet werden. An Grenzflächen oder Inhomogenitäten im Untergrund, an denen sich die sogenannte seismische Impedanz des Materials (Produkt aus Geschwindigkeit und Dichte) ändert, wird ein Teil der Energie dieser Wellen beeinflusst. Die Wellen können reflektiert, refraktiert oder diffraktiert werden (vgl. Abbildung 123). Aus der Laufzeit z.B. der reflektierten Wellen - von der Abstrahlung an der seismischen Quelle bis hin zur Registrierung durch das Geophon oder Hydrophon (elektro-mechanische Wandler, die Bodenschwingungen in analoge Spannungssignale umwandeln) kann, unter Verwendung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten, die aus dem Datenmaterial bestimmt werden, auf die Entfernung der reflektierenden Grenzschicht (reflektierendes Objekt) zur Quelle und Aufnehmer geschlossen werden. Die Registrierung der angeregten seismischen Wellen erfolgt stets mit mehreren Geophonen, die in regelmäßigen Abständen platziert werden. Am einfachsten ist die Erkundung von der Erdoberfläche aus. In Kanälen werden diese Wellen im Scheitel, den Kämpfern oder auf der Sohle generiert. Ein seismisches Signal kann verschiedene Wellenarten beinhalten. So unterscheidet man u.a. Kompressionswellen (P), Scherwellen (S), Oberflächenwellen, aber auch Störwellen, wie Luftschall oder Verkehrserschütterungen, die jeweils an Impedanzänderungen im Untergrund reflektiert, refraktiert, diffraktiert werden oder von einer Wellenart in eine andere Wellenart

konvertieren können. Jeder dieser Signalanteile kann unterschiedliche Informationen für die Erkundung liefern. Ziel ist es, bei der seismischen Datenbearbeitung, diese Informationen mit unterschiedlichen Methoden entsprechend herauszuarbeiten. Bei der reflexionsseismischen Bearbeitung werden z.B. die seismischen Spuren nach gemeinsamen Mittelpunkten, den sogenannten CMP (Common Mid Point), sortiert und anschließend nach dynamischen Korrekturen (Geschwindigkeitskorrekturen) 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 [89].

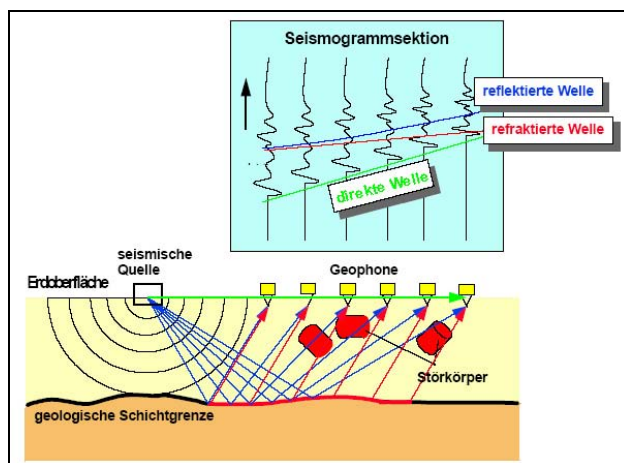


Abbildung 123: Prinzipskizze seismischer Messungen [89]

Die Länge der Profile und der Abstand zwischen den einzelnen Geophonen bestimmen die Eindringtiefe und das Auflösungsvermögen des Verfahrens. Die Anregung der seismischen Wellen kann mit verschiedenen Quellen erfolgen. Die Impulse können mit Hämmern, Lautsprechern oder Vibrationsquellen erzeugt werden (vgl. Abbildung 124) [89].

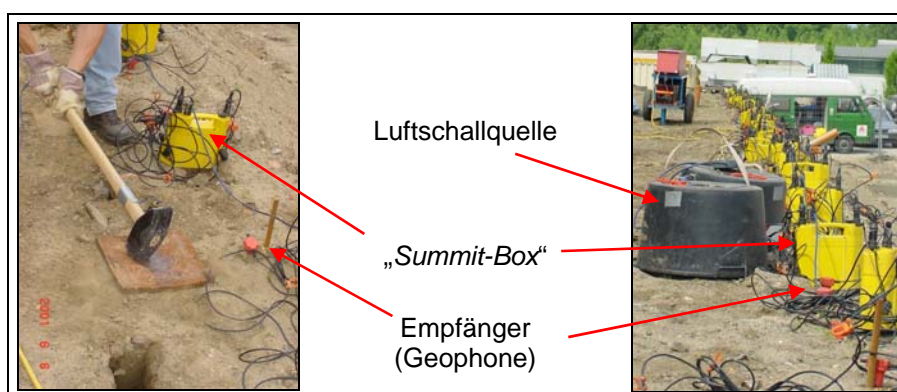


Abbildung 124: Hammerschlag- und Luftschallseismik [3]

Die Abbildung 125 stellt beispielhaft die Auswertung einer seismischen Messung dar, die im Rahmen des Forschungsprojektes „Quantitative Inspektion von Abwasserkanälen und -leitungen mittels geophysikalischer Verfahren“ [3] durchgeführt wurde. Die Messung wurde innerhalb eines begehbaren Abwasserkanals aus Beton entlang einer etwa 32 m langen Messlinien, 60 cm außerhalb des Rohrscheitels, durchgeführt. Als Messsystem wurden 12 akkubetriebene, 2-kanalige „Summit-Boxen“ und 24 Geophone mit einem Geophonabstand

von 12 cm verwendet. Der Schlagpunktabstand betrug 60 cm. Die Auswertung der seismischen Messungen zeigt 8 auffällige Reflexionszonen innerhalb der Kanalwand. Außerhalb des Rohres wurden ebenfalls 8 auffällige Reflexionszonen erkannt. Diese deuten auf möglichen Auflockerungszonen, verfestigte Bereiche, Hohlräume oder Findlinge hin. Aus der Reflexionslaufzeit und der Wellengeschwindigkeit können die Tiefenlage und qualitativ die Dichte bestimmt werden. Eine weitere Charakterisierung der erkannten Anomalien ist anhand des Reflexionsbildes allein nicht möglich. Insgesamt wurden alle erkannten Anomalien jedoch als relativ schwach eingestuft.

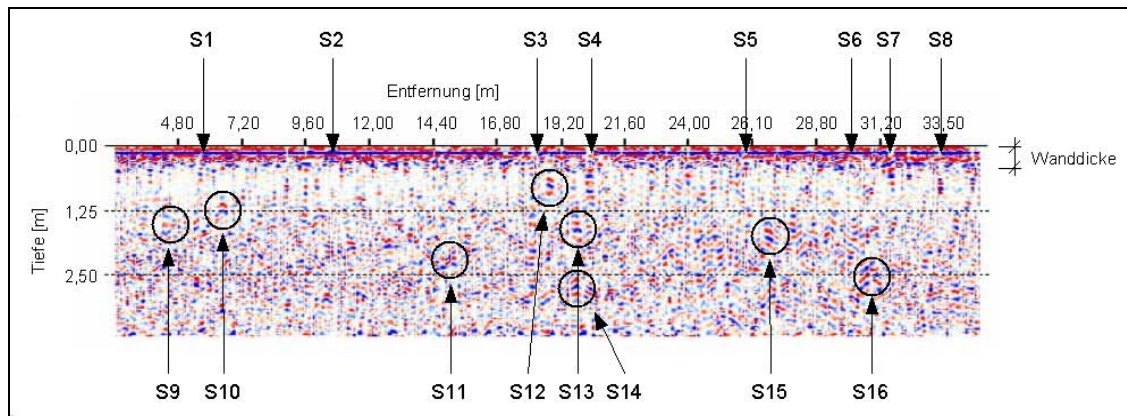


Abbildung 125: Ergebnisse einer seismischen Messung in einem Abwasserkanal, nach [3]

Bei der Reflexions- und Refraktionsseismik müssen sich Sender und Empfänger jeweils entweder innerhalb des Kanals oder an der Geländeoberfläche befinden. Untersuchungen innerhalb eines begehbaren Kanals bzw. von der Geländeoberfläche wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „Quantitative Inspektion von Abwasserkanälen und -leitungen mittels geophysikalischer Verfahren“ [3] durchgeführt. Dabei konnten aussagefähige Ergebnisse erzielt werden. Die zur Verfügung stehende Technik zur Reflexions- und Refraktionsseismik kann die Anforderungen an einen Einsatz innerhalb eines nicht begehbaren Abwasserkanals z.Z. nicht erfüllen. Eine gleichzeitige Signalanregung und –aufnahme ist mit den, in der Regel für den Einsatz an der Geländeoberfläche konzipierten Systemen innerhalb des Kanals nicht möglich. Bei den für den Einsatz in vertikalen Bohrungen vorgesehenen Bohrlochsonden (vgl. Abbildung 126) werden aufgrund der Baulänge bereits Probleme beim Einbringen in den Kanal gesehen.



Abbildung 126: Bohrlochsonde [3]

5.4.2.1.2 Seismische Tomographie

Eine Spezialdisziplin der Seismik ist die seismische Tomographie, die ein flächenhaftes Abbild von der Verteilung der Kompressions-Wellengeschwindigkeit und/oder der Amplitudendämpfung liefert. Somit kann indirekt auf die Verteilung gewisser Materialeigenschaften ge-

geschlossen werden. Die schnittbildartige Erfassung der Daten erfolgt zerstörungsfrei. Bei der seismischen Tomographie handelt es sich um ein Durchschallungsverfahren, bei dem die Sende- und Empfangsquelle räumlich getrennt werden. Der Bereich zwischen der Sende- und der Empfangsquelle wird dabei erkundet. Das Auflösungsvermögen der seismischen Tomographie hängt wesentlich von der Wellenlänge der seismischen Signale ab. Tomographische Durchschallungsverfahren basieren auf Entwicklungen in der Medizin und der zerstörungsfreien Materialprüfung [89].

Die nachfolgend beschriebenen Messungen wurden in einer Testhaltung auf dem Gelände des IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur in Gelsenkirchen durchgeführt. Die Testhaltung ist 20 m lang und besteht jeweils zur Hälfte aus Beton- bzw. Steinzeugrohren der Nennweite DN 300. Die einzelnen Rohre haben eine Baulänge von 2,0 m und sind mit einer Überdeckung von etwa 0,9 m eingebaut. Bei der Herstellung der Haltung im Jahr 2000 wurde zur Verfüllung der Leitungszone und zur Überdeckung ein Sand/Kies 0/8 mm verwendet. An den Endpunkten der Testhaltung befindet sich jeweils ein Einsteigschacht DN 1200. In Abbildung 127 ist die Testhaltung dargestellt. Im Bereich der Testhaltung gelagertes Bodenmaterial schränkte den zugänglichen Messbereich auf etwa 17 m ein. Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Überdeckungshöhe wurde im Rahmen dieses Testeinsatzes auf eine Messung im Bereich der verbleibenden 3 m verzichtet.

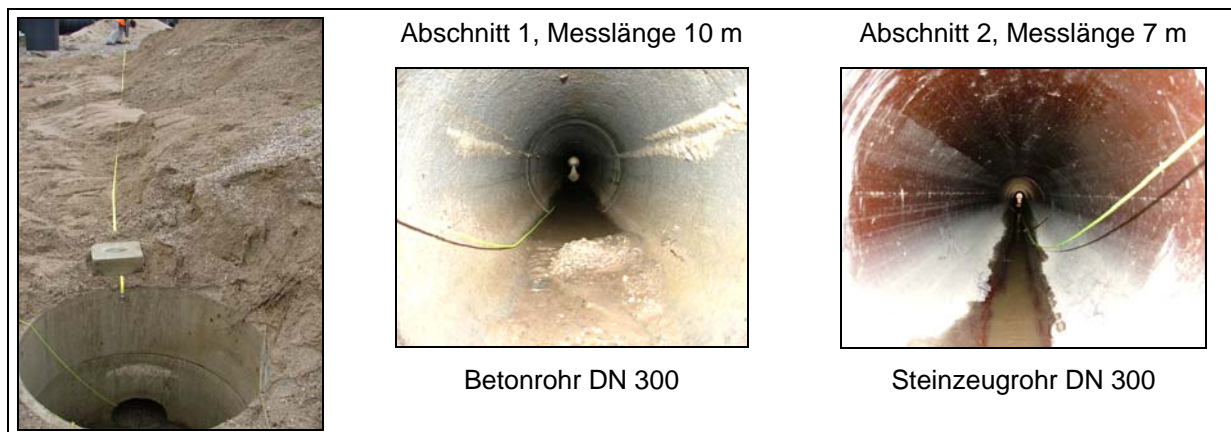


Abbildung 127: Testhaltung, Überdeckungshöhe 0,9 m, Einsteigschächte DN 1000 [22]

Die seismische Tomographie wurde in zwei Varianten angewendet. Zum einen wurden die Signale mittels Hammerschlag an der Geländeoberfläche erzeugt und die Signalaufnahme über Hydrophone innerhalb des Kanals realisiert. Zum anderen erfolgte die Signalanregung mittels einer sog. „Terfenol-D Quelle“ im Inneren des Kanals und die Signalaufnahme mit Geophonen an der Geländeoberfläche. In beiden Fällen musste die Testhaltung mit Wasser gefüllt werden.

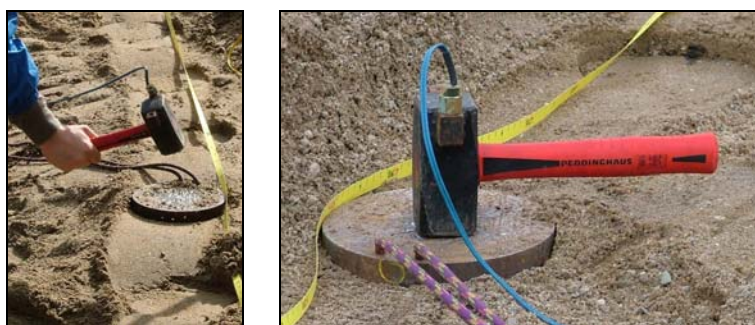


Abbildung 128: Signalanregung mittels Hammerschlag [22]

Bei der Signalanregung mittel Hammerschlag an der Geländeoberfläche diente ein 2 kg Hammer mit piezoelektrischer Keramik als Impulsgeber bzw. Schlagquelle. Der Schlagpunktabstand betrug jeweils 50 cm (vgl. Abbildung 128).

Zur Signalaufnahme innerhalb des Kanal wurde eine Hydrophonkette mit einer Gesamtlänge des messbaren Bereichs von 23,5 m und eine 40-kanalige „Summit-Compact-Box“ eingesetzt (vg. Abbildung 129).



Abbildung 129: „Summit-Compact-Box“ und Hydrophonkette [22]

Der Abstand der Aufnehmer auf der Hydrophonkette beträgt 0,5 m, d.h. bei einem Messdurchgang werden im Kanal Messwerte in einem Abstand von 0,5 m aufgenommen. Um die Messwertdicht zu erhöhen, muss der Abstand der Aufnehmer verringert werden. Bei der durchgeführten Messung wurde daher die Position der Hydrophonkette nach einem Messdurchgang, d.h. einer Signalerzeugung über die gesamte Messtrecke bei einem Abstand zwischen den Schusspunkten von 0,5 m, um jeweils 100 mm verändert (vgl. Abbildung 130). Anschließend erfolgte ein erneuter Messdurchgang, so dass sich der effektiver Abstand der Einzelaufnahmen in der Hydrophonkette auf 100 mm verkürzte, d.h. Messwerte im Abstand von 100 mm vorlagen. Zur Ankopplung der Hydrophone an die Rohrwand muss die Messstrecke wassergefüllt sein.

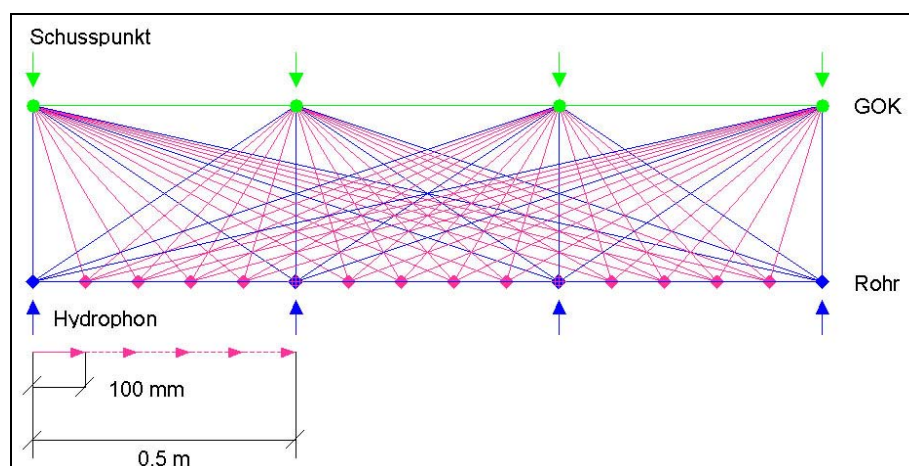


Abbildung 130: Schematische Darstellung der Positionen der Signalanregung und der Lage der Hydrophonkette [22]

Zur Signalanregung innerhalb des Kanals wurde eine sog. „Terfenol-D Quelle“ (vgl. Abbildung 131) eingesetzt. Terfenol-D ist ein hochmagnetostruktiver Werkstoff, d.h. er kann sich durch Anlegen eines Magnetfeldes ausdehnen oder zusammenziehen. Terfenol-D ist der Name für die Verbindung $Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_2$. Die beiden ersten Silben stehen für **T**erbium und für **F**errum, die dritte erinnert an den Ort der Werkstoff-Entwicklung: **N**aval **O**rdnance **L**aborato-

ry. Das D sagt aus, dass zur Minimierung der Anisotropieenergie das Element Dysprosium benutzt wird. Im Gegensatz zu piezoelektrischen Wandlern, bei denen unterschiedliche Effekte genutzt werden (Longitudinal-, Transversal-, Schereffekt), spielt bei den heute verfügbaren, ausschließlich stabförmigen Hochmagnetostruktions-Werkstoffen lediglich der Longitudinaleffekt eine Rolle, d.h. die Feldrichtung und die Dehnungsrichtung verlaufen parallel [141]. Die „Terfenol-D Quelle“ wirkt wie ein Lautsprecher, der Schwingungen in einzelnen Frequenzen oder definierten Frequenzbändern im Frequenzspektrum zwischen 1.000 Hz und 8.000 Hz abstrahlen kann. Im Rahmen des Testeinsatzes kamen beide Varianten zur Anwendung. Zur Übertragung der abgestrahlten Wellen muss die Messstrecke wassergefüllt sein.



Abbildung 131: Terfenol-D Quelle [22]

Zur Signalaufnahme an der Geländeoberfläche wurden 20 akkubetriebene, 2-kanalige „Summit-Boxen“ und 40 Geophone mit einem Geophonabstand von 50 cm verwendet (vgl. Abbildung 132). Aufgrund der gegebenen Topographie waren lediglich 33 Geophone aktiv.



Abbildung 132: „Summit-Boxen“ und Geophone [22]

Nachfolgend ist ein Beispiel für die Auswertung der Messdaten für die Variante der Signalanregung an der Geländeoberfläche und eine Signalaufnahme im vollgefüllten Kanal mittel Hydrophon dargestellt.

Die Abbildung 133 zeigt die gemessenen Laufzeiten der seismischen P-Wellen (Schallwellen) dargestellt über die einzelnen Schuss- und Aufnehmerpositionen. Diese Auswertung dient der Qualitätskontrolle der durchgeführten Messung. Wenn die Quelle (Schuss) und der Aufnehmer sich an der selben Profilmeterposition befinden, ist in einem homogenen Boden der Laufweg der seismischen Wellen am kürzesten und die Laufzeit der Welle am geringsten.

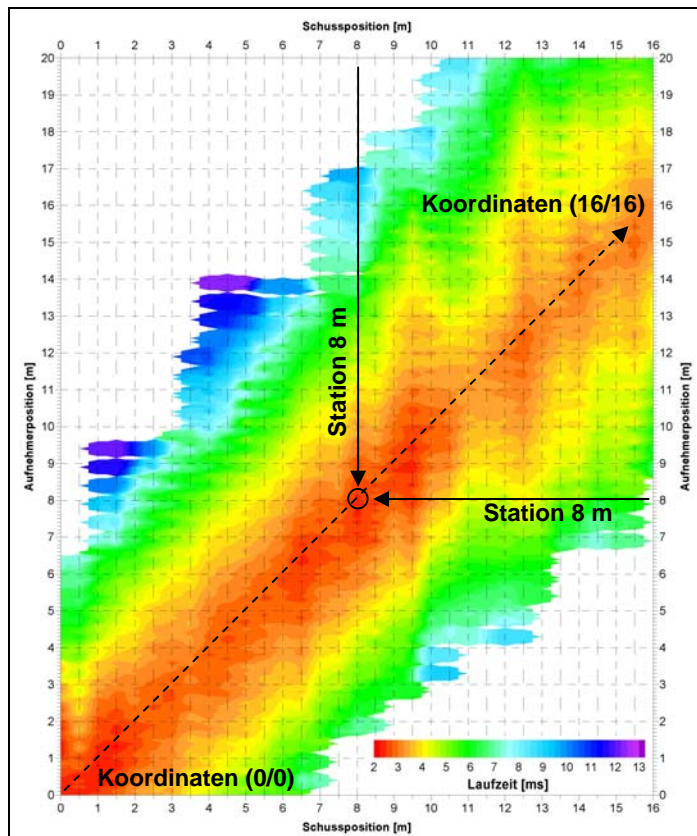


Abbildung 133: Laufzeiten der seismischen P-Wellen [89]

Die Diagonale zwischen der Koordinaten (0/0) und (16/16) stellt diesen theoretisch kürzesten Laufweg der Wellen dar. In Abbildung 133 ist dies beispielhaft anhand der Station 8 m dargestellt. In einem homogenen Boden ist diese Diagonale die Symmetrieachse der Wellenlaufwege und der Geschwindigkeitsverteilung. Aus den Abweichungen von der Symmetrie werden bei der Auswertung der Tomographie die Abweichungen der Geschwindigkeitsverteilung berechnet.

Die Abbildung 134 zeigt die sog. Strahlüberdeckung in der Tomographie. Je höher die Überdeckung der Laufwege (Strahlen) ist, desto genauer ist das Ergebnis an der Stelle. In dem dargestellten Beispiel ist bis zu Profilmeter 1 und ab Profilmeter 16 die Strahlüberdeckung im Vergleich zur restlichen Messstrecke geringer (rot) und damit sind die Aussagen zum Bodenaufbau unsicherer. Dieser Effekt wird jeweils am Beginn bzw. Ende der Messstrecke erwartet, da hier die Ausbreitungskegel der Wellen eine geringere Überdeckung haben. Im Bereich des Profilmeters 1 wird der Effekt verstärkt, da hier unmittelbar im Bereich des Einsteigschachtes gemessen wurde und die Signalanregung auf einem Beton-Schachtring erfolgte. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elastischen Wellen im Beton unterscheidet sich deutlich von der Geschwindigkeit im umgebenden Boden.

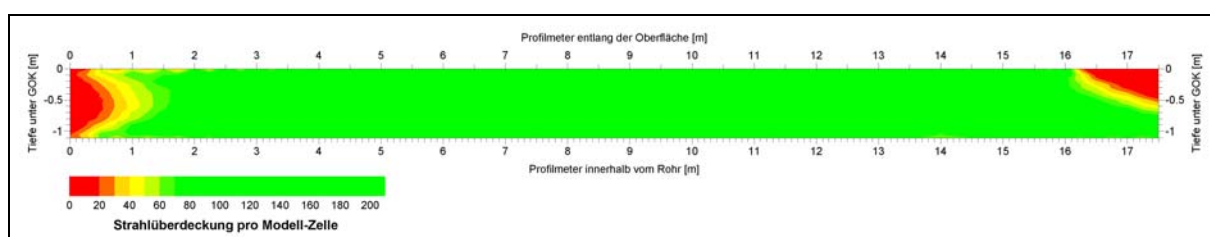


Abbildung 134: Strahlüberdeckung innerhalb des berechneten Modells [89]

Die Abbildung 135 zeigt ein Ergebnis der seismischen Erkundung mit Signalanregung mittels Hammerschlag und Signalaufnahme mit einer Hydrophonkette. Die dargestellte P-Wellengeschwindigkeit entlang des Profils ist relativ konstant bei 600 m/s bis 1.000 m/s. Sie steigt zwischen den Profilmetern 9 und 15 auf bis zu 1.600 m/s an. Dieser Anstieg ist durch einen höheren Wassergehalt des Bodenkörpers bis zur Wassersättigung des oberflächennahen Bereichs bzw. das Vorhandensein von verfestigtem Bodenmaterial zu erklären. Größere Störkörper und signifikante Bodenstrukturänderungen sind nicht zu erkennen.

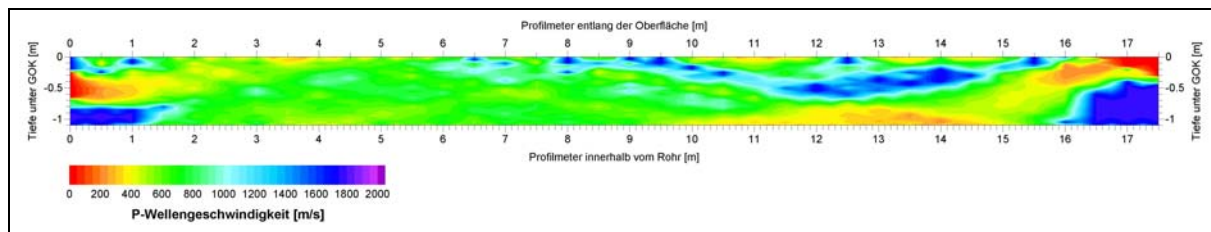


Abbildung 135: Verteilung der P-Wellengeschwindigkeit innerhalb des berechneten Modells [89]

Der Einsatz der Terfenol-D Quelle zur Impulsanregung innerhalb des Kanals lieferte keine aussagefähigen Ergebnisse. Der Frequenzbereich zwischen 1.000 Hz und 8.000 Hz muss als deutlich zu gering eingestuft werden, um den vorhandenen Boden zu durchstrahlen und etwaige Anomalien zu erkennen.

Erfahrungen mit dem Einsatz der seismischen Tomographie in ähnlichen Anwendungsbereichen wurden auch bis zum Jahr 2000 in einem, mit Mittel des Landes Baden-Württemberg geförderten Projekt der Universität Tübingen gewonnen. Im Rahmen des Forschungsprojektes „Einsatz von tomographischen Verfahren in Horizontalbohrungen“, wurden am Geologisches Institut des Lehrstuhls für Angewandte Geologie der Universität Tübingen Versuche mit den Messverfahren seismische und geoelektrische Tomographie durchgeführt [142].

In [142] wurde zur Erzeugung hochfrequenter Schallsignale eine seismische Quelle eingesetzt, bei der ein elektrischer Entladevorgang Signale mit Frequenzen bis zu 2.000 kHz generiert. Zur Erfassung der Signale wurden Hydrophone eingesetzt (vgl. Abbildung 136). Im Gegensatz zu Geophonen (vgl. Abbildung 137) erfassen Hydrophone die Signale richtungsunabhängig. Dadurch entfällt die Notwendigkeit der Ankopplung der Signalaufnehmer. Es muss lediglich eine vollständige Wasserfüllung des Prüfraumes sichergestellt werden. Bei den durchgeführten Messungen erfolgte die Signalanregung an der Erdoberfläche. Nach [142] konnte mit den durchgeführten Versuchen die Einsetzbarkeit der Messausrüstung für Messungen zwischen einem unterirdischen horizontalen Messraum, vergleichbar mit einem Abwasserkanal geringer Nennweite, und der Erdoberflächen nachgewiesen werden.



Abbildung 136: Hydrophon [142]

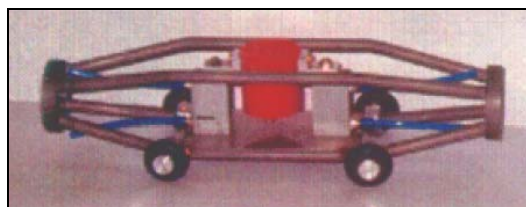


Abbildung 137: Prototyp eines Geophonenelementes zur tomographische Messungen in Horizontalbohrungen [142]

5.4.2.2 Geoelektrische Messung

Die kapazitive Geoelektrik stellt ein Messverfahren dar, mit dem bereits heute der Untergrund von der Geländeoberfläche aus detektiert werden kann. Eine Anwendung der kapaziti-

von Geoelektrik ist die in Abbildung 138 dargestellte Untersuchung der Überdeckung eines Abwasserkanals von der Straeoberflche aus.

Die hier dargestellte Messeinrichtung der Dr. Doni Geo-Consult GmbH, Karlsbad wurde in diesem Anwendungsfall mit einer Geschwindigkeit von 1,2 km/h von einem Auto entlang der zu erkundenden Trasse gezogen [143].



Abbildung 138: Messanordnung zur Anwendung der kapazitiven Geoelektrik und Aufbau der Multi-Kanal-Messanordnung [143]

Bei der kapazitiven Geoelektrik handelt es sich nach [143] um ein Messverfahren, mit dem sich die Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Untergrund bis in einige Meter Tiefe quasi-kontinuierlich, schnell und zerstörungsfrei erfassen lässt. Das System besteht aus bis zu sieben Paar Plattenelektroden (quivalent einem Plattenkondensator) in Dipol-quatorial-Anordnung, bei dem ein Elektrodenpaar (Dipol) als Sender und bis zu sechs Paare als Empfänger arbeiten. Die Dipole sind mit einem vieladrigen Kabel über Verteilerboxen an eine Wechselstromapparatur (12 kHz) angeschlossen. Diese ist wiederum mit einem Computer verbunden, über den die automatische Ansteuerung der Elektroden sowie die Messwertspeicherung realisiert wird [143]. Nach [122] kann das Equipment mit einer Geschwindigkeit zwischen 1,5 und 2 km/h (abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit) von einem Fahrzeug über die zu untersuchende Messtrecke gezogen werden (vgl. Abbildung 138). Hierbei können nach [143] die Messwerte des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes alle 20 cm für 6 Tiefenniveaus (6 Kanal-Apparatur) gleichzeitig aufgenommen werden, so dass eine sehr hohe laterale und vertikale Auflösung erreicht wird. Die Messwerte können direkt während der Messungen am Bildschirm des Steuercomputers als Zahlen oder Graphik für jeden Kanal (Niveau) verfolgt werden.

Nach Abschluss der Messungen werden die Messergebnisse entweder als Ganglinien (Messkurvendarstellung für eine geoelektrische Kartierung) oder als Isolinien in Form eines Pseudovertikalschnitts dargestellt. Der Pseudovertikalschnitt (2D-Darstellung) kann mit 2D-Inversions-Programmen zur Ermittlung eines geologischen Modells ausgewertet werden. Eine Aussage hinsichtlich der geologischen Baugrundverhältnisse sowie die Erstellung eines geologischen Schnittes aus den Messwerten der kapazitiven 2D-Geoelektrik wird allerdings erst durch Kalibrieren der Daten an direkten Aufschlüssen (Kernbohrungen, Rammkernsondierungen) möglich. Die Abbildung 139 stellt beispielhaft das Ergebnis einer Trassenuntersuchungen mittels hochauflösender kapazitiver 2D-Geoelektrik dar [143].

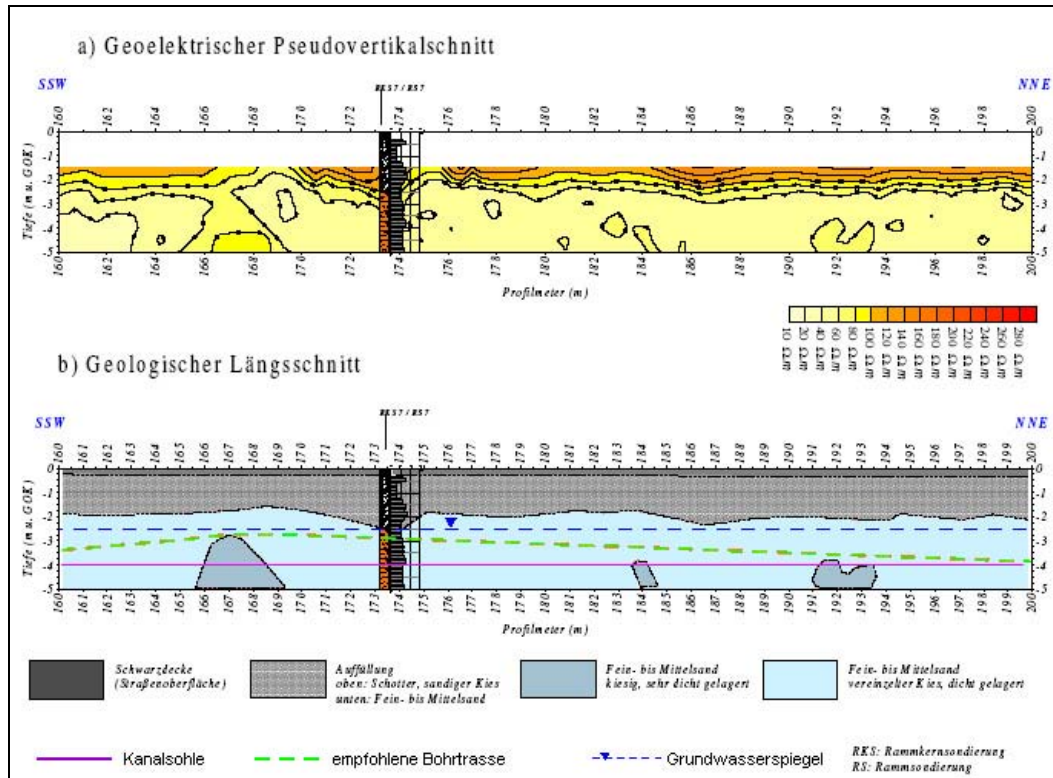


Abbildung 139: Ergebnisse der geoelektrisch-geologischen Untersuchung [143]

5.4.2.3 Elektromagnetische Messung (Radar)

Neben der in Kapitel 5.3.3.1 dargestellten Anwendung des Radars aus dem Kanal heraus wird das Radarverfahren als Messsystem von der Straßenoberfläche aus eingesetzt bzw. weiterentwickelt.

Im Rahmen dieser Studie wurde der Einsatz des Radarverfahrens zur Erkundung des Bodenkörpers einer Testhaltung DN 300 (vgl. Abbildung 127) eingesetzt. Zum Einsatz kamen eine 1.200 MHz Antenne die innerhalb des Kanals geführt wurde und eine 900 MHz Antenne zur Erkundung von der Geländeoberfläche.

Bei der Messung im Kanal wurde die Antenne auf einem Rollwagen platziert und durch den Kanal gezogen (vgl. Abbildung 140). Zur Positionierung wurde lediglich ein Maßband verwendet. Zusätzliche Maßnahmen zur Ankopplung der Antenne an die Rohrwand waren hier nicht erforderlich. Bei der Messung von der Geländeoberfläche aus wurde die Antenne entlang einer Profillinie zwischen zwei Einsteigschächten bewegt. Zur Kontrolle der Position wurde ebenfalls ein Maßband eingesetzt.



Abbildung 140: Messung mit einer 1.200 MHz Antenne im Kanalrohr (a), einer 900 MHz Antenne an der Geländeoberfläche (b) und das Messwertaufnahmesystem (c) [22]

Die Abbildung 141 zeigt das Radargramm der Messung mit der im Kanal geführten 1.200 MHz Antenne. Dargestellt ist ein 4,2 m langer Abschnitt ausgehend von einem Einsteigschacht. Das Rohr ist hier von einem Kiessand mit einer Körnung zwischen 0,06 mm und 80 mm umgeben und ebenfalls mit diesem Material überschüttet. Interessant scheint der Bereich zwischen den Profilmeter 2 und 4. In einem Abstand von 0,3 m über dem Rohr ist hier ein in Richtung Geländeoberfläche ansteigender Reflexionsbereich zu erkennen. In dieser Tiefe zwischen 0,5 und 0,6 m unterhalb der Geländeoberkante wurde bei der späteren Aufgrabung eine mit Steinen, Ziegel- und Betonresten verunreinigte Bodenschicht angetroffen (vgl. Abbildung 141). Die deutlichste Ausprägung hat der Reflexionsbereich etwa bei Profilmeter 3,5. In diesem Bereich wurde bei der Aufgrabung etwa 0,4 m oberhalb des Rohres eine Gussrohrscherbe entdeckt (vgl. Abbildung 142).

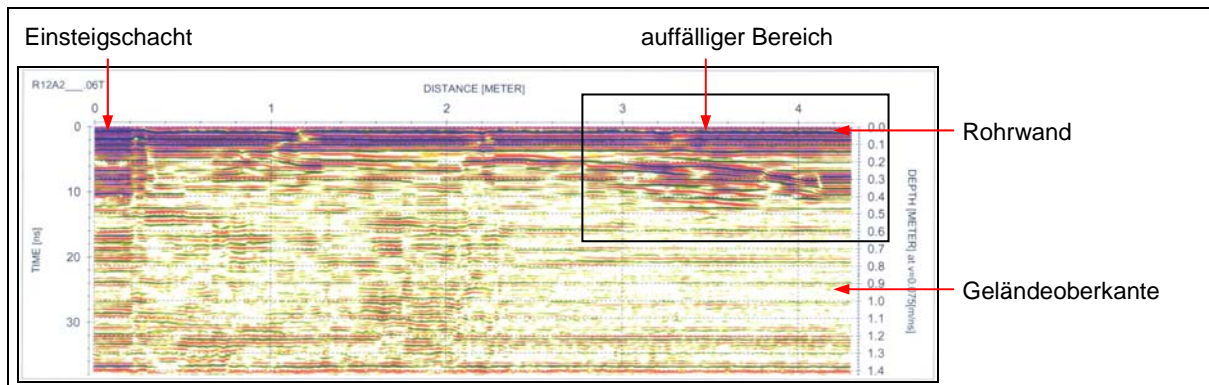


Abbildung 141: Radar-Profil, gemessen mit einer 1.200 MHz Antenne im Kanalrohr [89]

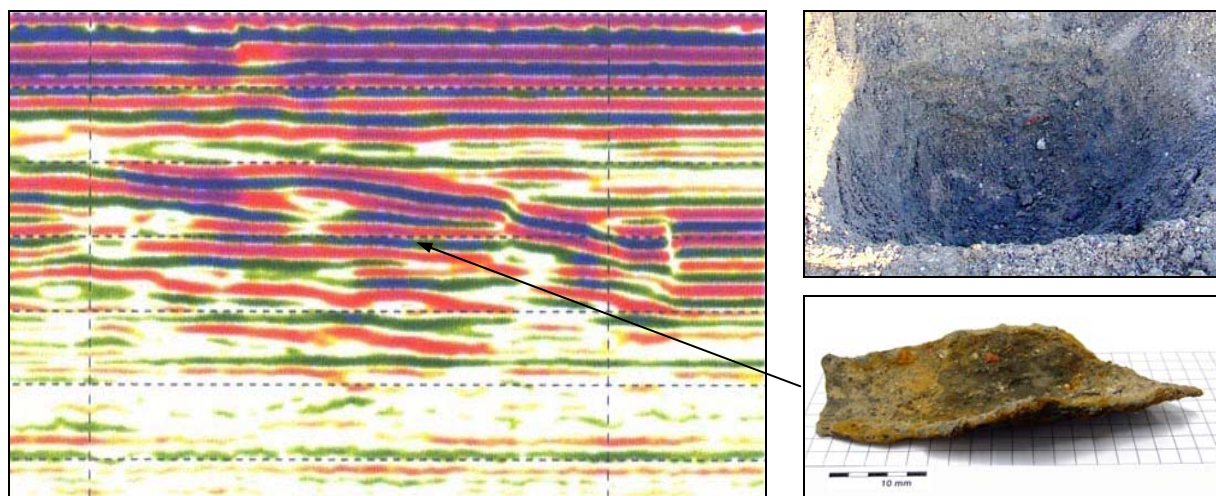


Abbildung 142: Detaildarstellung zwischen Profilmeter 3 und 4, Aufgrabung und Ursache der Reflexion, Scherbe eines Gussrohres [89]

Die Abbildung 143 zeigt das Radargramm der Messung mit der 900 MHz Antenne von der Geländeoberfläche. Dargestellt ist das Ergebnis an der Station 12 m. An dieser Stelle ist eine starke Reflexion zu erkennen. Eine Ursache könnte ein Elektrokabel darstellen, das möglicherweise an dieser Stelle die Messlinie kreuzt. Die Position der Laternen lässt vermuten, dass das Kabel dort verläuft.

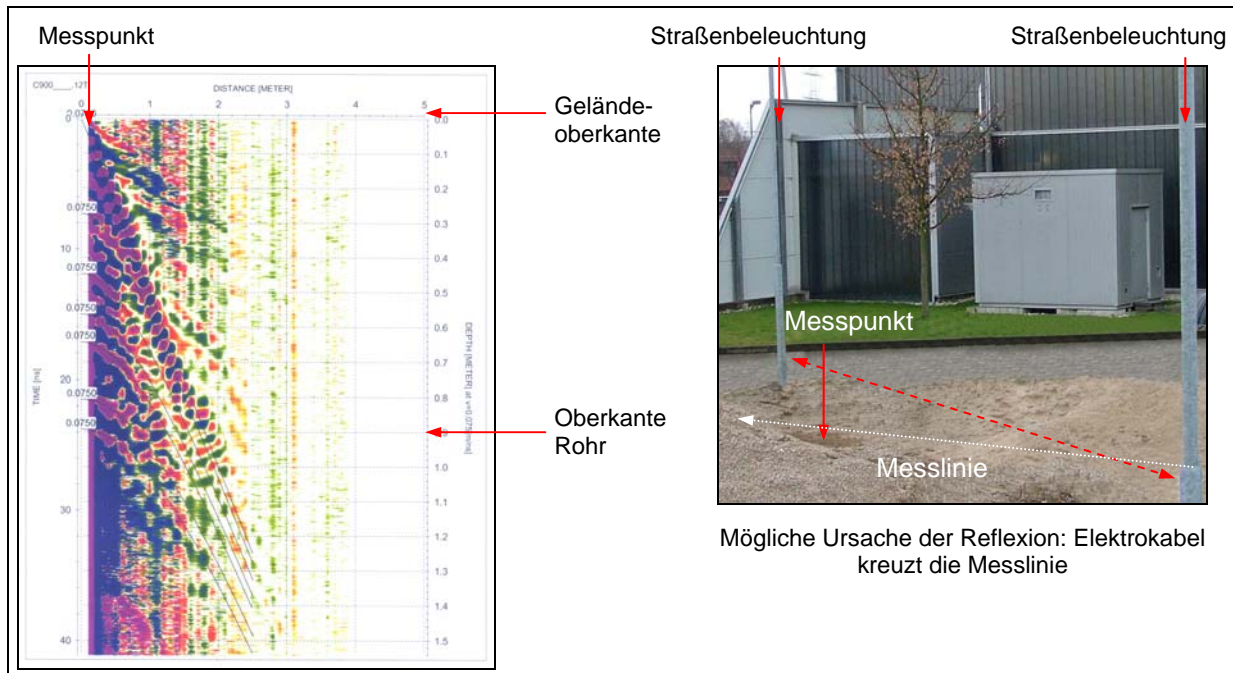


Abbildung 143: Radar-Profil, gemessen mit einer 900 MHz Antenne von der Geländeoberfläche [22]

Die durchgeführten Messungen zeigen, dass das Radar in einem nicht begehbaren Abwasserkanal einsetzbar ist. Die Antennen können dabei sowohl innerhalb des Rohres geführt werden, als auch von der Geländeoberfläche eingesetzt werden. Sofern der Abwasserkanal oberhalb des Grundwasserspiegels liegt, können mit dem Radarverfahren auswertbare Messwerte gewonnen werden.

Die Untersuchung des Straßenaufbaus mit dem Radarverfahren wird z.B. von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch Gladbach [144] oder der GBM Wiebe Gleisbaumaschinen GmbH, Achim [145] durchgeführt. Auch in anderen Ländern [146] entspricht diese Untersuchungsmethode des Straßenaufbaus dem gegenwärtigen Stand der Technik (vgl. Abbildung 144 bis 146).



Abbildung 144: Messfahrzeug der Bundesanstalt für Straßenwesen [144]

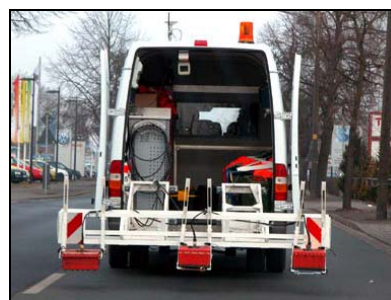


Abbildung 145: Radarmesssystem GeoRail® Sprinter [145]



Abbildung 146: Radarmesssystem Road Scan [146]

Über den Einsatz des Radarmesssystem GeoRail® Sprinter [145] zur Untersuchung der Leitungszone eines Abwasserkanals wird unter der Überschrift „Der Blick in die Leitungszone wird schärfer“ in [147] berichtet. Hier werden die Erfahrungen der Braunschweiger Stadtentwässerung mit dem Einsatz geophysikalischen Messmethoden als Ergänzung zu optischen Kanalinspektion dargestellt. Nach [147] wurde aufgrund von ca. 20 bis 30 Straßeneinbrüchen

pro Jahr im Bereich von Kanälen, die sich bei der Kamerabefahrung in einem optisch guten Zustand zeigten, von der Braunschweiger Stadtentwässerung die Notwendigkeit gesehen, das Kanalumfeld zu erkunden. Das potenzielle Schadensrisiko ist dort besonders hoch, wo die Kanäle im Grundwasser oder in der Grundwasserwechselzone liegen und wo Rohre zu einer Zeit verwendet wurden, in der noch keine dauerhaft dichten Rohrverbindungen zur Verfügung standen. Für die „*Verdachtstraßen*“ suchte man in Braunschweig intensiv nach technischen Möglichkeiten, über die optischen Inspektionsdaten hinaus an Informationen über den Zustand der Leitungszone in der Umgebung der Abwasserkanäle zu gelangen. Der Fachbereich für Stadtentwässerung und Abfallwirtschaft der Stadt Braunschweig initiierte daher das Forschungsvorhaben „*Detektion von Lagerungsdichten und Hohlräumen in der Umgebung erdverlegter Abwasserkanäle*“, um mit Hilfe bestehender, praxisgerecht angewandter Messverfahren in der Umgebung von Kanälen verringerte Lagerungsdichten und Hohlräume zuverlässig nachweisen zu können [4]. Das Georadar wird dabei als die Technik mit dem größten Potenzial gesehen, die gestellten Aufgaben zu erfüllen (vgl. Abbildung 147). Voraussetzung ist jedoch, dass bei der Messung kein Grundwasser ansteht.

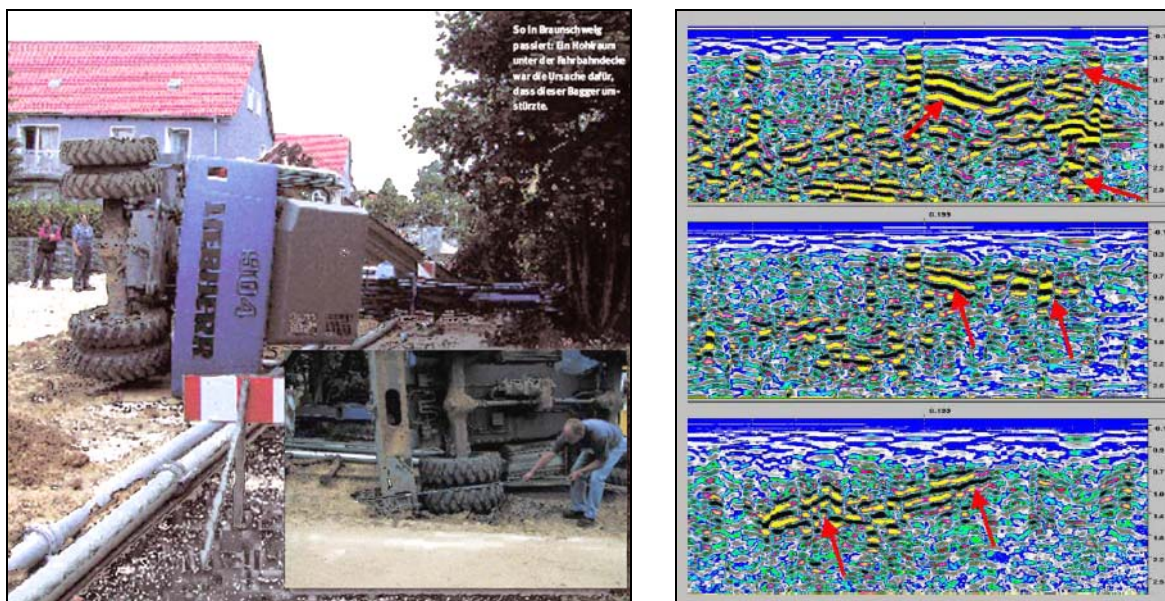


Abbildung 147: So in Braunschweig passiert: Ein Hohlraum unter der Fahrbahndecke war die Ursache dafür, dass dieser Bagger umstürzte [147], Radargramm mit Verdachtsflächen (roter Pfeil) [122]

Im Rahmen des Forschungsprojektes „*Einsatzmöglichkeiten des Georadars als Verfahren zur Detektion und Bewertung von Lagerungsdefekten und Hohlräumen im Bereich erdverlegter Abwasserkanäle*“ des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA), der GBM Wiebe Gleisbaumaschinen GmbH und der GKE Consult Beratende Ingenieure GmbH [148] wird z.Z. das Radarmesssystem TerraVision (Radar-Scanner) [145] eingesetzt.

Dieses System stellt nach [145] eine Weiterentwicklung des Radarmesssystems GeoRail® Sprinter (vgl. Abbildung 148 und 149) dar. Nach [145] ist mit dem 14 kanäligen Antennenarray dieses Radarmesssystems TerraVision die gleichzeitige Aufnahme von 14 Messprofilen nach dem Georadar-Prinzip möglich. Neben einer schnellen Datenerfassung ist eine dreidimensionale Darstellung des Untergrundes möglich. Das System ermöglicht eine Messgeschwindigkeit von ca. 15 km/h bei einer Breite des gesamten 14-spurigen Messprofils von ca. 1,8 m.



Abbildung 148: Radarmesssystem TerraVision [145]

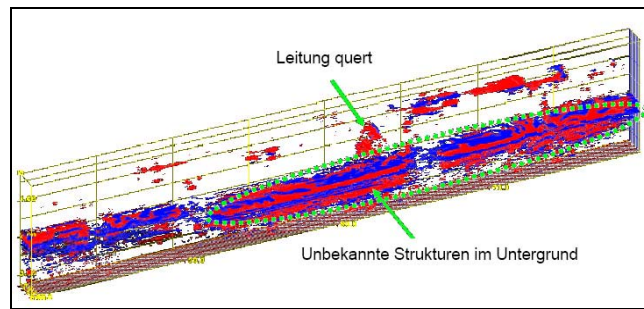


Abbildung 149: Transparente Darstellung eines 3D-Profiles [145]

Auch zur Detektion von oberflächennahen dünnen Kabeln, metallischen und nichtmetallischen Leitungen sowie zur Baugrunderkundung werden unterschiedliche Radarsysteme (Ground Penetrating Radar) eingesetzt. Dabei wird Mehrfrequenz- und Multipolarisations-Antennentechnologie eingesetzt oder durch die Kombination der Antennen die mögliche Eindringtiefe und Auflösung erhöht. Beispiele für z.Z. am Markt verfügbare Systeme sind in Abbildung 150 und 151 dargestellt.



Abbildung 150: Ground Penetrating Radar [149]



Abbildung 151: Radarsystem Interragator und Interragator II [150]



Als weiteres Beispiel für aktuelle Forschungsaktivitäten im Zusammenhang mit geophysikalischen Messmethoden sei auf das europäische „GIGA-Projekt“, eine Studie zur Entwicklung eines neuartigen Georadarsystems, verwiesen. Das „GIGA-Projekt“ wird teilweise gefördert durch das Fünfte Rahmenprogramm der Europäischen Kommission für „Community Research, Energy, Environment and Sustainable Development“ unter der Leitung des „Directorate General for Research“ (Kontrakt Nr.: ENK6-CT2001-00506). Der folgende Text ist der Veröffentlichung [151] entnommen, Ergebnisse des Projektes wurden bisher nicht veröffentlicht:

„Das „GIGA-Projekt“ (innovative Georadarsysteme – Forschungen zu höchst zuverlässiger, stabiler und genauer Ortung von Gasleitungen) wurde von der Europäischen Kommission zur gemeinsamen Erarbeitung einer Forschungsstudie für die Entwicklung eines neuen, zuverlässigen Georadarsystems (Ground Penetrating Radar) ins Leben gerufen. Das Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung eines Georadarsystems mit ausgezeichneten Ortungseigenschaften verschiedener Rohrmaterialien in unterschiedlichen Bodenarten.

Nach erfolgreichem Abschluss des Projektes soll in einer zweiten Stufe die Entwicklung, Konstruktion und Erprobung eines neuen speziellen Georadar-Prototypen erfolgen. Beim Einsatz von grabenlosen Einbaumethoden, wie z.B. dem Horizontal-Spülbohrverfahren, ist es sehr wichtig, dass alle im Erdreich befindlichen Rohre und Kabelleitungen sowie mögliche Hindernisse ermittelt und geortet werden, vorzugsweise in der Planungsphase und kurz vor Beginn der Bohrarbeiten. Sehr oft sind bestehendes Kartenmaterial und Informationen zu

den Untergrundstrukturen ungenau und geben wenig Auskunft über mögliche, im Boden befindliche, unbekannte Hindernisse. Zusätzlich müssen Beschaffenheit und Struktur des Erdreichs durch geologische Tests, wie Georadaruntersuchungen (GPR), die in den letzten Jahren immer häufiger eingesetzt werden, so genau wie möglich bestimmt werden.

Das Bestreben des verbesserten GIGA Georadarsystems ist es, diese Planungsphase mit noch größerer Genauigkeit durchzuführen und, sollte dies erfolgreich verlaufen, so werden spätere Projektphasen den Gebrauch des GIGA Georadarsystems während des Bohrvorgangs zur Umfahrung von Hindernissen im Erdreich ermöglichen.“

Die Radartechnologie ermöglicht nach [151] eine genaue Ortung von im Erdreich befindlichen Objekten, wie z.B. Rohrleitungen oder geologischen Strukturen ohne vorherige Kenntnisse ihrer Lage.

Das „Giga-Projekt“ verfolgt das Ziel der Weiterentwicklung und Verbesserungen der Radar- und Auswertetechnik. Auf der Basis einer Befragung europäischer Versorgungsbetriebe und Anwendern gesteuerter Horizontalbohrverfahren (170 europäischen Unternehmen) wurden Versuche mit den typischen Rohrmaterialien in unterschiedlichen Tiefenlagen und Bodenarten konzipiert. Im Rahmen der Versuch wurde nach [151] sowohl marktüblichen Georadar-Technologie als auch ein im Versuchsstadium befindliches Multi-Parameter/Multi-Konfigurations Georadar Messsystem erprobt (vgl. Abbildung 152). Für die Durchführung der Versuche hat Gaz de France ein wettergeschütztes Testfeld mit unterschiedlichen Böden (homogener trockener Sandboden, Schluff, homogene organische Böden (Lehm), Verfüllmaterial/Schutt (gering vermischt mit Ton und Schluff) und reiner Tonboden) eingerichtet. In verschiedenen Tiefen wurden Metall- und Kunststoffrohre verlegt. In einigen Bereichen befindet sich eine Asphaltdecke.

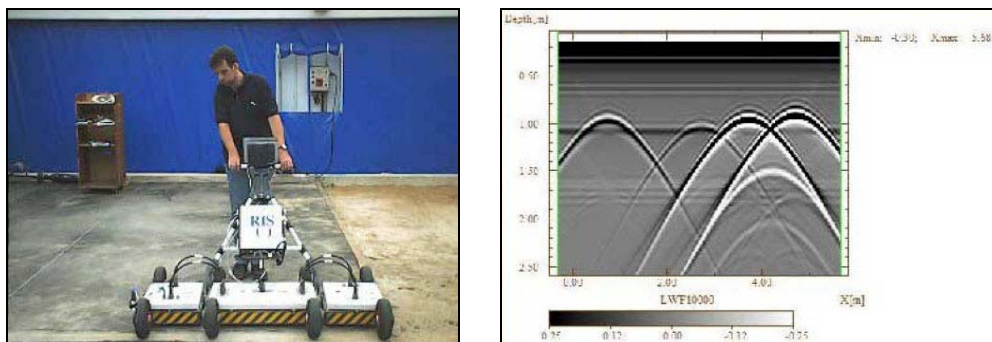


Abbildung 152: Datenaufnahme mit einem IDS Georadargerät im Testgelände von Gaz de France (links), Beispiel für ein Simulations-Radargramm (rechts) [151]

Die eingesetzten, dem Stand der Technik entsprechenden Radarantennen konnten nach [152] bis in 2 m Tiefe mehr als 80 % der gesuchten Leitungen detektieren. Die horizontale und vertikale Lage der Leitungen wurde dabei bis auf 40 mm genau bestimmt. Die Auflösung lag unter 300 mm. Zukünftiger Forschungsbedarf wird nach [152] bezüglich der Erhöhung der Eindringtiefe sowie der Detektion von Kunststoffrohren geringen Durchmessers gesehen, insbesondere unter der Randbedingung, dass der Untergrund aus leitfähigem Material besteht. Zum Stand der Entwicklung des „GIGA-Georadar-Systems“, das unterschiedliche Antennen und Frequenzen zwischen 150 MHz und 2 GHz nutzen soll, sind keine weitergehenden Veröffentlichungen bekannt.

5.4.2.4 Radiometrie

Die Radiometrie befasst sich mit der Messung elektromagnetischer Strahlung im Wellenlängenbereich von ca. 100 nm bis ca. 100 μm [153]. Nach [154] stellt sie eine Erweiterung der Fotometrie (Lichtmessung) in die Bereiche des Infraroten und Ultravioletten, aber auch der Gammastrahlen dar. Die quantitative Messung von Strahlungsintensitäten erfolgt mit ver-

schiedenen Arten von Detektoren. Sie wandeln einen Teil der Strahlung in Wärme oder ein elektrisches Signal um, woraus u.a. auf die Art der strahlenden Oberfläche und ihre Temperatur geschlossen werden kann. Als Vergleich dient oft der theoretisch ideale Strahler (Schwarzer Körper) und seine Strahlungsgesetze. Die Detektoren zur physikalischen Messung von Strahlungsgrößen, i.d.R. sind dies die Parameter Strahlungsmenge, Bestrahlungsstärke und Strahldichte, werden als Radiometer bezeichnet. Ein Radiometer besteht aus der Eingangsoptik (beziehungsweise der Messöffnung), dem spektralen Filter, dem eigentlichen Sensor, der zugehörigen Elektronik und dem Anzeigegerät beziehungsweise Display.

Radiometrische Messgeräte werden heute im Hoch- und Straßenbau vielfach zur Schadenserkennung und Qualitätskontrolle eingesetzt. Beispiele für derartige Geräte sind z.B. die sog. „Troxler-Sonden“ (vgl. Abbildung 153) [155].

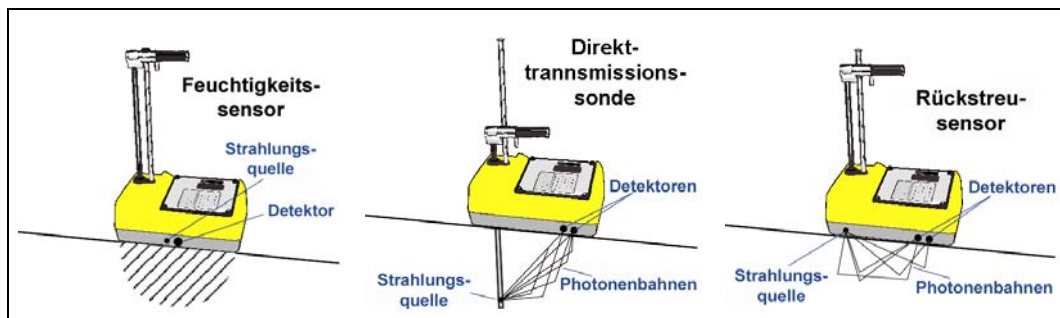


Abbildung 153: Radiometrische Messgeräte [155]

Nach [155] dient das Feuchtemessgerät („*ROOF Reader*“) dem Auffinden von Feuchtezonen in Flachdachisolierung, Mauerwerk, Fundamenten, Kellerwänden, Fussböden, usw. Die Sonde arbeitet zerstörungsfrei und ermittelt die Wasserstoffkonzentration bis zu maximal 27 cm Ausdehnung. Die Sonde ermöglicht nach [155] die genaue und schnelle Eingrenzung von Wasserschäden mit geringem Kostenaufwand. Sie ist auf feuchter Dachoberfläche ohne wesentliche Beeinflussung des Messergebnisses einsetzbar. Die Messung wird nicht durch Bewehrungen beeinträchtigt. Die Neutronensonde (Radiologische Spezifikation: Neutronen-Quelle Americium, ^{241}Am (Aktivität 1480 MBq)) misst die Feuchtigkeit durch Analyse der Konzentration von Wasserstoffatomen. Neutronen mit hoher kinetischer Energie werden bei Zusammenstößen mit Atomen geringer Masse (Wasserstoff) in ihrer Energie auf thermische Geschwindigkeit abgebremst und abgelenkt. Diese Neutronen erzeugen in ^3He -Zählrohren elektrische Impulse. Diese Impulse werden gezählt und auf der Digitalanzeige des Gerätes angezeigt. Die Zählrate steht in direkter Relation zur Feuchtigkeit. Aus diesen Zählraten lassen sich nach [155] über ein Histogramm Pläne mit Zonen gleicher Feuchtigkeit erstellen, nach denen z.B. der Umfang von Sanierungsarbeiten festgelegt werden kann. Werden Inspektionen des Bauwerkes in regelmäßigen Zeitabständen durchgeführt, so lassen sich Zustandsveränderungen frühzeitig erkennen und rechtzeitige Maßnahmen zu ergreifen.

Direkttransmissions- und Rückstreusensoren („*ROAD Reader*“) dienen nach [155] zur radiometrischen Dichte- und Feuchtemessung im Bauwesen. Diese Prüfmethode wird zur zerstörungsfreien Qualitätskontrolle im Tief- und Straßenbau z.B. beim Bau von Dämmen, Deichen, Deponien, bei der Bodenverdichtung vor dem Bau von Fundamenten, beim Einbau von Frostschutz- und Tragschichten, oder beim Asphalt- und Betonbau eingesetzt. Nach [155] ermöglichen die Sonden (Radiologische Spezifikation: Gamma und Neutronen-Quelle Cäsium, ^{137}Cs (Aktivität 300 MBq) Americium, ^{241}Am -241 (Aktivität: 1480 MBq)) im Erd- und Grundbau eine gleichzeitige Messung von Dichte und Wassergehalt mit einer Direktanzeige von Feuchte und Trockenraumdichte, Wassergehalt und Verdichtungsgrad (%-Feuchte und %-Proctor) bis zu einer maximalen Messtiefe von 30 cm, in 2,5 oder 5 cm Schritten. Ebenfalls möglich ist nach [155] die Messung der Raumdichte im bituminösen Belagbau mit einer Direktanzeige von Dichte, Verdichtungsgrad und Hohlraumgehalt.

5.5 Arbeitsroboter und Trägersysteme

Zum Einsatz von Messtechnik oder Sensoren innerhalb eines nicht begehbaren Abwasserkanals müssen diese Geräte i.d.R. innerhalb des Kanals bewegt oder geführt werden bzw. Vorarbeiten geleistet werden. Um z.B. eine endoskopische Untersuchung der Kanalumgebung vorzunehmen (vgl. Abschnitt 5.3.1), muss zum einen die Rohrwand durchbohrt werden, zum anderen muss das Endoskop geführt werden. Ein auf diesen Anwendungsfall ausgelegter Inspektionsroboter für nicht begehbare Abwasserkanäle existiert z.Z. noch nicht. Jedoch lässt die Vielzahl unterschiedlicher Roboter, die in nicht begehbaren Kanälen bereits für unterschiedliche Arbeiten, z.B. Wurzelschneiden, Fräsen, Spachteln, zu Sanierungsarbeiten, zur Kabelinstallation, zur Inspektion und als Satellitensystem eingesetzt werden, darauf schließen, dass eine technische Realisierung möglich ist.

Nachfolgend ist eine Auswahl unterschiedlicher Arbeitsroboter für nicht begehbare Abwasserkanäle dargestellt.

Der IMS-Fräskopf TURBO (vgl. Abbildung 154) basiert nach [156] auf einer luftbetriebenen Turbine und ist für Arbeiten im Nennweitenbereich DN 200 bis DN 600 ausgelegt. Der Fräskopf wird mit einer Color-Kamera ausgestattet. Diese kann vor bzw. hinter dem Fräskopf montiert werden und ist mit einem Scheibenwischer zur Schmutzbeseitigung ausgerüstet. Optional ist eine Schwenkachse für die Kamera mit Zusatzbeleuchtung erhältlich. Der abgebildete Fräsroboter (vgl. Abbildung 155) der KA-TE System AG ist dagegen mit einem Hydraulikmotor bestückt [157]. Die Abbildung 156 zeigt einen selbstfahrenden KASRO-Arbeitsroboter. Dieser kann mit unterschiedlichen Werkzeugen bestückt werden [158].



Abbildung 154: IMS-Fräskopf [156]



Abbildung 155: KA-TE-Fräskopf [157]

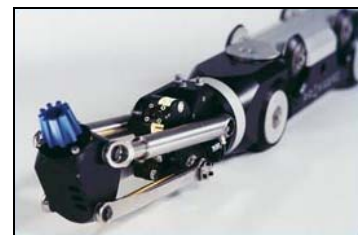


Abbildung 156: selbstfahrender KASRO-Arbeitsroboter [158]

Der in Abbildung 157 dargestellte Arbeitsroboter ist mit einem Wurzelschneider ausgestattet [159].

Das FAST Verlegesystem (vgl. Abbildung 158) wird zur Installation von Kabeln in nicht begehbaren Abwasserkanälen eingesetzt. Hierzu werden mit dem Roboter Stahlringe positioniert und im Kanal verspannt [157].

Die Rotaloc[®]-Maschine (vgl. Abbildung 159) wird bei Rohrrelining mit dem Wickelrohrverfahren eingesetzt. Im Inneren eines zu sanierenden Rohres wird dabei maschinell ein neues Rohr hergestellt. Das hier beschriebene System besteht aus einem einzelnen PVC-Profilstreifen, der in die bestehende Rohrleitung gewickelt wird. Die Rotaloc[®]-Maschine bewegt sich dabei innerhalb der beschädigten Rohrleitung vorwärts. Die Wickelmaschine kann beim Durchlaufen durch die Rohrleitung verschiedene Durchmesser annehmen und so eine Auskleidung von optimalem Durchmesser erzeugen [160].

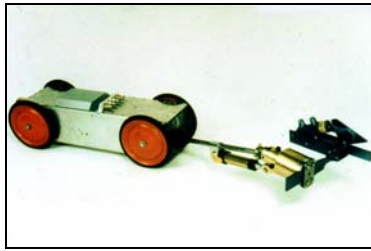


Abbildung 157: Kanalroboter mit Wurzelschneider [159]

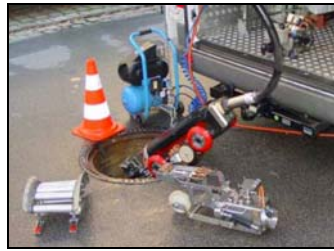


Abbildung 158: FAST Verlegesystem [157]

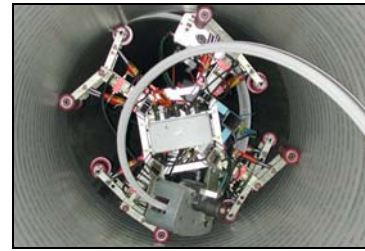


Abbildung 159: Rotaloc®-Maschine [160]

Arbeitsroboter für den nicht begehbaren Nennweitenbereich werden von einer Vielzahl von Anbietern bereitgestellt. Hersteller sind insbesondere:

- Cosmic Sondermaschinen GmbH, Kasten A (www.cosmic.at)
- Hächler AG Umwelttechnik, Wettingen CH (www.haechlerumwelttechnik.ch)
- IMS Robotics GmbH, Ottendorf-Okrilla (www.ims-robotics.de)
- KA-TE System AG, Freienbach CH (www.ka-te.ch)
- Oberdorfer AG, Nürnberg (www.oberdorfer-ag.de)
- OPTIMESS GmbH, Gera (www.optimes.com)
- PMO Engineering AG, Dübendorf CH (www.pmo.ch)
- ProKasro Mechatronik GmbH, Karlsruhe (www.prokasro.de)
- RS Technik AG, Esslingen CH (www.rstechnik.com)
- Sika Robotics AG, Grüningen CH (www.rstechnik.com)

Systeme aus einem anderen Anwendungsbereich, die Ähnlichkeiten zu den oben gezeigten Arbeitsrobotern aufweisen, stellen die sogenannten „*Fernlenk-Manipulatoren*“ dar. Dabei handelt es sich um Fahrzeuge, die für polizeiliche und militärische Sonderaufgaben sowie den Einsatz in besonderen Situationen wie IED/EOD-Handhabungen (Improvised Explosive Device/Explosive Ordnance Disposal) oder Geiselfreiungen konstruiert wurden [82].

Das in Abbildung 160 dargestellte System PackBot wiegt nach [82] in kompletter Konfiguration weniger als 24 Kg und kann von einer Person bedient werden. Das robuste Raupenfahrwerk erlaubt den Einsatz in schwierigem Gelände sowie das leichte Überwinden von Treppen, Geröll und anderen Hindernissen und ermöglicht sichere Manövrierfähigkeit auf nahezu jedem Untergrund z.B. Fliesen, Schnee, Schlamm. Das Chassis verfügt über insgesamt acht separate „*Ladebuchten*“, welche den Anschluss von zusätzlichen Modulen wie z.B. Video-/Audio, Chemische Biosensoren, Minendetektoren, zusätzliche Batterien, GPR (Ground Penetrating Radar) etc. ermöglichen. Mit Hilfe des auf halber Höhe angeordneten Greifers sind eine Vielzahl von Arbeiten möglich.

Ein weiteres Beispiel stellt das System Mikro VGTV dar (vgl. Abbildung 161). Dieses Erkundungssystem kann nach [161] z.B. von Rettungsdiensten zu Such- und Bergungseinsätzen in unzugänglichem Gelände oder für unbemannte Fernaufklärung im polizeilichen und militärischen Bereich eingesetzt werden. Das System kann auch unter Wasser eingesetzt werden.



Abbildung 160: Intelligenter Fernlenk-Miniaturmanipulator PackBot EOD [82]

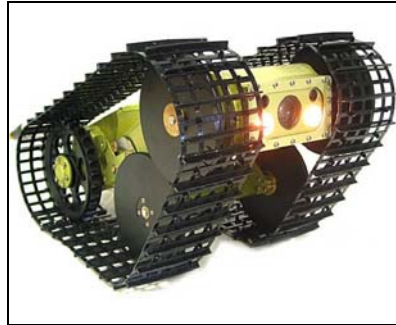


Abbildung 161: Erkundungssystem Micro VGTV [161]

6 Schlussfolgerungen und Perspektiven

Die vorliegende Studie gibt einen Überblick über den gegenwärtigen Stand der Technik der Kanal- und Baugrunderfassung sowie die in der Forschung entwickelten und am Markt angebotenen Produkte. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem Anforderungsprofil einer Zustandserfassung in Kanälen kleiner, nicht begehrter Nennweiten. Auf dieser Basis sollen nachfolgend einige grundlegende Schlussfolgerungen für die Praxis der Zustandserfassung sowie Perspektiven für weitere Untersuchungen zusammengefasst werden.

Die heutige Praxis der Zustandserfassung und –bewertung zeigt:

- Mit der **optischen Inspektion** werden die Anforderungen des technischen Regelwerkes an die Zustandserfassung bereits grundsätzlich erfüllt. Verstärkt werden dabei auch digitale Systeme mit ergänzender Auswertesoftware (2D-, 3D-Abwicklungen) eingesetzt, die eine Trennung der einzelnen Inspektions- und Auswerteschritte unterstützen. Vermessungssysteme, z.B. mit Lasertechnik, ergänzen ggf. die qualitative Aufnahme um weitere Messdaten.
- Zur zuverlässigen **Bewertung der Standsicherheit** reichen Informationen allein aus der optischen Inspektion nur selten aus (z.B. Einsturz). Neben den Informationen über das Rohr, fordert eine Standsicherheitsanalyse - auch in Anlehnung an geltende Regelwerke zur statischen Berechnung - weitergehende Kenntnisse zum Rohr-Boden-System in der Leitungszone und dem darüber liegenden Boden. Schadensbilder an Kanälen belegen diese Notwendigkeit anschaulich.
- Eine stärkere Betrachtung des Baugrundes im Rahmen der Inspektion wird auch durch eine **Ergänzung des Regelwerkes** durch die DWA angestrebt, insbesondere da z.B. geophysikalische Verfahren durch den Praktiker noch häufig mit Skepsis betrachtet werden. Dies scheint dadurch begründet, dass der Einsatz dieser Technik eine besondere **Qualifikation** erfordert und auch die Interpretation der Ergebnisse dem Laien kaum vermittelbar ist.
- Als **Trägersysteme** auch für neue Inspektionstechniken kann auf eine Vielzahl von Fahrzeugen, Arbeitsrobotern und sog. Fernlenkmanipulatoren zurückgegriffen werden. Diese werden bereits zur Inspektion von Leitungen und Kanälen sowie für den Einsatz in schwer zugänglichem Gelände und unter Wasser angeboten.

Weitergehende Inspektions- und Messsysteme wurden bereits in zahlreichen Forschungsvorhaben, aber auch in einzelnen Praxisanwendungen eingesetzt. Eine Fortentwicklung ist insbesondere im Bereich der optischen Inspektion und Vermessungstechnik zu beobachten:

- Als **ergänzende Messmethoden** zur Erfassung der Rohrgeometrie und Rohr-Boden-Eigenschaften werden heute bereits Lasermessgeräte, mechanische Prüfungen („Ovameter“), Radar und akustische Messverfahren („Rohr.Impacto.Meter“) eingesetzt. Einige Mess-Module werden auch zur Ergänzung klassischer Videoinspektionssysteme angeboten, so z.B. als Lichtring-Verfahren zur Querschnittsvermessung.
- Die Ultraschalltechnik zur Analyse der Rohrwandung und Schweißnähte gehört insbesondere im Pipeline-Bereich (Rohre aus Metall) zum Standard.
- **Hochtechnisierte Messsysteme** wurden in der Vergangenheit meist in Zusammenarbeit mit Universitäten und Forschungsgesellschaften – auch unter Einsatz erheblicher Fördermittel – entwickelt. Als Ziel wurde dabei häufig angestrebt, eine Vielzahl unterschiedlicher Techniken in Multisensorsystemen so zu kombinieren, dass auch schwierige Fragestellungen unter Einsatz eines einzelnen Fahrzeuges gelöst werden können. Die grundsätzlichen Einsatzmöglichkeiten und –grenzen der Verfahren standen dabei im Zentrum der wissenschaftlichen Analyse. In der Regel handelte es sich um vorwettbewerbliche Forschung. Eine Praxiserprobung bis zur Marktreife steht i.d.R. noch aus.

- Einzelne **geophysikalische Messmethoden**, insbesondere Radar, wurden schon erfolgreich auch in nicht begehbaren Abwasserkanälen eingesetzt. Andere geophysikalische Methoden wie z.B. seismische Tomographie scheinen zwar prinzipiell anwendbar, fordern aber noch erhebliche Entwicklungsarbeit bis zur Praxisreife. Dies betrifft z.B. die Bewegung und genaue Positionierung der Sensoren innerhalb des Abwasserkanals, die Identifikation geeigneter Schallquellen für den Vor-Ort-Einsatz sowie die Eingrenzung möglicher Störeinflüsse, wie z.B. Umgebungsgeräusche und –erschütterungen.
- Eine umfassende Analyse des Rohr-Boden-Systems fordert häufig den gleichzeitigen Einsatz unterschiedlicher Messverfahren. Darüber hinaus empfiehlt sich stets ein Abgleich mit Ergebnissen aus der klassischen Baugrunderkundung, z.B. Aufschlüssen, Bohrungen oder Rammsondierungen. Die qualitativen flächenhaften Aussagen aus der Erkundung mit geophysikalischen Verfahren lassen sich so anhand quantitativer Messwerte an Einzelpunkten kalibrieren bzw. auf Plausibilität überprüfen.

Mit Blick auf den künftigen Einsatz innovativer Messverfahren zur Kanal- und Baugrunderkundung lässt sich folgender Informations- und Untersuchungsbedarf feststellen:

- Die heute übliche Zustandsbewertung allein auf Basis der optischen Inneninspektion greift zu kurz. Das „**Ingenieurbauwerk Leitungsraben**“ umfasst neben dem Hohlraumausbau durch das Kanalrohr auch den umgebenden Boden, die Überschüttung und ggf. den Straßenoberbau. Eine Weiterentwicklung des Regelwerkes sollte hier ansetzen und die bereits in der statischen Berechnung dargestellten Zusammenhänge auch in das Betriebswissen einfließen lassen. Hieraus könnten dann auch praxisnahe Empfehlungen abgeleitet werden, die sich am speziellen Informationsbedarf des Betriebspersonal orientieren. So ließen sich neben den bekannten Schadensbildern auch ergänzende Informationen zum Leitungsumfeld, wie z.B. Verkehrsbelastungen, angrenzende Baumaßnahmen und Leitungen, Zustand der Fahrbahndecke und Grundwasserstand, erfassen.
- Die Vielfalt der möglichen Erkundungsverfahren fordert Kenntnisse hinsichtlich der spezifischen Einsatzmöglichkeiten und –grenzen. Die Entscheidung, welches Erkundungsverfahren wirtschaftlich sinnvoll eingesetzt werden kann, hängt insbesondere von den örtlichen Randbedingungen ab und bleibt eine Ingenieurleistung. Zusammenhänge zwischen den erkennbaren Schadensbildern, den örtlichen Belastungsbedingungen und möglichen Lagerungsdefekten oder Hohlräumen sind zu erkennen und sinnvolle **Entscheidungskriterien zur Methoden- und Verfahrensauswahl** auf der Basis von Laboruntersuchungen sowie Testeinsätzen in Abwasserkanälen zu entwickeln. Die einzelnen Messsysteme sind insbesondere hinsichtlich der auflösbaren Informationsdichte und deren Genauigkeit zu bewerten.
- Der aktuelle Markt-Überblick lässt vermuten, dass **künftig verstärkt modulare Messsysteme** entwickelt werden, die dann für unterschiedliche Fragestellungen kombiniert eingesetzt werden können. Spezialisierte Anbieter (optische Inspektion, Vermessung, Erkundung der Kanalumgebung) können dann im Qualifikationsverbund spezialisierte Leistungen anbieten. Wie derartige Leistungen auszuschreiben, zu überwachen und zu dokumentieren sind, ist noch weitgehend offen. Ggf. sind hier entsprechende **Ausschreibungsempfehlungen** für Netzbetreiber zu erarbeiten.

Als abschließender Ausblick bleibt festzuhalten:

- Auch wenn die technische Entwicklung rasant fortschreitet, scheint eine Kanal- und **Baugrunderkundung des gesamten Netzes**, d.h. sämtlicher älterer, bereits verlegter Kanäle und Leitungen wirtschaftlich kaum realisierbar. Innovative Techniken stehen stets im Wettbewerb zu bewährten Methoden der Baugrunderkundung, wie z.B. Rammsondierungen. Nur wenn bessere Aussagen zum gleichen Preis oder andere wirtschaftliche Vorteile zu erwarten sind, werden neue Techniken sich überhaupt

durchsetzen können. Der Einsatz scheint daher bis auf Weiteres auf Einzelfälle, z.B. Schäden mit besonderem Gefährdungspotenzial, beschränkt.

- Eine echte Perspektive besitzt der „**gläserne Kanal**“, wenn die Anforderungen an die Inspektion des „Ingenieurbauwerkes Leitungsgraben“ bereits bei der Planung und Dimensionierung neuer Netze, der Auswahl von Rohr- und Bodenmaterialien sowie der Qualitätssicherung beim Einbau berücksichtigt werden. Ein Beispiel bietet das Inspektionssystem für den sog. „*Abwasserkanal Emscher*“. Entsprechende Zusammenhänge sind in künftigen Studien und Forschungsarbeiten zu erkennen und ggf. in Produktlebenszyklus-Analysen weiter auszuarbeiten.

7 Zusammenfassung

Kanäle müssen standsicher, funktionsfähig und dicht sein. Die hydraulische Funktionsfähigkeit und die Dichtheit einer Kanalhaltung lassen sich meist schon aus der optischen Inneninspektion bewerten. Auch eine weitergehende Dichtheitsprüfung kann allein durch Befüllen des Rohrrinneren mit einem Prüfmedium erfolgen. Demgegenüber lassen sich zuverlässige Aussagen zur Standsicherheit nicht allein aus dem Rohrzustand ableiten, denn diese hängt wesentlich vom umgebenen Erdreich und den Bettungsbedingungen der Leitung ab. Grundsätzlich ist der Leitungsgraben einschließlich vertikalem Abschluss durch die Fahrbahn und dem Hohlraumausbau durch das Rohr statisch als Gesamtbauwerk zu betrachten. Der Erkundung dieses Gesamtsystems, d.h. des Kanals und des Baugrunds, kommt insbesondere dann eine große Bedeutung zu, wenn die Standsicherheit z.B. aufgrund von Rohrschäden, Setzungen oder Bodeneinbrüchen an der Oberfläche schon anzuzweifeln ist. Zahlreiche Messverfahren wurden mit Blick auf diese Fragestellung entwickelt und auch schon in praktischen Anwendungsfällen eingesetzt. Umfangreiche **Forschungsarbeiten, z.B. in [3]**, lieferten hierzu schon in der Vergangenheit weitergehende Erkenntnisse, so z.B. zum Einsatz geophysikalischer Messverfahren wie Seismik, Ultraschall und Radar zur Kanal- und Baugrunderkundung im begehbaren Nennweitenbereich.

Der überwiegende Teil der Kanalnetze besteht allerdings aus Rohren kleinerer, nicht begehbare Nennweite. Ziel der vorliegenden Studie ist es daher, einen Überblick über den gegenwärtigen Stand der Technik der Kanal- und Baugrunderfassung zu geben und die in der Forschung entwickelten sowie am Markt angebotenen Produkte mit Blick auf das besondere Anforderungsprofil in kleinen Nennweiten zu bewerten. Das Handling und die Bedienbarkeit der Messgeräte stehen dabei im Vordergrund.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden zunächst beispielhaft Kanalschäden und deren Ursachen dargestellt und ein Anforderungsprofil für die ganzheitliche Zustandserfassung von Kanal und Baugrund abgeleitet. Kapitel 3 fasst den **rechtlichen Hintergrund** zusammen. Ausgehend von der europäischen Wasserrahmenrichtlinie und deren Umsetzung im Wasserhaushaltsgesetz des Bundes sowie der nachgeordneten Landesgesetzgebung wurde die Bedeutung der Selbstüberwachungspflichten, insbesondere für Netzbetreiber in Nordrhein-Westfalen, und deren Verknüpfung mit technischen Regelwerken herausgestellt. Beispiele unterstreichen den möglichen Zusammenhang zwischen Schäden an der Kanalisation und Beeinträchtigungen des Leitungsumfelds bis zur Geländeoberfläche. Dies betrifft insbesondere das Alter der Kanalisation, die in der Vergangenheit eingesetzten Bauverfahren und Materialien sowie die einwirkenden Belastungen, z.B. durch Straßenverkehr. Das gesamte „**Ingenieurbauwerk Leitungsgraben**“, d.h. die Rohrleitung einschließlich Bettung, Überschüttung und Straßenoberbau, wird auf dieser Basis in Kapitel 4 als Untersuchungsobjekt für die Kanal- und Baugrunderkundung definiert und ein detailliertes **Anforderungsprofil für die Zustandserfassung** erarbeitet. Dabei wird unterschieden, inwieweit Informationen über das Rohr, das Rohr-Boden-System oder den Bodenkörper oberhalb des Rohres gewonnen werden sollen. Anhand von Schadens- und Zustandsbildern werden relevante Inspektionsziele identifiziert.

Im Kapitel 5 werden die **Ergebnisse einer Marktrecherche** hinsichtlich innovativer Verfahren, Methoden und Technologien zur Kanal- und Baugrunderkundung zusammengefasst und mit Blick auf ihre **grundsätzliche Einsatzmöglichkeit für den vorliegenden Anwendungsfall** bewertet. Bewährte Systeme für Arbeiten in Kanälen kleiner Nennweite werden ebenso dargestellt, wie großformatige Systemkomponenten, für die eine Miniaturisierung der Sensorik bzw. Anpassung auf den vorliegenden Anwendungsfall möglich erscheint. Der Auswahl geeigneter Trägersysteme kommt dann eine übergreifende Bedeutung zu.

Systeme zur Untersuchung des Rohres

Systeme zur optischen Inneninspektion werden von zahlreichen Herstellern angeboten. Analoge und digitale Kameratechnik mit unterschiedlichen rad- oder kettengetriebenen Träger- bzw. Fahrwagen sowie Schwimm- und Tauchsysteme sind im Einsatz. Messsysteme auf der

Basis des Laserlichting- bzw. Lasertriangulationsverfahrens haben sich für die Rohrvermessung ebenso etabliert, wie mechanische Verfahren zur Deformations- bzw. Kalibermessung und auch Lagevermessung. Indirekte physikalische Messverfahren, wie Ultraschall und Geoelektrik, werden derzeit zur Inspektion der Rohreigenschaften im Kanalbereich kaum eingesetzt und am Markt hauptsächlich für die Inspektion von Pipelines angeboten. Bei diesen Verfahren lassen sich die Ergebnisse erst im Zusammenhang mit weiteren physikalischen Informationen, wie Werkstoffdicke oder Leitfähigkeit, bewerten. In der Regel dienen sie der weitergehenden Beurteilung der Rohrwandungseigenschaften, z.B. mit Blick auf Risse und Fehlstellen oder einer Wanddickenbestimmung. Im Rahmen von Machbarkeitstests zeigte sich, dass Ultraschallverfahren auch zur Detektion von Wurzeleinwuchs in Rohrverbindungen geeignet sein können. In einigen Fällen werden Techniken zur optischen Inspektion auch mit Geräten zur Dichtheitsprüfung kombiniert, so z.B. als sog. opto-hydraulische Verfahren. Darüber hinaus wurde auch in zahlreichen wissenschaftlichen Forschungsprojekten die Entwicklung von Multisensorsystemen vorangetrieben, so z.B. unter den Bezeichnungen KURT, PIRAT und MAKRO. Als praxisorientiertes Beispiel für die Entwicklung maßgeschneiderter Inspektionstechnik für spezielle Fragestellungen der Abwassertechnik kann das Inspektionssystem der Emschergenossenschaft angesehen werden. Der künftige, ständig teilgefüllte „Abwasserkanal Emscher“ soll durch dieses unbemannte System fortlaufend mitameratechnik und Sensoren inspiziert werden.

Verfahren zur Untersuchung des Rohr-Boden-Systems

Die Untersuchung des Rohr-Boden-Systems umfasst die Erfassung der statischen Wechselwirkungen zwischen Rohr und dem umgebenden Bettungskörper. Die angebotenen Messsysteme setzen das Gesamtsystem impulsartig einer physikalischen Beanspruchung aus und zeichnen die Systemantwort für weitere Analyseschritte auf.

Ein **mechanisches Messverfahren**, das bereits als Prototyp in der Praxis eingesetzt wird, ist das sog. „Ovameter“. Bei diesem Verfahren wird eine definierte Verformung aufgebracht und aus der gemessenen Kraft auf die elastischen Eigenschaften des Rohr-Boden-Systems geschlossen, wie z.B. die horizontale Bettungssteifigkeit der Leitungszone. Dies geschieht unmittelbar während der Messkampagne und wird auf einem Monitor dargestellt. Das Messverfahren ist bei biegeweichen Rohren bis DN 600 in Sand- oder Sand/Kies-Böden anwendbar. Außer zur Verdichtungskontrolle können die Messwerte des „Ovameters“ als Eingangsdaten für eine Kontrollrechnung (3D-FE-Analyse) genutzt werden.

Ein **akustisches Messverfahren** zur Untersuchung des Rohr-Boden-Systems ist die Klopf-schallprüfung, z.B. mit dem „Rohr.Impacto.Meter“. Bei diesem Verfahren der Schallreflexionsanalyse wird das Rohr z.B. durch einen Hammer in Schwingung versetzt. Die schlagartige Anregung des verlegten Abwasserrohres erzeugt dann im Prüfobjekt eine Schwingungsantwort, die durch räumlich versetzt angeordnete Beschleunigungssensoren erfasst und anschließend, auch unter Einsatz numerischer Modelle, ausgewertet wird. Fehlstellen wie Risse oder Hohlräume im Bereich der Rohrbettung lassen sich so eingrenzen.

Das **Radar-Verfahren** ist ein elektromagnetisches Verfahren, bei dem kurze sehr schnell aufeinander folgende elektromagnetische Impulse von einer Antenne in das Erdreich abgestrahlt werden. Nach der Reflexion an Schichtgrenzen oder Objekten (Leitungen, Rohren, Steinen und Fundamenten) werden diese Signale durch das selbe Gerät wieder empfangen. Messungen aus dem Kanal heraus können Informationen über die Lagerungs- und Überschüttungsverhältnisse im Nahbereich eines Kanals liefern, die durch Messungen von der Straßenoberfläche durch den Straßenoberbau hindurch nicht erreicht werden. Insbesondere sind dies die Bettungsverhältnisse im „Zwickelbereich“ und unterhalb des Kanals. Voraussetzung für die Erkennung von Anomalien ist jedoch, dass in dem zu untersuchenden Bereich eine deutliche Änderung der dielektrischen Eigenschaften (Feldkonstante, Leitfähigkeit) vorliegt. Das Radarsystem ist nicht anwendbar bei anstehendem Grundwasser. Geräte für den Praxiseinsatz im Kanal werden bereits angeboten. Ergänzende Entwicklungen, auch im Rahmen von Forschungsvorhaben, werden in der Fachwelt gegenwärtig diskutiert.

Als ergänzende Untersuchungsmethode wurde im Rahmen dieser Studie ein radiometrisches Verfahren, auch als Computertomographie bekannt, beispielhaft zur Detektion von Wurzeln im Erdreich getestet und zeigte dort im Labormaßstab gute Ergebnisse. Für den Praxiseinsatz sind allerdings noch erhebliche technische Weiterentwicklungen erforderlich.

Multisensorsysteme, wie KARO und SAM, bieten darüber hinaus die Möglichkeit zum Einsatz weiterer Sensoren und Messverfahren, wie z.B. Mikrowellen-Rückstreu-Sensoren. Zur optischen Untersuchung bereits festgestellter Schwachstellen im Rohr-Boden-System bietet sich ggf. der Einsatz von Endoskopen an, z.B. durch offene Schäden oder Bohrlöcher in der Rohrwandung.

Verfahren zur Untersuchung des Bodenkörpers

Ergänzend zu den o.a. Techniken wurde auch der Einsatz klassischer Verfahren der Baugrunderkundung für den vorliegenden Anwendungsfall hinterfragt, wie z.B. Sondierungsverfahren, Ramm- und Drucksondierung. Die Vorgehensweise beim Einsatz der Reflexions- und Refraktionsseismik sowie der seismischen Tomographie wurde erläutert und auf der Grundlage von Erfahrungen aus eigenen Messkampagnen bewertet. Während die Auswertung der gewonnenen Daten besondere Qualifikationsanforderungen stellt, können die ausgewerteten Messergebnisse auch dem messtechnischen Laien als Grundlage für die weitere bautechnische Bewertung dienen.

Die kapazitive Geoelektrik stellt ein weiteres Messverfahren dar, mit dem bereits heute der Untergrund von der Geländeoberfläche aus detektiert werden kann.

Neben der o.a. Anwendung des Radars aus dem Kanal heraus wird das Radarverfahren auch als Messsystem von der Straßenoberfläche aus eingesetzt bzw. weiterentwickelt. Im Rahmen dieser Studie wurde der Einsatz des Radarverfahrens zur Erkundung des Bodenkörpers einer Testhaltung DN 300 eingesetzt. Dabei wurde die Antenne entlang einer Profillinie zwischen zwei Einsteigschächten bewegt. Bei einer weiteren Messung im Kanal wurde die Antenne auf einem Rollwagen platziert und durch den Kanal gezogen. Die durchgeführten Messungen zeigen, dass das Radar in einem nicht begehbaren Abwasserkanal einsetzbar ist. Oberhalb des Grundwasserspiegels können auswertbare Messwerte gewonnen werden.

Radiometrische Messgeräte werden heute im Hoch- und Straßenbau vielfach zur Schadenserkenkung und Qualitätskontrolle eingesetzt. Beispiele für derartige Geräte wurden ebenfalls dargestellt.

Arbeitsroboter und Trägersysteme

Zum Einsatz von Messtechnik oder Sensoren innerhalb eines nicht begehbaren Abwasserkanals müssen diese Geräte i.d.R. innerhalb des Kanals bewegt oder geführt werden bzw. Vorarbeiten geleistet werden. Bereits heute sind eine Vielzahl unterschiedlicher Roboter am Markt verfügbar, die in nicht begehbaren Kanälen für unterschiedliche Arbeiten, z.B. Wurzelschneiden, Fräsen, Spachteln, Sanierungsarbeiten, Kabelinstallation und auch zur Inspektion, eingesetzt werden. Ein Einsatz als Trägersysteme für die o.a. Techniken der Kanal- und Baugrunderkundung scheint vielfach nach Modifikation möglich. Im Kapitel 5 wird eine Auswahl unterschiedlicher Arbeitsroboter für nicht begehbare Abwasserkanäle dargestellt.

Abschließend werden im Kapitel 6 die wesentlichen Schlussfolgerungen für die Praxis sowie der weitere Untersuchungsbedarf herausgestellt.

8 Literatur

- [1] Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen und Einleitungen von Abwasser aus Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem (Selbstüberwachungsverordnung Kanal – SÜVVKan, 16. Januar 1995.
- [2] Anforderungen an den Betrieb und die Unterhaltung von Kanalisationsnetzen, RdErl. d. Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft v. 03.01.1995; Ministerialblatt für das Land NRW, Nr. 14: S. 251- 253; Düsseldorf 1995.
- [3] Endbericht zum Forschungsvorhaben „*Quantitative Inspektion von Abwasserkanälen und -leitungen mittels geophysikalischer Verfahren*“, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW (MUNLV); Abschluss September 2003.
- [4] Detektion von Lagerungsdefekten und Hohlräumen in der Umgebung erdverlegter Abwasserkanäle: Arbeitsbericht der ATV-DVWK-Arbeitsgruppe ES-5.8, KA – Abwasser, Abfall 2003 (50) Nr. 5.
- [5] Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG) vom 27.07.1957 in der Fassung und Bekanntmachung vom 12.11.1996.
- [6] Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Kommunalabwasserverordnung – KomAbwV); Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land NRW, Nr. 48: S. 373- 375; Düsseldorf 1997.
- [7] Bosseler B.; Birkner T., Gronau U.: Erfassung und Auswertung von Erfahrungen mit der Umsetzung der SÜVVKan; Untersuchung am IKT im Auftrag des MUNLV; Entwurf August 2001.
- [8] Stein, R.: Trends und Entwicklungen der Zustandserfassung, bi Umweltbau 3/04 S. 64-72.
- [9] DIN EN 1610, Ausgabe: 1997-10: Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen.
- [10] DIN EN 752-3, Ausgabe:1996-09: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Teil 3: Planung.
- [11] DIN EN 1295-1, Ausgabe:1997-09: Statische Berechnung von erdverlegten Rohrleitungen unter verschiedenen Belastungsbedingungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen.
- [12] Arbeitsblatt A 139: Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen, Regelwerk der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), Juni 2001.
- [13] Sicherheit – stets griffbereit, Auszug aus der Info-Mappe der Tiefbau-Berufsgenossenschaft.
- [14] DIN 752-5, Ausgabe: 1997-11: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Teil 5: Sanierung.
- [15] Stein, D.: Instandhaltung von Kanalisationen, 3. Auflage Ernst & Sohn 1998.
- [16] Schladweile, J.: The Collection Systems Historical Photo and Artifacts Display, Ausstellung, Arizona Water and Pollution Control Association (AWPCA) (www.sewerhistory.org).
- [17] Merkblatt M 149-2: Zustandserfassung, -klassifizierung, und -bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden, Teil 2: Kodiersystem für die optische Inspektion, Regelwerk der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), Februar 2006.
- [18] Berger, Ch.; Lohaus, J.: Zustand der Kanalisation in Deutschland - Ergebnisse der DWA-Umfrage 2004, (www.dwa.de).

- [19] DIN 1998, Ausgabe: 1941-05: Richtlinien für die Einordnung und Behandlung der Gas-, Wasser-, Kabel- und sonstiger Leitungen und Einbauten bei der Planung öffentlicher Straßen.
- [20] Informationen der Heidelberger Versorgungs- und Verkehrsbetriebe GmbH (HVV), www.hvv-heidelberg.de.
- [21] Informationen der Protecta Gesellschaft für Oberflächenschutzschichten mbH, Krefeld (www.protecta-strassenerhalt.de).
- [22] Bildmaterial der IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH, Gelsenkirchen.
- [23] Purde, H.-J. ; Hecker, H.-P.; Flick, K.-H.: Erneuerung der Dichtung an Rohrverbindungen von Steinzeugrohren älterer Bauart, 3R international 1-2/2006.
- [24] Informationen des Krafftahrt-Bundesamt, Flensburg.
- [25] Informationen des Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V. (www.bgl-ev.de).
- [26] Informationen der Fahrzeugwerk Bernard KRONE GmbH, Werlte.
- [27] Informationen der Fliegl Fahrzeugbau GmbH, Triptis.
- [28] COST 334: European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research, Final Report of the Action „*Effects of wide single and dual tyres*“; EC, Brüssel, November 2001.
- [29] Forschungsprojekt „*Mindestüberdeckung und Belastungsansätze für flachüberdeckte Abwasserkanäle*“, der Fachhochschule Münster / Fachbereich Bauingenieurwesen im Auftrag des Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW (MUNLV) (in Bearbeitung).
- [30] Merkblatt M 149: Zustandserfassung, -klassifizierung, und -bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden Regelwerk der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), April 1999.
- [31] Ergebnisse über die geophysikalischen Untersuchungen in einer Versuchsstrecke (begehrer Kanal) auf dem IKT-Gelände in Gelsenkirchen im Rahmen des Forschungsvorhabens „*Quantitative Inspektion von Abwasserkanälen und -leitungen mittels geophysikalischer Verfahren*“ des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV), Dezember 2001.
- [32] Ergebnisbericht über die geophysikalischen Untersuchungen im Bereich der Olpener Strasse / Ostmerheimer Straße (Köln) im Rahmen des Forschungsvorhabens „*Quantitative Inspektion von Abwasserkanälen und -leitungen mittels geophysikalischer Verfahren*“ des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV), Dezember 2002.
- [33] Bosseler, B.; Sokoll, O.: Profilierte Großrohre aus Kunststoff – Praxiserfahrungen und Prüfkonzepte. Endbericht zum Forschungsvorhaben Versagensmechanismen von profilierten Großrohren aus Kunststoff – Erkennen, Bewerten, Prüfen im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW (MUNLV); Abschluss Oktober 2005.
- [34] Bosseler, B.; Redmann, A.: Stahlbetonrohre in offener Bauweise – Rohrprüfungen unter realitätsnahen Beanspruchungen, Endbericht zum Forschungsvorhaben Qualitäts- und Kostensicherung beim Bau begehrer Abwasserkanäle aus Stahlbetonrohren im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW (MUNLV); Abschluss Februar 2004.
- [35] Orłowsky, D.: Untersuchungen an einem Betonrohr mit Hilfe von Ultraschall, Deutsche Montan Technologie GmbH im Auftrag des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 2003 (unveröffentlicht).
- [36] Elsen, R.: Geophysikalische Messungen zur Bettungsuntersuchung an Kanalohren in Gelsenkirchen; Ergebnisbericht der DMT GmbH im Auftrag des IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur ,Gelsenkirchen, 2005, (unveröffentlicht).

- [37] Merkblatt M 143-1: Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden, Teil 1: Grundlagen, Regelwerk der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), August 2004.
- [38] Kanalzustandsreferenzkatalog nachdem Regelwerk der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), Merkblatt M 143, Teil 2: Optische Inspektion -Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und –leitungen, Anlage 2, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes NRW, September 1994.
- [39] Sulfide in Abwasseranlagen, Ursachen – Auswirkungen – Gegenmaßnahmen, Zement Merkblatt T3 (02.1999), Autor: Dipl.-Ing. N. Klose, Hrsg: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie.
- [40] Bielecki R., Schremmer H., Biogene Schwefelsäurekorrosion in teilgefüllten Abwasserkanälen. Mitteilungen des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau der TU Braunschweig, 1987.
- [41] Bosseler, B.; Schlüter, M.: Qualitätseinflüsse Schlauchliner: Stichproben-Untersuchung an sanierten Abwasserkanälen, IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen 2003.
- [42] ZTVE StB 94; Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Fassung 1997.
- [43] Köhler, R.; Tiefbauarbeiten für Rohrleitungen, 6. Aufl., Verlagsgesellschaft Rolf Müller, 1997.
- [44] Bildmaterial des Güteschutz Kanalbau.
- [45] Stecha, H.; Bettung der Rohre, Verfüllung, Verdichtung, in Köhler, R. (Hrsg.); Tiefbaupraxis für Abwasserkanäle, Vulkan-Verlag Essen, 2000.
- [46] Stein, D.; Entwicklung neuartiger Konzeptionen für Rohre aus Beton, Schlussbericht, Bundesminister für Forschung und Technologie, 1992.
- [47] Triantafyllidis, Th.; Bosseler, B.; Arsic, I.; Liebscher, M.: Einsatz von Bettungs- und Verfüllmaterialien im Rohrleitungsbau, Laboruntersuchungen und Versuche im Maßstab 1:1, Endbericht zum Forschungsvorhaben Ausführungsrisiken beim Einsatz von Bettungs- und Verfüllmaterialien im Rohrleitungsbau im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW (MUNLV); April 2006.
- [48] Baustellenhandbuches zum Bau von Abwasserleitungen und –kanälen, Herausgeber: ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. und Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW (MUNLV), 2002.
- [49] Produktinformation: Weimarer Bau-Mörtel[®], FITR – Gesellschaft für Innovation im Tief- und Rohrleitungsbau Weimar mbH.
- [50] Informationsmaterial M. Hondts, M.; Sachverständiger für Baumwurzel-Rohrleitungs-Interaktionen, Mönchengladbach (www.baumwurzeln.de).
- [51] Arbeitshilfe Abwasser, Oberfinanzdirektion Hannover – Landesbauabteilung, Leitstelle des Bundes für Abwassertechnik (www.arbeitshilfen-abwasser.de).
- [52] Merkblatt M 143-2: Optische Inspektion - Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen, Regelwerk der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), April 1999.
- [53] Bölke, K-P.: Kanalinspektionstechniken – Richtiges Erkennen der Zustände, ROHRBAU-Kongress 2000 in Weimar.
- [54] Informationen der IBAK Helmut Hunger GmbH, Kiel (www.ibak.de).
- [55] Informationen der JT- elektronik GmbH, Lindau (www.jt-elektronik.de).
- [56] Informationen der RICO EAB Gesellschaft für Mikroelektronik mbH, Kempten (www.rico-eab.de).

- [57] Informationen der CABERE GmbH Spezialfabrik für Kanal- und Rohrreinigungsgeräte, Wermelskirchen (www.cabere.de).
- [58] Informationen der GE Inspection Technologies, GmbH, Hürth (www.geinspectiontechnologies.com).
- [59] Informationen der GEJOS GmbH, Kempten (www.gejos.de).
- [60] Informationen der Gullyver Gesellschaft für mobile Inspektionssysteme mbH, Bremen (www.gullyver.de).
- [61] Informationen der IOGIS Knobbe, Essen (www.iogis.de).
- [62] Informationen der iPEK SPEZIAL-TV GmbH, Hirschegg (www.ipek.at).
- [63] Informationen der Itv gesellschaft für industrie-tv mbh, Betzigau (www.itv.de).
- [64] Informationen der NICOM Technologie, Sulzberg (www.nicom-electronic.de).
- [65] Informationen der OPTIMESS GmbH, Gera (www.optimes.com).
- [66] Informationen der OPTOMAX Vertriebsgesellschaft, Fellbach (www.optomax.eu).
- [67] Informationen der Pearpoint Inc., Thousand Palms CA, USA (www.pearpoint.com).
- [68] Informationen der Ritec GmbH Rohr-Inspektions-Technik, Haldenwang (www.ritec-tv.de).
- [69] Informationen der TV-IS GmbH, Winnenden Birkmannsweiler (www.tv-is.de).
- [70] Informationen der Wolfgang Rausch GmbH, Weißensberg (www.rauschtv.de).
- [71] Informationen der Aries Industries, Waukesha, WI, USA (www.ariesind.com).
- [72] Informationen der Cobra Technologies Smyrna, GA, USA (www.cobratec.com).
- [73] Informationen der Exavision, Nîmes (www.exavision.fr).
- [74] Informationen der IBOS s.r.o., Dobrovodská, Czech Republic (www.ibos.cz).
- [75] Informationen der Empire Industries, Inc., Arlington, TX , USA (www.sewerrat.com).
- [76] Informationen der RoboProbe Technologies, Inc., Palatine IL, USA (www.roboprobe.com).
- [77] Informationen der Scanprobe/Renoline Ltd. Warlingham, UK (www.scanprobe.com).
- [78] Informationen der TARIS Corporation, Moscow, Russia (www.taris.ru).
- [79] Stein, D., Körkemeyer, K., Brauer, A.: Vergleichende Analyse des neuartigen PANORAMO-Inspektionssystems mit den Standardverfahren zur Inspektion von Abwasserleitungen und Kanälen am Beispiel des ARGUS 4-Kamerasystems. Expertise der Prof. Dr.-Ing. Stein & Partner GmbH, Bochum im Auftrag der IBAK Helmut Hunger GmbH & Co. KG, Kiel. Bochum, Mai 2004 (veröffentlicht unter www.unitracc.de, kostenlose Registrierung für Einsicht erforderlich).
- [80] Stein, D.; Broziewski, A.: Optische Zustandserfassung von Kanalisationen - volldigital oder analog?, KA ABWASSER ABFALL Jg.: 52, Nr. 3, 2005.
- [81] Starke, D.: Kanalspiegelung, UmweltMagazin 10/2003, S. 44, 45.
- [82] Informationen der ELP GmbH, European Logistic Partners, Wuppertal (www.elp-logistik.com).
- [83] Informationen der Sonavision Ltd., Aberdeen, Scotland, UK (www.sonavision.co.uk).
- [84] Artikel Abstandsmessung (optisch). In: Herausgeber: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, Bearbeitungsstand: 18. Februar 2007 um 23:27 Uhr UTC. URL:
- [85] Smart Sewer Assessment Systems, Informationen der Purdue University, Division of Construction Engineering & Management, West Lafayette IN, (www.ecn.purdue.edu/ECT/Civil/smartsew.htm).
- [86] Informationen der ProKasro Mechatronik GmbH, Karlsruhe (www.prokasro.de) und des Fraunhofer Institut für Informations- und Datenverarbeitung IITB, Karlsruhe (www.iitb.fraunhofer.de).

- [87] Franke, K.H.; Graf, A.; Gergs, R.; Ikes, J.: Einsatz von Bildverarbeitung für Inspektionsroboter am Beispiel des Sielroboters, Zentrums für Bild- und Signalverarbeitung ZBS e.V., Vortrag TTNT Workshop, Chemnitz 1999, www.zbs-ilmenu.de.
- [88] Artikel Inertiales Navigationssystem. In: Herausgeber: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, Bearbeitungsstand: 30. März 2007, 13:31 UTC. URL: http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Inertiales_Navigationssystem&oldid=29892230 (Abgerufen: 26. April 2007, 10:52 UTC).
- [89] Informationen der DMT GmbH, Essen (www.dmt.de).
- [90] Artikel Ultraschall. In: Herausgeber: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, Bearbeitungsstand: 4. Februar 2007 um 21:27 Uhr UTC. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Ultraschall> (Abgerufen: 19. Februar 2007, 8:20 UTC).
- [91] Artikel Sonographie. In: Herausgeber: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, Bearbeitungsstand: 2. Februar 2007 um 21:29 Uhr UTC. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonographie> (Abgerufen: 19. Februar 2007, 8:30 UTC).
- [92] Informationen des Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik IBMT, St. Ingbert (www.ibmt.fhg.de)
- [93] Skerra, B.: Handbuch Molchtechnik, Vulkan Verlag Essen, 2000.
- [94] Informationen der Automatika Inc., Pittsburgh (www.automatika.com).
- [95] Informationen der Infotec Consulting, Essex (www.infotec1.net).
- [96] Informationen des Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken (www.izfp.fraunhofer.de).
- [97] Informationen der GE Energy (PII), Stutensee-Blankenloch (www.gepower.com).
- [98] Informationen der NDT Systems & Services AG, Stutensee (www.ndt-ag.de).
- [99] Informationen der AGR PipeTech AS, Straume, Norwegen (www.agr.no).
- [100] Artikel Sonar. In: Herausgeber: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, Bearbeitungsstand: 18. März 2007 um 13:13 Uhr UTC. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonar> (Abgerufen: 21. März 2007, 9:05 UTC). http://de.wikipedia.org/wiki/Abstandsmessung_optisch, Abgerufen: 27. März 2007, 9:58 UTC.
- [101] Informationen der RapidView IBAK USA, Rochester IN (www.rapidview.com).
- [102] Informationen der Cues Inc., Orlando FL (www.cuesinc.com).
- [103] Informationen des Fraunhofer Institut für Autonome Intelligente Systeme AIS, Sankt Augustin (www.kanalrobotik.de).
- [104] Körkemeyer, K.: Konventionelle und neue Möglichkeiten der Dichtheitsprüfung, Tagungsband „*Entwicklungen in der Kanalisationstechnik*“ 2001 in Köln.
- [105] Informationen der Seba Dynatronik Mess- und Ortungstechnik GmbH, Baunach (www.sebadyn.de).
- [106] Keller, G.: Ein neues Verfahren zur Inspektion von Entwässerungskanälen und -leitungen mittels opto-hydraulischer Zustandserfassung. Korrespondenz Abwasser (KA) 38 (1991), H. 11, S. 1476-1483.
- [107] Informations-, Lern- und Arbeitsplattform Unitracc, www.unitracc.de, Stein & Partner GmbH, Bochum.
- [108] Offenlegungsschrift: DE 197 17 720 A 1, Vorrichtung zur Inspektion und Instandhaltung von Rohren, Deutsches Patentamt 1998.
- [109] Informationen der KTO - Kommunikation und Technologietransfer Odenthal, Niederkassel (www.kto-web.de).
- [110] Informationen der CSIRO Manufacturing and Infrastructure Technology, Australia (www.vision.cmit.csiro.au/project/pirat/).
- [111] Informationen der RedZone Robotics, Inc., Homestead PA (www.redzone.com).

- [112] Informationen des Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung IFF, Magdeburg (www.iff.fraunhofer.de).
- [113] Informationen der Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen.
- [114] Offenlegungsschrift: DE 102 15 325 A 1, Roboter zur Inspektion und/oder Reinigung und/oder Sanierung von Kanälen, Deutsches Patentamt 2003.
- [115] Informationen der Karl Storz GmbH, Tuttlingen (www.karlstorz.de).
- [116] Artikel Endoskop. In: Herausgeber: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, Bearbeitungsstand: 9. Februar 2007 um 02:07 Uhr UTC. URL:
- [117] Thépot, O.: Prise en compte des caractéristiques en petites déformations des sols dans l'étude du comportement des collecteurs enterrés, Dissertation, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004.
- [118] Informationen der SAGEP service MAC, Paris.
- [119] Informationen der GSP Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen und dynamische Prüfmethode mbH, Mannheim (www.gsp-mannheim.de).
- [120] Herbst, J.: Zerstörungsfreie Prüfung von Abwasserkanälen mit Klopferschall. Dissertation, Universität Karlsruhe, Fakultät für Maschinenbau, Schriftenreihe des Instituts für Mess- und Regelungstechnik Nr. 003, 2004.
- [121] Patentschrift DE 43 33 690 C1, Fahrbare Vorrichtung zur Schallreflexionsanalyse zur Inspektion von Kanalrohren von Innen vor Ort, Deutsches Patentamt 1995.
- [122] Merkblatt DWA-M 149-4: Zustandserfassung und –beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden, Teil 4: Detektion von Lagerungsdefekten und Hohlräumen in der Umgebung von Leitungen, Entwurf Oktober 2006.
- [123] Offenlegungsschrift: DE 42 43 201 A1, Vorrichtung zur Materialuntersuchung, Deutsches Patentamt, 1993.
- [124] Artikel Mikrowellen. In: Herausgeber: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, Bearbeitungsstand: 22. März 2007 um 13:42 Uhr UTC. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Mikrowellen> (Abgerufen: 27. März 2007, 17:03 UTC).
- [125] Informationsmaterial zum Workshop „*Einsatzmöglichkeiten des Georadars als Verfahren zur Detektion und Bewertung von Lagerungsdefekten und Hohlräumen im Bereich erdverlegter Abwasserkanäle*“ des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA), 14. 02.2006, BEW Duisburg.
- [126] Informationen des FITR Forschungsinstitut für Tief- und Rohrleitungsbau Weimar e.V. (www.fitr.de).
- [127] Meinecke, M.: Einsatz von Radar in der Kanalisation, bi Umweltbau 3/04 S. 60-63.
- [128] Informationen der Technischen Universität Ilmenau.
- [129] Europäische Patentanmeldung EP 1 643 044 A2, Kanalinspektionsfahrzeug und Verfahren zur Kanalinspektion, Europäisches Patentamt 2004.
- [130] Artikel Computertomographie. In: Herausgeber: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, Bearbeitungsstand: 31. Januar 2007 um 14:48 Uhr UTC. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Computertomographie> (Abgerufen: 19. Februar 2007, 10:30 UTC).
- [131] Artikel Röntgenstrahlen. In: Herausgeber: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, Bearbeitungsstand: 3. Februar 2007 um 11:06 Uhr UTC. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/R%C3%B6ntgenstrahlen> (Abgerufen: 16. Februar 2007, 12:15 UTC).
- [132] Informationen der DTI GmbH, Düsseldorf (www.detector-trade.de).
- [133] Pipe Explorer™ Surveying System, Summary Report, Prepared for U.S. Department of Energy, Office of Environmental Management, Office of Science and Technology, June 1999.

- [134] Informationen des Ames Laboratory, U.S. Department of Energy, (www.external.ameslab.gov/cmst/CMSTSite/Projects/pp_74.html)
- [135] Informationen der NDT Equipment Services Ltd., Billingham Cleveland (www.ndtequipment.co.uk).
- [136] Informationen des Fraunhofer Institut für Informations- und Datenverarbeitung IITB, Karlsruhe (www.iitb.fraunhofer.de).
- [137] Kuntze, H. B.; Haffner, H.; Selig, M.; Schmidt, D.; Janotta, K.; Loh, M.: Entwicklung eines flexibel einsetzbaren Roboters zur intelligenten sensorbasierten Kanalinspektion (KARO), 4. Internationaler Kongress Leitungsbau, Hamburg, 1994.
- [138] Munser, R.; Hartrumpf, M.: Detektion verdeckter Anomalien im Bettungsbereich von Abwasserrohren mit einem Mikrowellen-Rückstreusensor, Technisches Messen 7–8/2003.
- [139] Eiswirth, M.: Leckageortung – künftiger Herausforderungen und Lösungen, EntsorgungsPraxis 2000, 18(6): 52-57.
- [140] Wormuth R.; Schneider K-J.: Baulexikon online, Bauwerk Verlag, Berlin 2007.
- [141] Janocha, H.: Application Potential of Magnetic Field Driven Actuators, European Conference on Magnetic Sensors and Actuators (EMSA 2000) in Dresden. <http://de.wikipedia.org/wiki/Endoskop> (Abgerufen: 16. Februar 2007, 11:50 UTC).
- [142] Teutsch, G.; Dietrich, P.: Einsatz von tomographischen Verfahren in Horizontalbohrungen, Geologisches Institut, Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Tübingen, Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, gefördert mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg, 2000.
- [143] Trassenuntersuchungen mittels hochauflösender kapazitiver 2D-Geoelektrik. Informationen der Dr. Donié Geo-Consult GmbH, Karlsbad (www.donie-geo-consult.de).
- [144] Informationen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch Gladbach (www.bast.de).
- [145] Informationen der GBM Wiebe Gleisbaumaschinen GmbH, Achim (www.wiebe.de).
- [146] Informationen der GSSI Geophysical Survey Systems Inc., Salem (www.geophysical.com).
- [147] zu Eulenberg, A.: Der Blick in die Leitungszone wird schärfer, bi Umweltbau 1/04 S. 38,39.
- [148] Pinnekamp, J.; Stepkes, H.; Hennerkes, J; Müller, K.; Zimmermann, J.: Influence of Leaky Sewers Regarding Stability of the Surrounding Ground and Application Possibilities of Ground Penetrating Radars as a Method for Detecting and Assessment of Bedding Defects and Cavities in the Area of Buried Sewers, 2nd international IWA Conference on Sewer Operation and Maintenance, Wien, 26.-28. Oktober 2006.
- [149] Informationen der Drilline Products, Middlesex, UK (www.drilline.com).
- [150] Informationen der Vermeer Manufacturing Company, Pella, Iowa (www.vermeerimg.com).
- [151] Pinchbeck, D.; Manacorda, G.; Rameil, M.: Studie zur Entwicklung eines neuartigen Georadarsystems: Das europäische GIGA Projekt, 3R International, 10/2003. www.giga-radar.info
- [152] Manacorda, G.; Loach, D.; Pinchbeck, D. Capdevielle, J-P.; Fournier, P-F.; Scott, H.; Kazik, J.; Rameil, M.: The European GIGA Projekt, 10. International Conference on Ground Penetrating Radar Delft, Netherlands, 21.-24. Juni 2004.
- [153] Informationen des schweizer Bundesamtes für Metrologie METAS, Bern-Wabern (www.metas.ch).
- [154] Artikel Radiometrie. In: Herausgeber: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, Bearbeitungsstand: 30. März 2007 um 14:39 Uhr UTC. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Radiometrie> (Abgerufen: 13. April 2007, 13:56 UTC).

- [155] Informationen der Troxler Electronic Laboratories Inc., Research Triangle Park, NC (www.troxlerlabs.com).
- [156] Informationen der IMS Robotics GmbH, Ottendorf-Okrilla (www.ims-robotics.de).
- [157] Informationen der KA-TE System AG, Freienbach, Schweiz (www.ka-te.ch).
- [158] Informationen der ProKasro Mechatronik GmbH, Karlsruhe (www.prokasro.de).
- [159] Informationen der Oberdorfer AG, Nürnberg (www.oberdorfer-ag.de).
- [160] Informationen der CPT Chevalier Pipe Technologies GmbH.
- [161] Informationen der Inuktun Services Ltd., Nanaimo, BC, Canada (www.inuktun.com).

