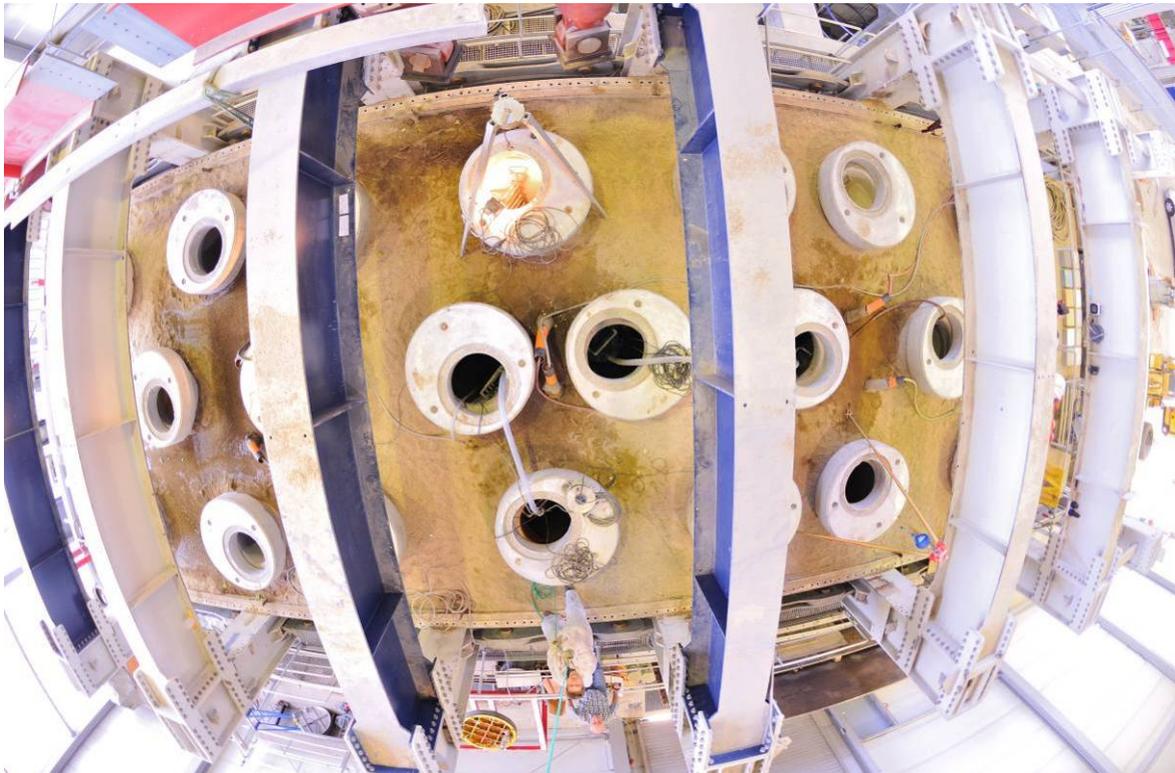
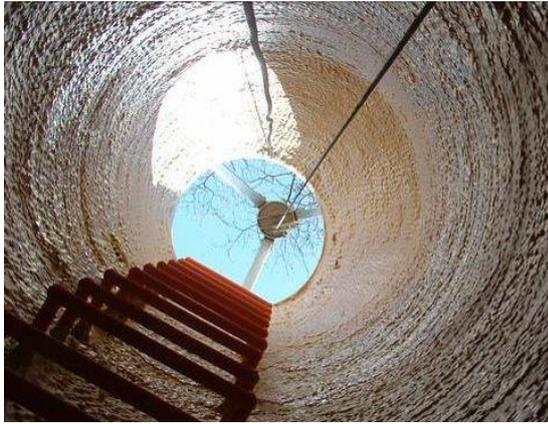


# Sanierung von Abwasserschächten

- Untersuchung von Materialien und Systemen zur  
Abdichtung und Beschichtung -



**- Kurzfassung -**

## **Kurzbericht zum Forschungsprojekt:**

Sanierung von Abwasserschächten

AZ: I-2-ZV-2.1-08/068 und I-2-ZV-2.1-08/068.1 (IV-7-041 105 0251)

## **Auftraggeber:**



Ministerium für Klimaschutz,  
Umwelt, Landwirtschaft,  
Natur- und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen

## **Auftragnehmer:**



IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH  
Exterbruch 1  
45886 Gelsenkirchen

## **Bearbeitung:**

Wissenschaftliche Leitung: PD Dr.-Ing. B. Bosseler  
Projektleitung und -bearbeitung: Dipl.-Ing. M. Liebscher  
Dipl.-Ing. M. Gillar  
Dr. rer. oec. L. Rometsch  
Dipl.-Ing. (FH) S. Ulutaş  
Dipl.-Ing. (FH) F. Hummelt  
Dipl.-Ing. (FH) S. Graw

## **Danksagung:**

Wir danken allen Mitgliedern des IKT-Lenkungskreises „Abwasserschächte“ für die fachliche Unterstützung und Begleitung dieses Forschungsprojektes. Darüber hinaus gilt unser besonderer Dank jenen Netzbetreibern, die im Rahmen des Projektes innerhalb ihrer Abwassernetze die Vielzahl von Vor-Ort-Untersuchungen ermöglichen haben.

Abwasserbetrieb der Stadt Rietberg:	Hr. Lammering, Hr. Schmidt
BLB Duisburg:	Hr. Huß †
Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt):	Hr. Kersten
Emschergenossenschaft/Lippeverband:	Hr. Behmer
Entsorgungsbetriebe Stadt Warendorf:	Hr. Künnemeyer
Gelsenwasser AG:	Hr. Steinert
Gelsenkanal:	Hr. Gaa, Hr. Pospiech
Gemeinde Möhnesee:	Hr. Neumann
Göttinger Entsorgungsbetriebe:	Fr. Schenk
Hansewasser Bremen GmbH:	Hr. Ahrens, Hr. Haase
InfraStruktur Neuss AöR:	Hr. Koch

Niederrheinische Versorgung und Verkehr AG:	Hr. Klein, Hr. Reinartz, Hr. Spinnräker
Remscheider Entsorgungsbetriebe:	Hr. Kluge
Stadt Bottrop:	Hr. Üstündag
Stadt Bad Salzuflen:	Hr. Lennier
Stadt Duisburg:	Hr. Benstem
Stadt Hemer:	Hr. Wächter
Stadt Iserlohn:	Hr. Michutta, Fr. Neuhoff
Stadt Recklinghausen:	Hr. Becker, Hr. Wiedemann
Stadtbetriebe Selm AöR:	Hr. Pirih, Fr. Scholz, Hr. Terwolbeck
Stadtentwässerung Düsseldorf:	Hr. Schneider, Fr. Sobczak
Stadtentwässerung Kiel:	Fr. Holzapfel
Stadtentwässerung München:	Hr. Vorbach
Städtische Betriebe Minden:	Hr. Höppner, Hr. Otte in Holte
Stadtwerke Aachen:	Hr. Lütten, Hr. Zeiler
Stadtwerke Balve:	Hr. Glänzel
Stadtwerke Essen AG:	Hr. Hinz, Hr. Leufgen
Stadtwerke Neuenrade:	Hr. Pakosch, Hr. Turk
Stadtwerke Sundern:	Hr. Bauer
Technische Betriebe Leverkusen:	Hr. Frick, Hr. Ruthmann
Tiefbauamt Stadt Bochum:	Fr. Funk, Hr. Großklags, Fr. Ludowig
Verbandsgemeinde Asbach:	Hr. Fulda, Hr. Neifer
Vlothoer Wirtschaftsbetriebe:	Hr. Schilling (Sprecher Lenkungsreis)
Wupperverband:	Hr. Gerlach, Hr. Klingebiel
Zweckverband Wasser Abwasser Vogtland:	Hr. Donath

Darüber hinaus gilt unser Dank Herrn Prof. Dr. H. W. Siesler, Institut für Physikalische Chemie der Universität Duisburg-Essen, Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Breitenbücher, Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum, und Herrn Prof. Dr. rer. nat. L. Dune-  
mann, Hygiene Institut, Gelsenkirchen für die umfangreichen Materialuntersuchungen im  
Rahmen der Versuche. Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Thewes, Lehrstuhl für Tunnelbau, Lei-  
tungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum danken wir für die Machbarkeits-  
studie zur Übertragbarkeit von Sanierungsverfahren aus dem Tunnelbau. Für die Unter-  
suchung von Hohlstellen mit dem Verfahren der lokalen Resonanzspektroskopie gilt unser  
Dank Frau Dr.-Ing. Dipl.-Geophys. A. Jüngert von der Materialprüfungsanstalt Universität  
Stuttgart.

<b><u>Inhaltsverzeichnis</u></b>	<b>Seite</b>
<b>1 VERANLASSUNG UND VORGEHENSWEISE.....</b>	<b>5</b>
<b>2 AUFGABENSTELLUNG.....</b>	<b>6</b>
2.1 ABWASSERSCHÄCHTE: BAUTECHNISCHE EIGENSCHAFTEN .....	6
2.2 SCHACHT-/SANIERUNGSZUSTÄNDE .....	7
<b>3 IN-SITU-MABNAHMEN .....</b>	<b>9</b>
<b>4 GROßVERSUCHE IM MAßSTAB 1:1.....</b>	<b>10</b>
4.1 VERSUCHSAUFBAU .....	10
4.2 VERSUCHSABLAUF.....	12
4.3 VERSUCHSERGEBNISSE .....	16
4.3.1 Abdichtung von Rohreinbindungen .....	16
4.3.2 Abdichtung des Schachtkörpers.....	17
4.3.3 Untergrundvorbereitung für Beschichtungen .....	18
4.3.4 Mörtelbeschichtungen.....	19
4.3.5 Polymere Beschichtungen.....	21
<b>5 SPEZIELLE FRAGESTELLUNGEN.....</b>	<b>26</b>
<b>6 PLANUNGSHINWEISE UND EMPFEHLUNGEN.....</b>	<b>32</b>
6.1 QUALITÄTSSICHERUNG SCHACHTBESCHICHTUNG .....	32
6.1.1 Anwendungsbereich.....	32
6.1.2 Sanierungsplanung .....	32
6.1.3 Untergrundvorbereitung.....	34
6.1.4 Beschichtung.....	35
6.1.5 Abnahmen .....	35
6.1.6 Prüfungen zur Qualitätssicherung.....	35
6.1.7 Muster Sanierungsprotokolle.....	37
6.2 SCHULUNGSPROGRAMM .....	37
<b>7 FAZIT.....</b>	<b>40</b>
<b>8 LITERATUR .....</b>	<b>44</b>

## 1 Veranlassung und Vorgehensweise

Das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV NRW) beauftragte im Juli 2008 das IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur mit der Bearbeitung des Forschungsprojektes „Sanierung von Abwasserschächten“. Dieses Projekt fasst vier Fragestellungen des Moduls Sanierung im IKT-Forschungsschwerpunkt „Abwasserschächte“ zusammen: 1) „Injektion und Abdichtung“, 2) „Sanierung der Anschlussbereiche“, 3) „Mineralische Beschichtungssysteme“ und 4) „Polymere Beschichtungssysteme“.

Das Projekt wurde durch einen Lenkungskreis mit 35 Netzbetreibern begleitet und fortlaufend auf deren Praxisanforderungen abgestimmt. Auswählte Produkte und Verfahren wurden im Rahmen von Vor-Ort-Maßnahmen, Großversuchen im Maßstab 1:1 und ergänzenden Detailanalysen untersucht. Die Ergebnisse sind vollständig in der Langfassung des Forschungsberichtes dargestellt [1].

Die vorliegende Kurzfassung des Forschungsberichtes enthält zunächst in Abschnitt 2 eine Beschreibung der Aufgabenstellung des Projektes. Die Ergebnisse aus In-situ-Maßnahmen sind in Abschnitt 3 zusammengefasst: Um die Auswirkungen mehrjähriger Betriebsbelastungen zu erfassen, wurden zunächst Altbeschichtungen untersucht und zahlreichen Qualitätsprüfungen unterzogen. Abdichtungsmaßnahmen an Schachtkörpern und Rohranbindungen wurden vor Ort begleitet. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Begleitung von Beschichtungsmaßnahmen in [2] diente dies der Auswahl geeigneter Materialien, Verfahren und Randbedingungen für die anschließenden Großversuche und ergänzenden Laboruntersuchungen.

In Großversuchen im Maßstab 1:1 wurde die Leistungsfähigkeit und Robustheit von Abdichtungs- und Beschichtungsverfahren unter definierten, für alle Sanierungsmaßnahmen gleichen Randbedingungen über einen Zeitraum von fünf Monaten untersucht (Abschnitt 4). Mit Blick auf das Langzeit-Verhalten der sanierten Abwasserschächte unter Außenwasserdruck wurden dabei besondere Zeitraffereffekte eingesetzt.

In Abschnitt 5 werden weitere spezielle Fragestellungen auf Grundlage ergänzender Laboruntersuchungen beantwortet, so zur mechanischen Belastbarkeit von sanierten Rohranbindungen, dem Verhalten von Hohlstellen unter Außenwasserdruck und der Wirksamkeit von Nachbehandlungsmitteln bei mineralischen Beschichtungen. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, der Einsatz innovativer Prüfverfahren sowie praxisnahe Planungshinweise und Empfehlungen runden das Bild ab.

Um eine praxisnahe Verwertung der Projektergebnisse zu erleichtern, wurden Planungshinweise und Empfehlungen zur Schachtsanierung entwickelt. Darüber hinaus wurde ein Schulungsprogramm für die an einer Sanierungsmaßnahme beteiligten Anwender und Auftraggeber konzipiert (Abschnitt 6).

Im Gesamtblick werden abgesicherte Erkenntnisse über die Qualitätseinflüsse bei Abdichtungs- und Beschichtungsmaßnahmen erarbeitet, die den Netzbetreibern als Orientierung für ihr weiteres Handeln dienen können. Dies betrifft den gesamten Prozess von der Ausschreibung und Vergabe bis zur Abnahme der Sanierungsleistungen einschließlich Maßnahmen zur Qualitätssicherung.

## 2 Aufgabenstellung

Die Qualität von Sanierungsmaßnahmen an Abwasserschächten steht in engem Zusammenhang zu den grundsätzlichen bautechnischen Eigenschaften der Abwasserschächte und der schrittweisen Veränderung des Schacht- bzw. Sanierungszustandes im Verlaufe der Sanierungsmaßnahme.

### 2.1 Abwasserschächte: Bautechnische Eigenschaften

Sanierte Abwasserschächte sind komplexe bautechnische Systeme. Entsprechend ist eine Zuordnung von Schäden und Mängeln der Sanierungsqualität zu Schadens- bzw. Mängelursachen allein aufgrund von In-situ-Beobachtungen kaum möglich. Bereits in [2] konnte gezeigt werden, dass vielfältige Faktoren die Dauerhaftigkeit und Qualität des Sanierungsergebnisses beeinflussen können, so z.B. Fehler bei der Sanierungsausführung und -vorbereitung sowie unberücksichtigte Bauwerksbelastungen bzw. bauliche Randbedingungen. Dem Verständnis für die bautechnischen (System-)eigenschaften eines sanierten Abwasserschachtes kommt damit eine besondere Bedeutung zu. Im Einzelnen betrifft dies:

#### 1. Belastungen

Jedes bautechnische System wird durch die einwirkenden Belastungen beeinflusst. Diese können rein mechanischer oder auch (bio-)chemischer Natur sein. Bei Schachtbauwerken sind hier beispielsweise die Erdlast auf das Bauwerk, die Höhe des Grundwasserstandes und die wirkenden Verkehrsbelastungen zu nennen. Auch spielen chemische Belastungen durch das transportierte Medium eine Rolle.

#### 2. Materialeigenschaften

Die Eigenschaften der eingesetzten Materialien, sowohl für das Schachtbauwerk selbst, als auch für die Abdichtung bzw. Beschichtung sind für den Charakter und die Leistungsfähigkeit des Gesamtbauwerks von hoher Bedeutung. Hier sind insbesondere Festigkeit, Oberflächenbeschaffenheit und chemische Beständigkeit zu nennen.

#### 3. Bauteil- bzw. Bauwerksgeometrie

Bei Abwasserschächten handelt es sich meist um einwandige, zylindrische Bauteile mit seitlichen Zu- und Abläufen. Im Rahmen von Abdichtungs- oder Beschichtungsmaßnahmen kann diese Geometrie wesentlich verändert werden. Abdichtungen durch Injektionen erzeugen beispielsweise großvolumige Körper im umgebenden Boden und verändern so maßgeblich die Geometrie außerhalb des Schachtbauwerkes. Beschichtungen sollen einen festen Verbund mit dem Ausgangsmaterial eingehen und verändern hierdurch Wanddicke und -aufbau. Zeitabhängig kann es hier zu wesentlichen Veränderungen kommen, z. B. durch das Ablösen der Beschichtung auch in Verbindung mit Blasenbildungen infolge von Außenwasserdruck oder Abreißen von Injektionskörpern bedingt durch wechselnde Grundwasserstände.

#### 4. Äußere Wechselwirkungen / Randbedingungen

Belastungen, Materialeigenschaften und Bauwerksgeometrie können auch in en-

ger Wechselwirkung mit anderen Einflüssen und Randbedingungen stehen. Beispiele sind die Verdichtung des umgebenden Bodens sowie Veränderungen des Straßenoberbaus und des Untergrundes.

## 2.2 Schacht-/Sanierungszustände

Über den Bau- bzw. Sanierungsprozess sowie die spätere Betriebsphase unterliegen die Belastungen, Materialeigenschaften und Geometrie eines Abwasserschachtes zeitabhängigen Veränderungen. In der Regel werden die verwendeten Materialien bereits in ihrer Entwicklung umfangreichen Laborprüfungen zur Ermittlung der (zeitabhängigen) Materialeigenschaften bei mechanischer und chemischer Belastung unterzogen (vgl. [3]). Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt daher auf den verfahrenstechnischen Einflussfaktoren, anwendungsspezifischen Belastungen (insbesondere Grundwasser) und geometrischen Eigenschaften der sanierten Systeme.

Die in den In-situ- und Laboruntersuchungen betrachteten Schacht- / Sanierungszustände lassen sich am Beispiel der Beschichtungsverfahren wie folgt unterscheiden:

1. Im Rahmen einer *Zustandserfassung* werden Schächte im **Bestand** eines Netzbetreibers inspiziert und der **Sanierungsbedarf** wird ermittelt. In der Regel betrifft dies undichte Mauerwerks- oder Betonschächte mit zumeist kreisförmigem Querschnitt und unterschiedlichen Schadstellen, beispielsweise punktuelle oder flächige Oberflächenschäden sowie Undichtigkeiten in der Rohrwand und undichte Zuläufe. Der Wassereindrang kann stark in Abhängigkeit des ständig wechselnden Grundwasserstandes variieren. Hinzu kommt, dass die angeschlossenen Rohrleitungen aus unterschiedlichen Materialien bestehen können. Außerdem ist in einem Abwasserschacht mit erheblicher Feuchtigkeit und Verschmutzung der Wandung zu rechnen.
2. Ausgehend von diesem Szenario werden nun *Abdichtungsmaßnahmen* ausgeführt, um den Schacht in einen **temporär dichten Zustand** zu überführen. Dabei werden gezielt die sichtbaren Undichtigkeiten im Schacht mit unterschiedlichsten Materialien und Verfahren bis auf Höhe des aktuellen Grundwasserstandes abgedichtet. Zum Einsatz kommen hier Materialien auf mineralischer und polymerer Basis, welche durch händisches Applizieren auf der Schachtinnenwand oder mithilfe von Packern und Pumpen in die Schachtumgebung injiziert werden. Hierbei wird zumeist die Geometrie des Bauwerks maßgeblich verändert. Durchgeführt werden diese Maßnahmen in der Regel in den Sommermonaten bei niedrigen Grundwasserständen.
3. Nach erfolgreicher Abdichtung des Schachtes wird die Schachtwandung zunächst einer intensiven *Untergrundvorbereitung* unterzogen, um einen **beschichtungsfähigen Zustand** herzustellen. Ziel dieser Vorbereitung ist einerseits die Reinigung des Untergrundes von Verschmutzungen, wie beispielsweise Fetten oder losen Anhaftungen. Zum anderen muss eine Oberfläche geschaffen werden, welche der Beschichtung eine dauerhafte Verzahnung mit dem Untergrund ermöglicht. Hierzu ist zum Beispiel bei Betonschächten das Zuschlagskorn sichtbar freizulegen, um eine größtmögliche Verbundoberfläche zu erhalten. Bei er-

- heblichen Unebenheiten, Hohlräumen oder Materialausbrüchen kann auch eine Reprofilierung erforderlich sein. Im Anschluss muss je nach Beschichtungsmaterial eine spezielle Untergrundfeuchte durch Trocknen bei polymeren Beschichtungen oder Befeuchten bei mineralischen Beschichtungen eingestellt werden.
4. Durch die *Beschichtung* und die Abschlussarbeiten wird das Bauwerk in den **frisch sanierten Zustand** überführt. Die Beschichtung kann sowohl von Hand, als auch maschinell auf die Schachtwand aufgetragen werden. Besonders wichtig ist hierbei das Zusammenwirken von Material und Verfahren. Das maschinelle Anschleudern erfordert beispielsweise andere Materialeigenschaften als das manuelle Beschichten mit Kelle und Glätter. Besondere Sorgfalt ist an den Steigeisen und den Zu- bzw. Abläufen erforderlich. Bei mineralischen Beschichtungen ist meistens eine Nachbehandlung erforderlich, um Rissbildungen zu vermeiden und optimale Haftung zu erzielen.
  5. Nachdem die aufgetragenen Materialien vollständig ausgehärtet, alle Nacharbeiten abgeschlossen und die Nachbehandlungen durchgeführt sind, kann die **Baubnahme** erfolgen. Im Rahmen dieser Abnahme wird die Beschichtung optisch untersucht, auf Hohlstellen abgeklopft und Haftzugwerte für den Verbund zum Untergrund werden ermittelt.
  6. Zum Zeitpunkt der **Gewährleistungsabnahme** nach etwa fünf Jahren haben bereits *betriebliche Kurzeinflüsse* auf die Beschichtung eingewirkt. Hierbei kann beispielsweise das Grundwasser durchaus über das Niveau der temporären Abdichtungen angestiegen sein. Auch ist es möglich, dass die Dichtwirkung der temporären Abdichtungsmaßnahmen nicht dauerhaft war. Hier muss dann die Beschichtung auch gegen das anstehende Grundwasser abdichten.
  7. Im Rahmen des Betriebes wird schließlich infolge der *betrieblichen Langzeiteinflüsse* die **Nutzungsdauer erreicht**. Der Weg dorthin wird gekennzeichnet durch mehrjährige Belastung beispielsweise durch wechselnde Grundwasserstände oder (bio-)chemische Belastungen. In regelmäßigen Abständen finden nun weitere Zustandserfassungen statt, welche letztendlich wieder in einem Sanierungs- bzw. Erneuerungsbedarf münden können.

### 3 In-situ-Maßnahmen

Im Rahmen der In-situ-Maßnahmen wurden zunächst 20 **Altbeschichtungen** mit einem Alter von etwa 3 bis 14 Jahren untersucht und zahlreichen Qualitätsprüfungen unterzogen, um die Auswirkungen mehrjähriger Betriebsbelastungen zu erfassen.

Zusammenfassend zeigten die 13 untersuchten Mörtelbeschichtungen, dass auch über einen Zeitraum von bis zu 14 Jahren zufriedenstellende Sanierungsergebnisse erzielt werden können. Bei Mörtelbeschichtungen ist eine sorgfältige Vorabdichtung erforderlich, um den Aushärteprozess durch einströmendes Grundwasser nicht zu beeinflussen. Gleichmäßige Haftung scheint wichtiger zu sein, als nur lokal hohe Haftzugfestigkeiten. Schließlich zeigte sich, dass Schäden überwiegend bereits bei der Abnahme nach 1-6 Monaten erkennbar waren. Weitere Beobachtungen dienten dann der Beurteilung der Schadensentwicklung.

Demgegenüber konnten bei fünf der sieben betrachteten polymeren Beschichtungen deutliche Verschlechterungen beobachtet werden. Insbesondere die Ausdehnung von bereits direkt nach der Beschichtung vorhandenen Hohlstellen stellt z. T. trotz lokal hoher Haftzugfestigkeiten ein großes Problem dar. Ein gleichmäßig guter Verbund scheint hier von ganz besonderer Bedeutung zu sein. Aufgrund der zeitlichen Entwicklung der Schäden ist bei polymeren Beschichtungen besonderes Augenmerk auf die Gewährleistungsabnahme zu legen.

Weitere Baustellenbegleitungen von **Abdichtungsmaßnahmen** an Schachtkörpern und Rohreinbindebereichen dienten in erster Linie dazu, Materialien und Verfahren für die anschließenden Groß- und Laborversuche auszuwählen und Eckdaten für die Randbedingungen der Großversuche zu erhalten. Im Ergebnis zeigten die Sanierungsbegleitungen deutlich, dass Abdichtungsarbeiten an Abwasserschächten einen hohen zeitlichen, personellen und materiellen Aufwand erfordern. Dabei stellt sich, auch bei z. T. hohem Schwierigkeitsgrad der Sanierungsaufgabe, der langfristige Erfolg nicht immer ein.

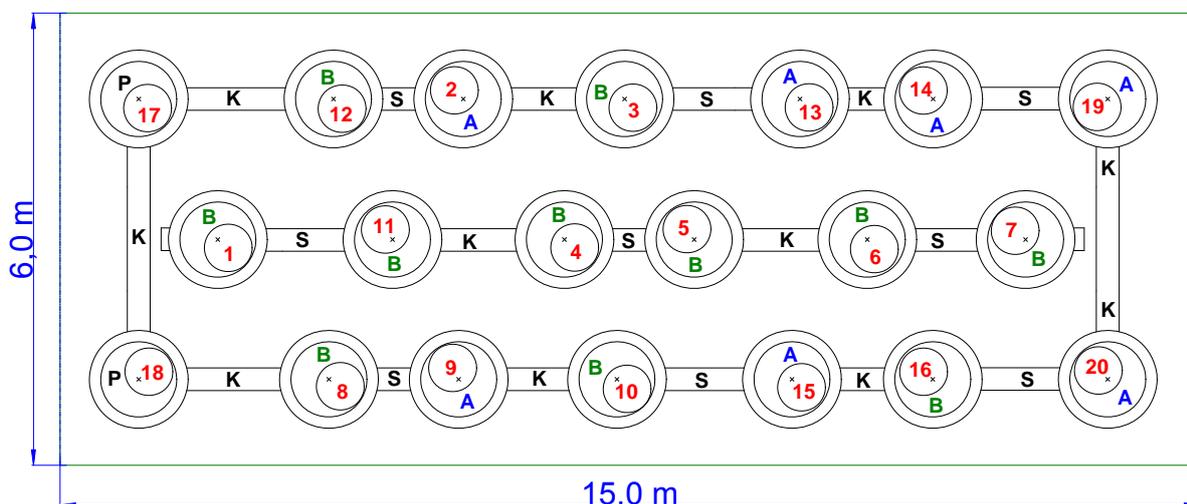
Die Begleitung von **Schachtneubaumaßnahmen** ermöglichte eine vertiefende Aufnahme von baubegleitenden Kosten sowie von Folgekosten als Basis für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Beschichtungssystemen im Vergleich zu Neubauten.

## 4 Großversuche im Maßstab 1:1

Im Großversuchsstand des IKT wurden vergleichende Untersuchungen unter definierten, für alle Sanierungsmaßnahmen gleichen Randbedingungen im Maßstab 1:1 durchgeführt. Diese Randbedingungen wurden aufgrund von Erfahrungen aus früheren Forschungsvorhaben und Qualitätssicherungsmaßnahmen sowie den In-situ-Maßnahmen (vgl. Abschnitt 3) abgeleitet und im Rahmen von Lenkungskreissitzungen mit den beteiligten Netzbetreibern abgestimmt. Hier sollte insbesondere die Leistungsfähigkeit und Robustheit der Verfahren unter identischen Randbedingungen untersucht werden. Im Vordergrund stand die Variation geometrischer und verfahrenstechnischer Kennwerte und äußerer Belastungen, wie beispielsweise die Ausbildung von Fehlstellen, die flächige Verunreinigung von Schachtwänden oder die Höhe von Grundwasserständen in Abhängigkeit der zu untersuchenden Sanierungszustände.

### 4.1 Versuchsaufbau

Im Rahmen des Projektes wurden in den Großversuchsstand insgesamt 20 Schachtbauwerke aus Betonfertigteilen in einem Kies-Sand-Gemisch mit einem Größtkorn von 8 mm eingebaut. Die Schächte besaßen einen Innendurchmesser von 1000 mm (Nennweite DN 1000) und eine Gesamtbauhöhe von etwa 5,6 m. In die Schachtterteile wurden Gerinne und Schachtfutter mit der Nennweite DN 300 eingebaut. An die eingebauten Schachtfutter wurden Steinzeug- und PVC-KG-Rohre angeschlossen. Eine Übersicht der eingebauten Schachtbauwerke ist Bild 1, der Einbau in den Großversuchsstand Bild 2 zu entnehmen.

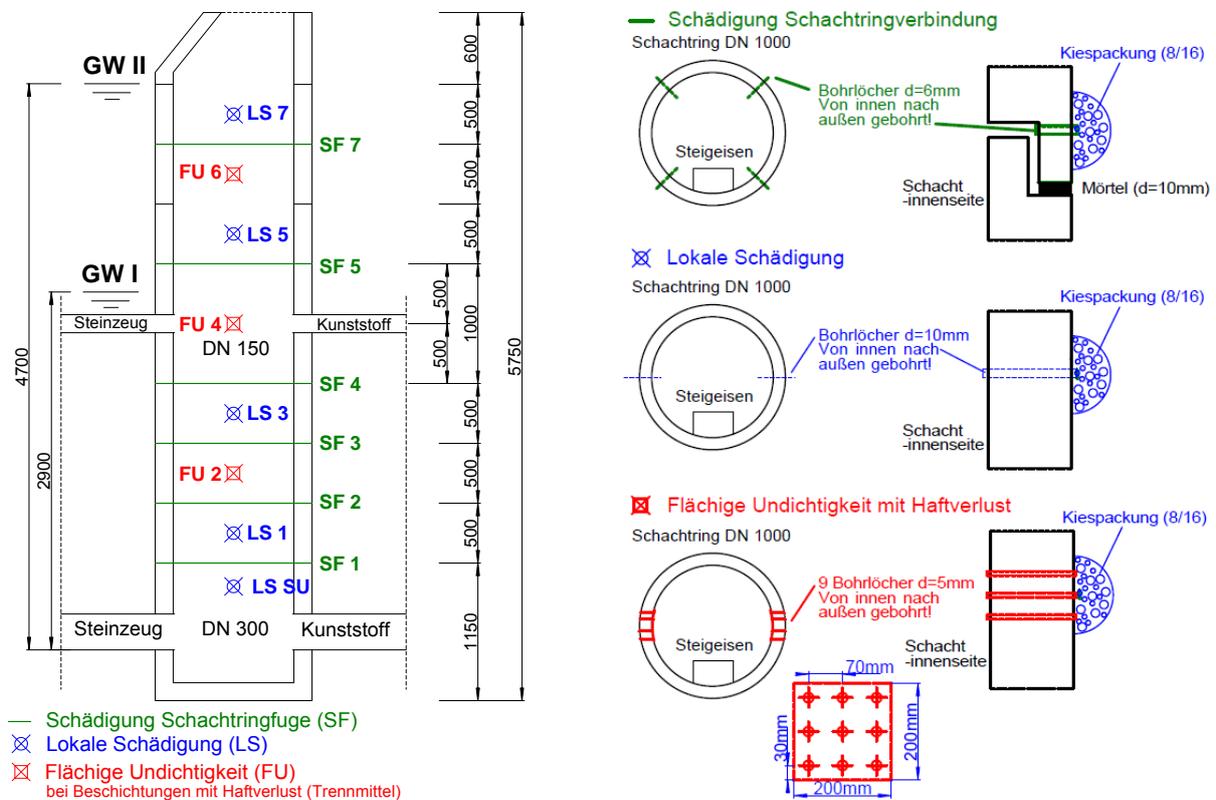


**Bild 1** Skizze des Schachtaufbaus im Großversuchsstand – Grundriss  
 A: Schacht für Abdichtungsmaßnahmen; B: Schacht für Beschichtungsmaßnahmen; P: Pumpenschacht; K: PVC-Rohrleitung; S: Steinzeug-Rohrleitung



**Bild 2** Einbau der Schächte im Großversuchsstand: Untere Rohrlage DN 300 (links); Mittlere Rohrlage DN 150 (mitte); Fertiggestellter Einbau (rechts)

Vor und während des Einbaus der Betonfertigteile wurden unterschiedliche, geometrische Schäden in die Schachtringe und -unterteile eingebaut. Diese simulierten lokale und flächige Undichtigkeiten sowie undichte Schachtringfugen. Dabei handelte es sich im Wesentlichen um Bohrlöcher in unterschiedlicher Größe und Anzahl (vgl. Bild 3). Vor den Beschichtungsmaßnahmen wurde auf die Schadstelle „Flächige Undichtigkeit“ nach der abgeschlossenen Untergrundvorbereitung ein Trennmittel zur planmäßigen Schwächung des Verbundes aufgetragen.



**Bild 3** Schäden in zur Beschichtung bestimmten Schächten: Seitenansicht des Schachtkörpers (links) und Schadensbilder (rechts)

Neben den beschriebenen geometrischen Schäden an den Schachtkörpern wurden darüber hinaus die Rohreinbindungsbereiche für den Einsatz der Abdichtungsverfahren im Vorfeld geschädigt. Hier wurden die Dichtungen in den betrachteten Rohreinbindungsbereichen partiell entfernt.

#### 4.2 Versuchsablauf

Bei den Versuchen wurde der in situ übliche Sanierungsablauf mit Abdichtung und daran anschließender Beschichtung entkoppelt, d.h. es wurden zunächst mit Fehlstellen (Undichtigkeiten) präparierte Schächte ohne Vorabdichtung und ohne anstehendes Grundwasser mit unterschiedlichen Materialien und Systemen beschichtet (vgl. Tabelle 1 und Tabelle 2) und der Wasserstand erst anschließend angehoben. Dieser Wasserdruck wirkte dann direkt auf die aufgebraute Beschichtung. Eine solche Belastung tritt in situ erst auf, wenn die Vorabdichtung des Schachtbauwerkes versagt oder das Grundwasser über die abgedichteten Bereiche hinaus ansteigt.

Tabelle 1 In den Großversuchen eingesetzte polymere Beschichtungen

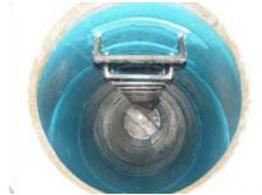
Beschichtungsmaterial (Hersteller)	Materialgruppe	Applikationstechnik	Schachtansicht
<b>Autoschicht</b> (ASAG Umwelttechnik)	Polymer-Silikat-Harz	angeschleudert	
<b>Eprocoat</b> (Trelleborg Pipe Seals)	Polyharnstoff	aufgesprüht	
<b>Oldodur WS 56</b> (BASF)	Polyurethan	aufgesprüht und angeschleudert	
<b>Polyfill</b> (I.S.T)	Polymer-Silikat-Harz	angespritzt	
<b>Ultracoat</b> (Warren Environmental)	Epoxidharz	aufgesprüht	

Tabelle 2 In den Großversuchen eingesetzte Mörtelbeschichtungen

Beschichtungsmaterial (Hersteller)	Materialgruppe	Applikationstechnik	Schachtansicht
<b>Ergelit KS 1</b> (Hermes Technologie)	kunststoffmodifizierter Zementmörtel	händisch	
<b>Ergelit KS 1</b> (Hermes Technologie)	kunststoffmodifizierter Zementmörtel	angeschleudert (KS-ASS-Verfahren)	
<b>KA 20</b> (Pagel Spezial-Beton)	kunststoffmodifizierter Zementmörtel	händisch	
<b>Kanament</b> (PCI)	kunststoffmodifizierter Zementmörtel	händisch	
<b>ombran MHP</b> (MC-Bauchemie)	kunststoffmodifizierter Zementmörtel	händisch	
<b>SD 1 -W</b> (Remmers)	Silikatmörtel	händisch und angespritzt	

Nach der Materialaushärtung der Beschichtungen wurden in weiteren Schächten unter Grundwasserzufluss unterschiedliche Verfahren und Materialien zur Abdichtung der Schachtkörper (Tabelle 3) sowie den Zu- und Abläufen (Tabelle 4) eingesetzt.

Tabelle 3 Abdichtung Schachtkörper – verwendete Materialien

Schacht Nr.	Abdichtungsmaterial	Materialgruppe	Hersteller	Applikationstechnik
19	IPA Unimörtel Rapid, IPANEX Stopfmörtel, IPANEX Flächendicht WF	Mörtel	IPA Bauchemische Produkte GmbH, Egling	Abdichtung von Hand
	Spesan WS	Polyurethanharz	Spesan Handels-GmbH, A-Linz	Injektion
15	AUTO SIL RAPID, AUTO SIL WATER	Blitzzement, Dichtschlämme auf Silikatbasis	ASAG Umwelttechnik, Neukirchen-Vluyn	Abdichtung von Hand
14	Xypex Patch´n Plug, Xypex Concentrate	schnell abbin-dender Mörtel mit Kristallbildnern, Schlämme mit Kristallbildnern	Bawax GmbH, Celle	Abdichtung von Hand
9	Carbo Stop U, Carbo Crack Seal H	Polyurethanharz	Minova Carbo Tech, GmbH, Essen	Injektion
20	cft-Harz	Polyurethanharz	Minova Carbo Tech, GmbH, Essen	Injektion
2	Carbo Ceryl Wv	Acrylatgel	Minova Carbo Tech, GmbH, Essen	Injektion
13	E 2 F	Zementleim	Pagel Spezial-Beton GmbH Co. KG, Essen	Injektion

Tabelle 4 Abdichtung Rohreinbindungen – verwendete Materialien

Schacht Nr.	Abdichtungsmaterial	Materialgruppe	Hersteller	Applikationstechnik
9, 15	Carbo Stop U, Carbo Crack Seal H	Polyurethanharz	Minova Carbo Tech GmbH, Essen	Injektion
2, 19	Carbo Ceryl Wv	Acrylatgel	Minova Carbo Tech GmbH, Essen	Injektion
20	E 1 F	Zementleim	Pagel Spezial-Beton GmbH Co. KG, Essen	Injektion

Exemplarisch ist in Bild 4 der starke Wassereindrang durch eine geschädigte Rohr-anbindung vor der Sanierung zu erkennen.



**Bild 4** Undichte Rohranbindung DN 300 mit Wassereindrang durch Schadstellen vor der Abdichtung: Absperrblase zur vorübergehenden Abdichtung (links); Starker Wassereindrang unmittelbar nach dem Entfernen der Blase (rechts)

Parallel zu diesen Abdichtungen wurden die beschichteten Schächte optisch inspiert und deren Zustand dokumentiert. Der maximale Grundwasserstand von 4,7 m über der unteren Rohrsohle wurde über einen Zeitraum von 20 Wochen gehalten. In diesem Zeitraum wurden die Abdichtungen und Beschichtungen in regelmäßigen Abständen kontrolliert, Zustandsveränderungen dokumentiert und ggf. eindringendes Wasser stichprobenhaft gemessen.

Durch das beschriebene Vorgehen konnten folgende „**Zeitraffer**“-Effekte genutzt werden, um ein mögliches Versagen der sanierten Bauteile zu beschleunigen:

- *Frühe Maximalbelastung des Bauteils:* Der maximale Grundwasserstand wurde innerhalb weniger Tage aufgebracht. In situ ist mit einem Grundwasseranstieg über mehrere Wochen oder Monate zu rechnen.
- *Frühe Beanspruchung des Sanierungsprodukts:* Da im trockenen Zustand ohne Vorabdichtung beschichtet wurde, waren die Beschichtungen nach Füllen des Versuchsstandes direkt dem anstehenden Grundwasser ausgesetzt. Der Zeitraum bis zum Ausfall einer Vorabdichtung bzw. bis zum Anstieg des Grundwassers über die Abdichtungshöhe entfiel somit.
- *Zeitliche Verdichtung der Maximalbeanspruchung:* Der maximale Grundwasserstand wurde im Versuchszeitraum über 20 Wochen aufgebracht. In situ ist in der Regel mit wechselnden Grundwasserständen zu rechnen, so dass eine vergleichbare Belastungsdauer und Beanspruchung des Sanierungsprodukts erst über längere Beobachtungszeiträume zu verzeichnen ist.
- *Dauerhafte Belastung / Kriecheffekte:* Insbesondere Kunststoffe zeigen unter dauerhafter Belastung ein bedeutsames Kriechverhalten. Während wechselnde Grundwasserstände in situ zu einer wiederholten Entlastung und Rückführung von Kriecheffekten führen, konnten im Versuch vergleichsweise kontinuierliche Belastungsszenarien mit entsprechenden Kriechbeanspruchungen verwirklicht werden.

Nach Ablauf der Beobachtungszeit wurden das Wasser aus dem Versuchsstand abgelassen und Haftzugprüfungen an den Beschichtungen durchgeführt. Nach dem Freilegen der Schachtbauteile konnten die bei den Abdichtungsmaßnahmen erzeugten Injektionskörper auch von außen inspiziert werden (Bild 5).



*Bild 5 Polyurethan-Injektionskörper an der Schachtaußenseite (links), Detailaufnahme (rechts)*

## 4.3 Versuchsergebnisse

### 4.3.1 Abdichtung von Rohreinbindungen

Die Abdichtung der Rohreinbindungen erfolgte grundsätzlich mit Injektionsverfahren. Verwendet wurden Gele, Harze und Zementleim. Unterschiede konnten lediglich bei den Maßnahmen zur Vorabdichtung beobachtet werden. Während teilweise Dichtblasen in den Rohreinbindungen platziert wurden, kam ansonsten Blitzmörtel zur Vorabdichtung zum Einsatz.

Der Arbeitsablauf bei den Injektionen war bei allen Materialien vergleichbar. Zunächst wurden Injektionspacker im Umfeld der Rohreinbindung gesetzt. Dann wurde die Vorabdichtung vorgenommen und in dessen Anschluss das Injektionsmaterial bis zur erfolgreichen Abdichtung injiziert. Diese Vorgehensweise erschien durchaus praxisnah; lediglich bei der Zementleiminjektion wurden gemäß Vorgabe der ausführenden Firma die Dichtblasen für drei Tage in der Rohreinbindung belassen. In situ müsste hier eine Dichtblase mit Durchgangsöffnung eingesetzt werden, um die Vorflut aufrechtzuerhalten. Die ausführenden Firmen waren mit den anfallenden Arbeiten vertraut und kamen auch mit den beengten Arbeitsbedingungen im Schachtbauwerk gut zurecht.

Unter Berücksichtigung der vor den Injektionen infiltrierenden Wassermengen können die Abdichtungsmaßnahmen der Rohreinbindungen als erfolgreich angesehen werden. Im Ergebnis blieben alle Rohranbindungen DN 300 dicht. An fast allen Rohreinbindungen DN 150 – egal ob Kunststoff- oder Steinzeugrohr – mussten demgegenüber Feuchtfahnen mit jedoch nicht abflussrelevanten Infiltrationen verzeichnet werden. Die Abdichtungen mit Zementleim wiesen bei den Rohreinbindungen DN 150 größere Undichtigkeiten auf.

Das schlechtere Ergebnis bei der kleineren Nennweite DN 150 ist vermutlich auf die im Vergleich zu den Einbindungen DN 300 deutlich kleineren zu injizierenden Ringräume zurückzuführen. Die Injektionspacker müssen hier in die Schachtwand gesetzt werden. Bild 6 verdeutlicht die Situation bei den unterschiedlichen Nennweiten. Während bei den Zuläufen mit kleineren Nennweiten (DN 150) einfach zylindrische Durchgänge vorlagen, fanden sich beim Anschluss der größeren Nennweite auch größere Ringräume mit abgestuften Durchgängen. Hier wäre zu hinterfragen, ob durch Erhöhung der Packer-Anzahl bei kleinerer Nennweite ggf. bessere Ergebnisse erzielt werden können.



*Bild 6 Unterschiedliche Rohreinbindungen: Kleine Ringräume bei DN 150 (links) und größere Ringräume bei DN 300 (rechts)*

#### 4.3.2 Abdichtung des Schachtkörpers

Bei der Abdichtung der Schachtkörper wurden Stopf- und Flächenmörtel für die händische Verarbeitung und Gele, Harze bzw. Zementleim zur Injektion eingesetzt. Die Vorgehensweise bei den Injektionsverfahren war vergleichbar mit der bei den Abdichtungen der Rohreinbindungen. Lediglich die gegebenenfalls erforderlichen Vorabdichtungen erfolgten hier ausschließlich mit Blitzmörtel. Für die Anwendung der Stopf- und Flächenmörtel wurde der Untergrund im Vorfeld gereinigt. Anschließend wurden die Materialien so lange händisch auf die Schadstellen aufgetragen, bis eine Dichtwirkung erzielt werden konnte. Die ausführenden Firmen waren mit den anfallenden Arbeiten vertraut und kamen auch mit den beengten Arbeitsbedingungen im Schachtbauwerk gut zurecht.

Die für die Abdichtung des Schachtkörpers eingesetzten Materialien lieferten im Laufe der Großversuche unterschiedliche Ergebnisse.

Harze und Gele zeigten im Großversuch unter mehrtägigem Außenwasserdruck eine gute Abdichtung der schadhaften Schächte. Sie eignen sich daher auch zur Vorbereitung von Beschichtungsmaßnahmen. Im Laufe der längeren Belastung mit Außenwasserdruck (ca. 5 Monate) zeigten sich jedoch bei fast allen Harzen und Gelen Feuchtefahnen.

Der Mörtel mit Kristallbildnern zeigte demgegenüber ein sehr gutes Abdichtungsergebnis. Es waren keine undichten Bereiche zu erkennen. Festgestellte dunkle Bereiche in der Abdichtung hellten sich im Laufe der Zeit etwas auf. Bei Feuchtemessungen konnten jedoch keine erhöhten Messwerte gegenüber den restlichen Bereichen festgestellt werden. Offen ist, inwieweit die Oberflächenbeschaffenheit (körnig, lose) bei diesem Material durch weitere Maßnahmen so verbessert werden kann, dass z.B. durch weitere Beschichtung mit anderen Werkstoffen eine Schutzwirkung oder Verbesserung der Tragwirkung möglich wird.

Bei den Stopf- und Flächenmörteln traten unabhängig von der Art der Fehlstelle und vom anstehenden Wasserdruck Feuchtefahnen auf. Diese müssen insbesondere bei im Anschluss aufgebrachten Beschichtungen kritisch bewertet werden. Auch wenn der Wassereindrang an diesen Feuchtefahnen nicht messbar bzw. abflusswirksam ist, so liegt doch drückendes Wasser hinter der Beschichtung, welches den Abbinde- bzw. Aushärtevorgang beeinflussen und somit auch den Haftverbund stören kann. Der Einsatz von Stopf- und Flächenmörteln empfiehlt sich demnach vorwiegend für eine Erstabdichtung gegenüber starkem Wasserzustrom, z.B. zur Vorbereitung einer weiterführenden Injektionsmaßnahme.

Deutlich besser schnitt der Silikatmörtel ab. Hier waren fast alle Fehlstellen dicht. Lediglich an den nicht vollständig verfüllten Schachtringfugen konnten Feuchtefahnen festgestellt werden.

#### **4.3.3 Untergrundvorbereitung für Beschichtungen**

Die Untergrundvorbereitung lag in der Verantwortung der ausführenden Firmen. Es gab keine diesbezüglichen Vorgaben. Demzufolge wurden hierfür sehr unterschiedliche Verfahren eingesetzt. Die Bandbreite reichte von Hochdruck-Wasserstrahlen mit Drücken von 250 bis 450 bar - zum Teil mit Zugabe von Granulat - bis hin zu reinem Feststoffstrahlen. In drei von zehn Fällen wurden maschinelle Verfahren - Reinigung mittels rotierender Düsen - eingesetzt. Diese hatten den großen Vorteil, dass sich kein Mitarbeiter im Schachtbauwerk aufhalten musste. Überwiegend wurde das Hochdruck-Wasserstrahlen mit Drücken von 300 bis 370 bar und Heißwasser ausgeführt.

Die besten Ergebnisse mit Blick auf die Rauigkeit erzielte das Feststoffstrahlen. Hier konnte das Korngerüst der Schachtbauteile freigelegt werden. Die Zugabe von Granulat beim Hochdruck-Wasserstrahlen war diesbezüglich hingegen weitgehend wirkungslos bei den vorhandenen Betonbauteilen.

Da eine Schachtseite vor der Untergrundvorbereitung mit Pflanzenfett präpariert worden war, wurden von den ausführenden Firmen teilweise Fettlöser eingesetzt. Im

Vergleich zur Vorbereitung mit Heißwasser ohne Fettlöser konnten jedoch keine Unterschiede festgestellt werden.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Untergrundvorbereitungen mit höheren Drücken (370-450 bar) im Ergebnis die besseren Beschichtungen zeigten. Im vorliegenden Fall konnten Hochdruck-Wasserstrahlen mit Heißwasser die effektivsten Ergebnisse für die hier betrachteten Oberflächen erzielen. Auch wenn das Korngerüst nicht freigelegt wurde, konnten so überwiegend ausreichende Haftzugfestigkeiten erreicht werden.

#### 4.3.4 Mörtelbeschichtungen

In den Großversuchen wurden sechs Schachtbauwerke mit Mörtelbeschichtungen versehen. Hierbei kam der Materialauftrag von Hand oder mit maschinellen Verfahren zum Einsatz. Bei den maschinellen Verfahren musste lediglich für Nacharbeiten ein Mitarbeiter der ausführenden Firma in das Schachtbauwerk einsteigen. Alle Verfahren wirkten technisch ausgereift und erzeugten eine recht gleichmäßige Beschichtung. Bei den maschinellen Verfahren war die Kreisform des Schachtbauwerkes offensichtlich von Vorteil. Größtenteils wurden die Materialien nach Herstellerangaben gemischt. Die Zugabemengen der Komponenten wurden mit einer Waage oder mit Messbechern kontrolliert. Insgesamt ist der Einfluss der ausführenden Mitarbeiter als sehr hoch einzustufen. Dies bezieht sich sowohl auf die Applikation der Beschichtung, als auch auf die notwendigen Nachbehandlungen. Der Zeitaufwand für die Beschichtung war hier im Mittel etwa doppelt so hoch wie der zeitliche Aufwand für die Untergrundvorbereitung.

Im Rahmen der Großversuche war allen Beteiligten bewusst, dass es sich um eine Demonstrationsbeschichtung handelt. Dementsprechend waren zumeist auch die Materialhersteller bei den Beschichtungsarbeiten anwesend und es wurde mit besonderer Sorgfalt gearbeitet.

Insgesamt lieferten die eingesetzten Mörtelbeschichtungen in den durchgeführten Großversuchen ein durchaus zufriedenstellendes Ergebnis. Sie zeigten zwar vielfach optische Mängel, jedoch bestand auch an Hohlstellen oder im Bereich von Rissen kaum Infiltrationsgefahr. Bei etwa der Hälfte der mineralischen Beschichtungen zeigten sich, unabhängig von der Art der Nachbehandlung, Risse und Feuchtefahnen an der Schachtwand, allerdings keine Undichtigkeiten mit messbarem Wasserzufluss. Dies galt auch für die Stellen, an denen der Verbund mit Trennmittel planmäßig geschwächt wurde (Bild 7). Das Trennmittel wurde durch das IKT an diesen Stellen vor der Beschichtung aufgetragen, um erste Hinweise zur „Robustheit“ des Sanierungssystems gegenüber unplanmäßigen Verbundschwächen zu erfassen, wie sie in der Praxis bei fehlender Untergrundvorbehandlung auftreten können.



*Bild 7 Mineralische Beschichtung im Bereich, an dem der Verbund mit Trennmittel planmäßig geschwächt wurde: Rissbildung in Verbindung mit Feuchtefahren*

Eine Beschichtung blieb über den gesamten Beobachtungszeitraum ohne offensichtliche Mängel oder Fehlstellen. Selbst der dauerhaft hohe Wasserdruck konnte keine der Beschichtungen im Bereich von Hohlstellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel zerstören. Dies wurde auf die geometrischen Verhältnisse zurückgeführt, d.h. die große Wanddicke und damit Steifigkeit sowie die stabilisierende zylindrische Form der Beschichtung. Aufgrund des hohen Elastizitätsmoduls in Verbindung mit den vorherrschenden Wanddicken kann ein Einbeulen der Beschichtung ausgeschlossen werden. Unter diesen Randbedingungen erzeugt selbst ein Wasserstand von fünf Metern über der Schadstelle lediglich Druckspannungen im Beschichtungsmörtel von etwa  $1,7 \text{ N/mm}^2$ . Dieser Wert liegt deutlich unterhalb der tatsächlichen Druckfestigkeit der Mörtel, welche in der Regel über  $20 \text{ N/mm}^2$  liegen.

Die in den Großversuchen im Maßstab 1:1 untersuchten Mörtelbeschichtungen wiesen mittlere Haftzugfestigkeiten im Bereich von  $0,5$  bis  $1,3 \text{ N/mm}^2$  auf. Bei vergleichsweise geringen Werten wurden zwar verstärkt Rissbildungen und Feuchtefahren beobachtet, jedoch mit geringen Auswirkungen auf die Dichtwirkung – selbst an Hohlstellen. Grundsätzlich ist auch bei Mörtelbeschichtungen ein vollflächiger Verbund anzustreben, da Hohlstellen Risikopotenziale bezüglich Korrosionsbeständigkeit und auch Schlagfestigkeit bergen. Eine begrenzte Anzahl kleinerer Hohlstellen im Bereich der in den Großversuchen provozierten Größe von etwa  $25 \times 25 \text{ cm}$  können jedoch in Abhängigkeit des Sanierungsziels und der vorliegenden Randbedingungen möglicherweise toleriert werden.

Die Auffälligkeiten an den Mörtelbeschichtungen entstanden kurz nach ihrer Applikation und weiteten sich dann nur noch geringfügig aus. Maßgebliche Veränderungen konnten über die Versuchszeit nicht beobachtet werden. Der Schwerpunkt der Abnahme sollte daher unter Berücksichtigung der Projektergebnisse bereits bei der eigentlichen Bauabnahme etwa drei bis sechs Monate nach dem Einbau liegen, mit detaillierter Dokumentation möglicher Auffälligkeiten. Bei Gewährleistungsabnahme sollte dann überprüft werden, ob eine weitere Ausdehnung ggf. vorhandener Hohlstellen und Risse ausgeschlossen werden kann.

An einer Beschichtung waren Fließspuren an der Beschichtungsinnenseite zu erkennen. Bei näherer Betrachtung handelte es sich jedoch nicht um eindringendes Grundwasser, sondern um Tauwasser. Somit sollte auch vor Ort die Herkunft von Wasserspuren geprüft werden, um Fehlinterpretationen vorzubeugen.

Umläufigkeiten an Steigbügeln stellen allerdings eine nennenswerte Schwachstelle mit erkennbaren Infiltrationsrisiken dar. Grundsätzlich ist zu prüfen, inwieweit Steigleisen oder Steigbügel im Zuge von Beschichtungsmaßnahmen entfernt und durch geeignete Einbauten (Leitern) ersetzt werden können.

#### 4.3.5 Polymere Beschichtungen

In den Großversuchen wurden fünf Schachtbauwerke mit polymeren Beschichtungen versehen. Hierbei wurde das Material entweder händisch aufgesprüht bzw. -gespritzt oder mit maschinellen Verfahren (Sprüh-Schleudern) aufgebracht. Bei den maschinellen Verfahren musste lediglich für Nacharbeiten ein Mitarbeiter der ausführenden Firma in das Schachtbauwerk einsteigen. Alle Verfahren wirkten technisch ausgereift und erzeugten eine recht gleichmäßige Beschichtung. Bei den maschinellen Verfahren war die Kreisform des Schachtbauwerkes offensichtlich von Vorteil.

Der Einsatz von polymeren Beschichtungsmaterialien erforderte eine aufwändige Technik. Zum einen musste der Untergrund entsprechend den Materialherstellervorgaben getrocknet werden und zum anderen waren spezielle Pumpen, Mischer und Düsen im Einsatz, um eine gleichmäßige Durchmischung der meist mehrkomponentigen Materialien zu ermöglichen. Teilweise war auch ein Vorheizen der Einzelkomponenten erforderlich.

Die Arbeiten im Schachtbauwerk waren sehr beschwerlich, da sie nur mit Atemschutz und Schutzkleidung ausgeführt werden konnten. Auch die Sicht wurde durch den z. T. nicht vermeidbaren Sprühnebel stark eingeschränkt.

Der Zeitaufwand für die Beschichtung war auch hier im Mittel etwa doppelt so hoch wie der zeitliche Aufwand für die Untergrundvorbereitung. Der Zeitbedarf für die Applikation der polymeren Beschichtungen inklusive Vorbereitungsmaßnahmen lag geringfügig unter dem der Mörtelbeschichtungen.

Im Rahmen der Großversuche war allen Beteiligten bewusst, dass es sich um eine Demonstrationsbeschichtung handelt. Dementsprechend waren zumeist auch die Materialhersteller bei den Beschichtungsarbeiten anwesend und es wurde mit besonderer Sorgfalt gearbeitet.

Insgesamt bieten polymere Beschichtungen dann ein gutes Beschichtungsergebnis, wenn die hohen Ansprüche an die eingesetzte Technik erfüllt und die aufgewendete Sorgfalt beim Einbau gewährleistet ist. In den Großversuchen lieferten sie bei einwandfreier Untergrundbeschaffenheit und sorgfältiger Ausführung gute Ergebnisse. Es traten lediglich bei einigen Produkten punktuelle Schäden auf, z.B. sog. Pinholes. Hierbei handelt es sich um stecknadelkopfgroße Inhomogenitäten in der Beschichtung, welche unter ungünstigen Randbedingungen auch zu Undichtigkeiten führen können. An zwei Beschichtungen lag eine Undichtigkeit an einer Steigbügleinbindung vor.

Der dauerhaft hohe Wasserdruck bewirkte jedoch in den Bereichen, an denen der Verbund mit Trennmittel planmäßig geschwächt wurde, zum Teil fortschreitende Blasenbildungen mit Materialablösungen (vgl. Bild 8, links) bzw. ein Aufreißen der Beschichtung (Bild 8, rechts). Hier wirkt sich vermutlich die geringe Eigensteifigkeit einiger polymerer Beschichtungssysteme negativ aus.

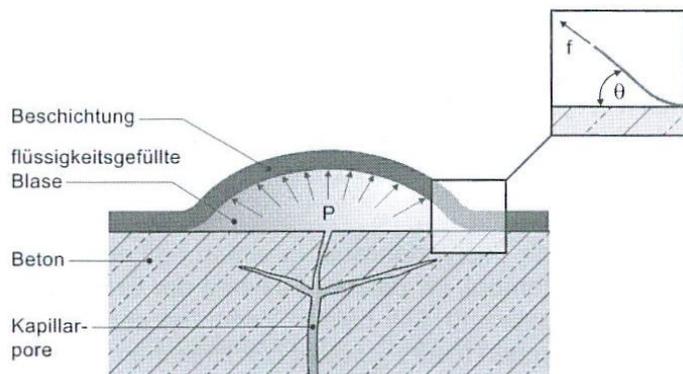
Die Haftzugfestigkeiten der Beschichtungen lagen im Mittel bei  $2,16 \text{ N/mm}^2$ . Selbst hohe Haftzugfestigkeiten in Nachbarbereichen von Stellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel konnten allerdings ein Ablösen der Beschichtung nicht unbedingt verhindern. Demgegenüber konnten die planmäßig eingebauten lokalen Schadstellen auch von den polymeren Beschichtungen problemlos überbrückt werden. Offensichtlich spielt die Hohlstellengröße eine wesentliche Rolle.



*Bild 8 Polymere Beschichtungen in Bereichen, an denen der Verbund mit Trennmittel planmäßig geschwächt wurde: Blasenbildung mit fortschreitender Ablösung (links) und Aufreißen der Beschichtung (rechts)*

Nachfolgend wird die Belastung einer polymeren Beschichtung im Bereich einer Hohlstelle bei anstehendem Außenwasserdruck näher betrachtet. Aufgrund des niedrigen Elastizitätsmoduls in Verbindung mit den ebenfalls vergleichsweise geringen Wanddicken ist ein Einbeulen und anschließendes Ablösen der Beschichtung sehr wahrscheinlich.

Bild 9 zeigt den Belastungszustand einer wassergefüllten Blase in der Ebene nach [4]. Im Randbereich dieser Blase treten Schälspannungen auf, deren Größe offensichtlich von der Größe der Blase abhängt. Weiteren Einfluss auf diese Spannungen hat jedoch auch deren Verteilung im Ablösebereich, welche wesentlich von den Verbundeigenschaften und den Materialkennwerten der Beschichtung abhängt. Aufgrund der Vielfalt der material- und haftungsbezogenen Einflussparameter wird hier lediglich ein möglicher Berechnungsweg aufgezeigt und exemplarisch verfolgt.



**Bild 9** Schematische Darstellung der Schälspannung am Rand einer Blase in einer Beschichtung auf Beton [4]

In [4] wurden für eine 2 mm dicke Kunststoffbeschichtung Berechnungen durchgeführt, um die Bedingungen am Rand einer Blase näher zu spezifizieren. In diesem Beispiel fiel die Spannung vom Maximalwert über einen Bereich von etwa 1,5 mm auf Null ab. Dieser Wert und die qualitative Verteilung der Spannung im Randbereich sind von zahlreichen Faktoren und Materialeigenschaften abhängig.

Zur Verdeutlichung wesentlicher Zusammenhänge wird hier exemplarisch für die nun folgenden Betrachtungen eine dreiecksförmige Spannungsverteilung bei einer Ausdehnung des Randbereiches von 2 mm angenommen. Des Weiteren wird eine Blase mit einem Durchmesser von 200 mm gewählt, welche beispielsweise durch unzureichende Untergrundvorbereitung entstanden sein könnte. Der Wasserstand wird zwischen 1 und 5 Metern variiert. Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnungen.

**Tabelle 5** Maximale Randspannung in Abhängigkeit vom Wasserdruck

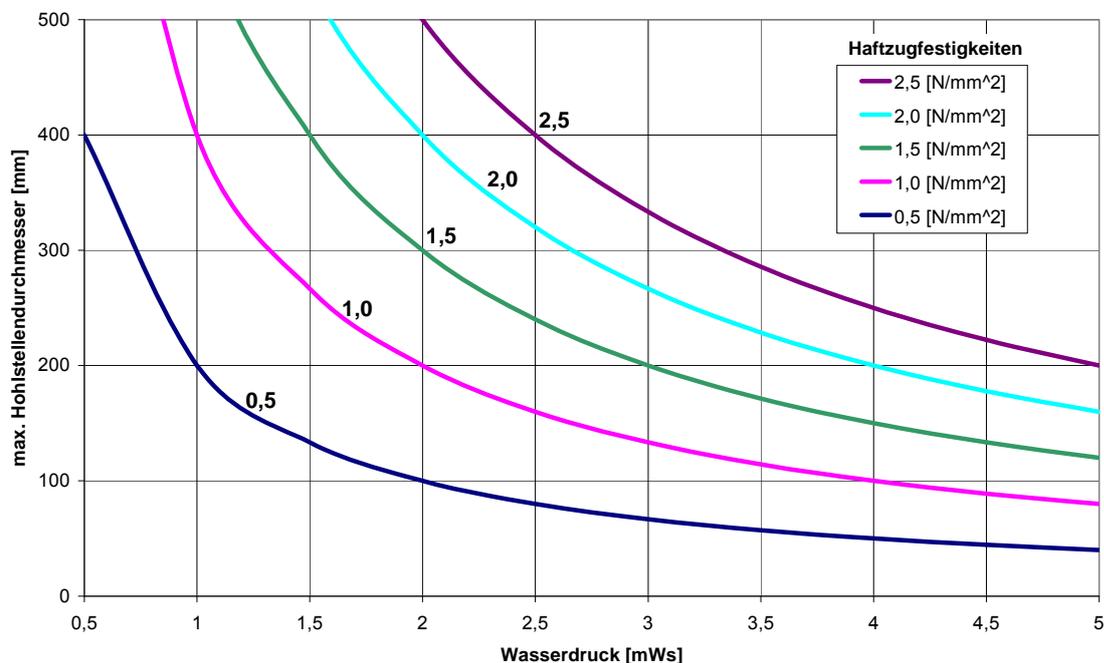
Blasengeometrie			Wasserdruck		resultierende Ablösekraft [N/mm]	Ablösebereich [mm]	maximale Randspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
Durchmesser [mm]	Fläche [mm <sup>2</sup> ]	Umfang [mm]	[mWs]	[N/mm <sup>2</sup> ]			
200	31400	628	1	0,01	0,50	2	0,5
			2	0,02	1,00	2	1
			3	0,03	1,50	2	1,5
			4	0,04	2,00	2	2
			5	0,05	2,50	2	2,5

Deutlich ist die Zunahme der maximalen Randspannung bei Anstieg des Grundwasserstandes zu erkennen. Folgende Risiken bestehen nun im Bereich der wassergefüllten Blase bei steigendem Wasserdruck:

- **Überschreiten der vorhandenen Haftzugfestigkeit:**  
Ab einem bestimmten Wasserstand kann die tatsächlich vorhandene Haftzugfestigkeit im Randbereich der Blase überschritten werden. Dies hat wiederum eine Kettenreaktion zur Folge, da durch die Vergrößerung der Blase auch die maximalen Randspannungen ansteigen (vgl. Bild 8, links). Darüber hinaus verliert das System in Kreisringrichtung an Stabilität (Durchschlagproblem).

- Überschreiten der Materialzugfestigkeit:  
Sofern die vorhandenen Haftzugfestigkeiten ausreichen, die maximalen Randspannungen zu übertragen, so kann es im Beschichtungsmaterial selbst zu einem Versagen infolge des Überschreitens der Zugfestigkeit kommen.
- Zeitabhängiges Versagen infolge Dauerbelastung:  
Die vorgenannten Effekte können sich bei polymeren Beschichtungen überlagern und zudem aufgrund des viskoelastischen Verhaltens der eingesetzten Werkstoffe auch zeitverzögert eintreten. Beispielsweise löste sich in den Großversuchen eine Beschichtung erst nach mehrwöchiger Außenwasserdruckbelastung ausgehend von der vorhandenen Hohlstelle weiter ab, um dann schließlich bei Überschreiten der Zugfestigkeit einzureißen (vgl. Bild 8, rechts).

Für den Fall des Überschreitens der vorhandenen Haftzugfestigkeit lassen sich weiterführende Berechnungen unter den oben genannten Annahmen durchführen. Ziel dieser Berechnungen war die Ermittlung des qualitativen Verlaufs des maximalen Hohlstellendurchmessers in Abhängigkeit des Wasserdruckes unter Berücksichtigung der vorhandenen Haftzugfestigkeit. Im Ergebnis konnten exemplarisch mithilfe einer Grenzwertbetrachtung zulässige Hohlstellendurchmesser ermittelt werden (vgl. Bild 10). Wenn die zugehörigen Parameter, wie z. B. Materialkennwerte, Ablöseigenschaften und geometrische Eckdaten bekannt sind, könnte die Bewertung von vorhandenen Hohlstellen anhand solcher materialabhängiger Diagramme deutlich vereinfacht werden.



**Bild 10** *Beispiel: Entwicklung des maximalen Hohlstellendurchmessers in Abhängigkeit des Wasserdruckes unter Berücksichtigung der vorhandenen Haftzugfestigkeit; Voraussetzung/Annahme: Ablösebereich 2 mm, dreiecksförmige Schälspannung, kein Stabilitätsversagen*

Die hier angestellten Überlegungen verdeutlichen die Notwendigkeit einer differenzierten Betrachtung von Hohlstellen bei polymeren Beschichtungen unter einer Belastung durch Außenwasserdruck.

Grundsätzlich ist aufgrund der zeitabhängigen Belastungen und Materialeigenschaften eine verstärkte Untersuchung dieser Beschichtungen im Zuge der Gewährleistungsabnahme zu empfehlen. Auch ist ein vollflächiger Verbund mindestens ebenso wichtig wie hohe Haftzugwerte. Auch Werte von mehr als  $1,5 \text{ N/mm}^2$  schützen nicht vor einer Ausweitung bereits vorhandener Blasen bzw. Ablösungen. Bei vollflächigem Verbund hingegen wurden in den Großversuchen keine Schäden beobachtet.

## 5 Spezielle Fragestellungen

Ergänzend zu den In-situ-Maßnahmen und Großversuchen wurden auch die folgenden speziellen Fragestellungen untersucht.

### Wasserzugabe bei mineralischen Beschichtungen

Auf Baustellen kann man häufig beobachten, dass das Mischungsverhältnis von Mörtel und Wasser nicht immer den Herstellervorgaben entspricht. Daher wurde an Mörtelbeschichtungen die „Robustheit“ der Materialien gegenüber unterschiedlich eingestellten Wasser-Feststoffwerten mittels Haftzugfestigkeitsprüfungen untersucht.

Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass die Haftzugfestigkeiten von Beschichtungsmörteln durch den W/F-Wert beeinflusst werden. Dabei sind die Auswirkungen der Wasserzugabemenge auf die Haftzugfestigkeit je nach Mörtel unterschiedlich. Die drei Beschichtungsmörtel dieser Versuchsreihe erreichten für einen W/F-Wert im Bereich der technischen Merkblätter alle die in [9] geforderten Haftzugfestigkeiten. Ein überhöhter W/F-Wert und die damit verbundene weiche Mörtelkonsistenz führte beispielsweise bei Mörtel A zu einem Abfall der Haftzugfestigkeit (vgl. Bild 11).

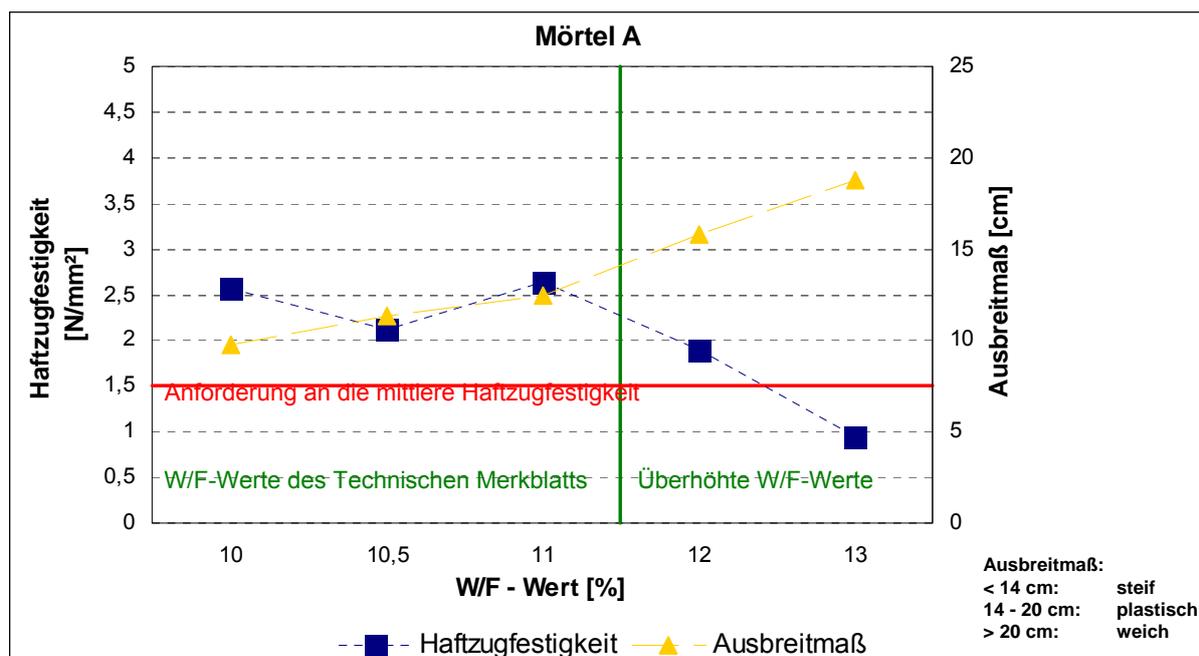


Bild 11 Mörtel A: Mittelwerte der Haftzugfestigkeit und Ausbreitmaße in Abhängigkeit zum W/F-Wert

### Hohlstellen bei mineralischen Beschichtungen

Weitgehend unerforscht waren die Auswirkungen von Hohlstellen bei mineralischen Beschichtungen in Abwasserschächten bezüglich Rissbildung und Dichtheit. Daher wurden Untersuchungen an planmäßig eingebauten Hohlstellen unter Wasseraußendruck durchgeführt. Beispielfhaft ist ein zur Prüfung vorbereiteter Probekörper im Bild 12 dargestellt.



Bild 12 Fertiggestellter Probekörper: Innenseite (links) und Außenseite mit Schlauchanschlüssen zur Wasserdruckbelastung (rechts)

Die Untersuchungsergebnisse belegen, dass Hohlstellen aufgrund der Rissbildung im Beschichtungsmörtel und der damit verbundenen Gefährdung der Wasserdichtheit des Abwasserschachtes kritisch zu bewerten sind. Sie verdeutlichen, dass feine Risse im Beschichtungsmörtel teilweise erst durch die Reinigung sowie das Nässen und Trocknen der Beschichtung erkennbar werden. Deshalb sollten Inspektionen von Mörtelbeschichtungen diese Maßnahmen zur Risserkennung beinhalten. Offen blieb hier, inwiefern ein konstant anstehender Wasserdruck auf eine derartige Hohlstelle in Verbindung mit einer Beschichtung des gesamten Schachtringes in Umfangsrichtung das Infiltrationsverhalten beeinflussen kann. Hierzu dienten die im Abschnitt 4 beschriebenen Großversuche. Dort zeigte sich, dass die zu erwartenden Feuchteffekten nicht abflusswirksam waren.

### Nachbehandlungsmittel bei mineralischen Beschichtungen

Mit Blick auf die Mörtelhydratation wurden verschiedene Nachbehandlungsmittel und -methoden in einer Klimakammer auf ihre Wirksamkeit hin untersucht. Die beschichteten Betongrundkörper wurden alle in gleicher Weise hergestellt und im gleichen Klima bei 18° Celsius und 55 % relativer Luftfeuchte für die Dauer von 28 Tagen gelagert [5]. Diese klimatischen Randbedingungen sind anhand von Ergebnissen aus Langzeitmessungen in [2] in der Klimakammer eingestellt worden.

Die Untersuchungen an den unterschiedlich nachbehandelten Beschichtungsproben zeigten mit Blick auf die ermittelten Haftzugfestigkeiten keine nennenswerten Unterschiede. Alle Prüfungen erfüllten die vergleichsweise hohen Anforderungen von im Mittel 1,5 N/mm<sup>2</sup> mit kleinstem Einzelwert von 1,0 N/mm<sup>2</sup> gemäß [9]. Dabei ist es unter den gegebenen Versuchsrandbedingungen offensichtlich unerheblich, ob keine Nachbehandlung erfolgte, der Mörtel feucht gehalten wurde oder Nachbehandlungsmittel eingesetzt worden sind.

Im Gegensatz dazu war das optische Erscheinungsbild der Beschichtungen vergleichsweise uneinheitlich. Bei Feuchthalten der beschichteten Probekörper entstanden unter den vorherrschenden, klimatischen Randbedingungen keine Risse in der Beschichtung. Dem gegenüber konnten die verwendeten Nachbehandlungsmittel eine Rissbildung in den Beschichtungen der Probekörper nicht verhindern. Ein vergleichbares Rissbild konnte auch an den nicht nachbehandelten Probekörpern fest-

gestellt werden. Erste Risse von etwa 0,1 mm Breite waren in den Beschichtungen bereits nach einer Woche in der Klimakammer erkennbar (vgl. Tabelle 6).

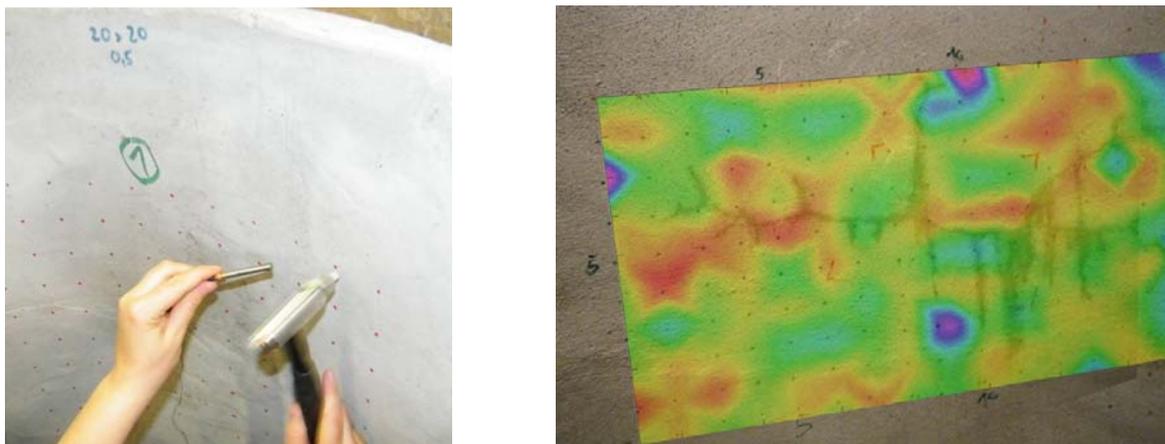
Tabelle 6 Haftzugfestigkeiten und maximale Rissbreiten von Mörtelbeschichtungen in Abhängigkeit der Nachbehandlung

Probekörper		Prüfergebnisse			
		Haftzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]			max. Rissbreiten [mm]
Serie	Nachbehandlung	Mittelwert	min. Wert	max. Wert	
I	keine	1,7	1,1	2,3	0,35
II	feuchthalten	1,7	1,0	2,6	keine Risse
III	Mittel A	2,1	1,4	2,8	0,20
IV	Mittel B	1,7	1,3	2,0	0,40
V	Mittel C	2,0	1,6	2,5	0,45

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen erwies sich das Feuchthalten der Beschichtung als einzig zielführende Maßnahme, um Risse in der Beschichtung zu vermeiden. Es ist jedoch denkbar, dass andere Beschichtungsmörtel - auch unter von diesem Versuch abweichenden klimatischen Randbedingungen - mit den hier verwendeten Nachbehandlungsmitteln ein rissfreies Erscheinungsbild gezeigt hätten. Hier wären ggf. weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Materialien durchzuführen, um schließlich in Abhängigkeit von verwendetem Beschichtungsmörtel und vorherrschendem Schachtklima eine geeignete Nachbehandlung auszuwählen und somit ein optimales Beschichtungsergebnis sicherstellen zu können.

### Hohlstellenortung an Mörtelbeschichtungen

Die Ortung von Hohlstellen an Beschichtungen in Abwasserschächten erfordert derzeit viel Erfahrung und buchstäglich Fingerspitzengefühl. Alternativ wurde im Rahmen des Projektes untersucht, ob Größe und Ausdehnung von Hohlstellen auch mit zerstörungsfreien Prüfungen wie der lokalen Resonanzspektroskopie ermittelt werden können (Bild 13).



**Bild 13** Durchführung der lokalen Resonanzspektroskopie an einer Messstelle (links) und Ergebnis einer Prüfung im Großversuchsstand (rechts) [6]

Mit Hilfe der lokalen Resonanzspektroskopie wurden sechs Messfelder in Schachtringen geprüft. Diese Messfelder wurden über Bereiche von Mörtelbeschichtungen gelegt, die planmäßig eingebaute Hohlstellen beinhalteten. Diese waren deutlich hörbar und die Änderung im Klang mittels der Auswertung der Spektren der Klangsignale signifikant. An vier der sechs Messfelder - Beschichtungen mit einer Dicke von 5 und 10 mm - konnten Lage und Ausdehnung der Hohlstellen einwandfrei bestimmt werden. Die beiden anderen Hohlstellen fanden sich unter einer 15 mm dicken Mörtelbeschichtung. Die Ergebnisse waren hier nicht mehr eindeutig. Hier war offensichtlich die Anwendungsgrenze der lokalen Resonanzspektroskopie erreicht.

Ein weiteres Messfeld wurde in einem im Großversuchsstand eingebauten Schacht bei anstehendem Grundwasser geprüft. Da Feuchtigkeit bereits durch Risse in der Beschichtung eindrang, war die eingebrachte Hohlstelle vermutlich mit Wasser gefüllt. Die gefüllte Hohlstelle hat für die lokale Resonanzspektroskopie ähnliche Eigenschaften wie die kompakte Mörtelbeschichtung. Deshalb war eine Aussage über eine Hohlstelle schwieriger. Durch die Auswahl eines geeigneten Frequenzfensters konnten die Hohlstelle und ihre Ausdehnung dennoch erkannt werden. Die lokale Resonanzspektroskopie eignet sich somit, um Schachtringe im unverbauten Zustand auf Hohlstellen zu prüfen. Dies ist jedoch für den Einsatz in der Praxis wenig relevant. Im verbauten Zustand ist die Interpretation der Daten sehr viel schwieriger, insbesondere wenn die Hohlstellen statt mit Luft mit Wasser gefüllt sind. Allerdings entstehen bei Vorhandensein von Hohlstellen charakteristische Risse in der Mörtelbeschichtung. In der Umgebung dieser Risse ist es möglich, durch Wahl eines geeigneten Frequenzbandes, die ungefähre Ausdehnung einer Hohlstelle zu bestimmen. Abschließend bleibt festzuhalten, dass der Nutzen dieser Untersuchungen nicht im Verhältnis zu den doch recht hohen Kosten steht. Gerade dort, wo die klassische Abklopfmethode an ihre Grenzen kommt, sind bei der lokalen Resonanzspektroskopie keine weitergehenden, praxisrelevanten Ergebnisse zu erwarten, die den Aufwand für derartige Messungen rechtfertigen.

### Betriebsbelastung an sanierten Rohranbindungen

Sanierte Rohreinbindungen können nachträglichen Verformungen und besonderen Betriebsbelastungen ausgesetzt sein. Geprüft wurden hier die Auswirkungen von Abwinkelungen und Kanalreinigungsmaßnahmen auf die Dichtheit der sanierten Rohranbindung. Bild 14 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau und exemplarisch die Durchführung einer Abwinkelungsprüfung.



*Bild 14 Versuchsaufbau für die einzelnen Sanierungen vor Bodenverfüllung (links); Versuchsaufbau für die Abwinkelung (rechts)*

Alle Sanierungen, bei denen lediglich ein Reparaturmaterial in den Ringraum zwischen Schachtwand und Rohrspiegel eingebracht wurde, waren undicht. Somit kann durch eine Ringraumverfüllung allenfalls eine geringfügige, hydraulische Verbesserung des Abflusses erzielt werden.

Das eingesetzte Handlaminat zeigte direkt nach dem Einbau die gewünschte Dichtwirkung. Jedoch reichte der erzielte Verbund zum Altrrohr offensichtlich nicht aus, Hochdruckreinigungen schadlos zu überstehen. Nach der (Kanal)Reinigung traten bei dem hier eingebauten Handlaminat Undichtigkeiten auf.

Die eingesetzten Kurzliner konnten die Aufgabe der Abdichtung auch nach der aufgetragenen Hochdruckreinigung (Kanalreinigung) erfüllen. Auch die Abdichtung zu den vorhandenen Inlinern war erfolgreich. Die Abwinkelbarkeit der Rohranbindung wurde durch diese Maßnahme allerdings erkennbar eingeschränkt, wobei die aufnehmbaren Kräfte jedoch vergleichsweise hoch waren.

Bei den Injektionen zeigte sich, dass der Abdichtungserfolg ohne anstehendes und somit eindringendes Grundwasser nur schwer sicherzustellen ist. Von sechs durchgeführten Injektionen waren drei bei der ersten Dichtheitsprüfung undicht. Bei der Injektion mit Gelen zeigte sich darüber hinaus, dass Hochdruckstrahlen infolge von Reinigungsmaßnahmen die Dichtwirkung in Abhängigkeit der vorliegenden Randbedingungen zerstören können. Sofern bei einer Injektion mit Harzen die Dichtwirkung

anfangs erreicht wurde, so widerstanden diese Stellen auch den Hochdruckreinigungen. Zudem war die Abwinkelbarkeit in den Rohreinbindungen weiterhin gegeben.

Mit Blick auf die Versuchsergebnisse bleibt also festzuhalten, dass die Sanierung undichter Rohranbindungen ohne drückendes Grundwasser insbesondere mittels Einbau von Kurzlinern, aber auch durch Injektion von Polyurethanharzen, erfolgreich war. Somit kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass diese Verfahren für eine derartige Sanierung geeignet sind. Jedoch müssen die vorherrschenden Randbedingungen berücksichtigt werden. Wenn z.B. noch ein unterschiedliches Setzungsverhalten von Schacht und angeschlossenen Haltungen zu erwarten ist, scheint die Sanierung mittels Injektionsmaterialien auf Polyurethanbasis u. U. zielführender zu sein als die „Versteifung“ des Rohranschlusses mittels Kurzlinern.

## 6 Planungshinweise und Empfehlungen

### 6.1 Qualitätssicherung Schachtbeschichtung

#### 6.1.1 Anwendungsbereich

Die hier vorliegenden Planungshinweise und Empfehlungen beziehen sich auf Qualitätssicherungsmaßnahmen in Laufe einer Schachtbeschichtungsmaßnahme von der Zustandserfassung über die Planung bis zur Abnahme. Die Ausbildung der Schachtsohle einschließlich Gerinne ist nicht Gegenstand dieser Betrachtung. Wesentlich ist bereits im Planungsstadium die Definition von Sanierungszielen und im Rahmen der Ausführung die Festlegung von begleitenden Prüfungen und abschließenden Kontrollen inklusive einer geeigneten Dokumentation. Hierbei wird zwischen der Sanierungsplanung, der Untergrundvorbereitung, der Beschichtungsmaßnahme und den Kontrollen zur Abnahme der Sanierung unterschieden. Grundsätzlich sollte schon im Vorfeld der Beschichtungsmaßnahme festgelegt werden, wer für die Abnahme der Tätigkeiten in den jeweiligen Phasen verantwortlich ist.

#### 6.1.2 Sanierungsplanung

Die Sanierungsplanung umfasst die Zustandserfassung, die Definition der Sanierungsziele und die Festlegung von Qualitätsanforderungen an die aufgebrachte Beschichtung mit Terminvorgaben für Beschichtung und Bau- bzw. Gewährleistungsabnahme.

#### Zustandserfassung

Die Zustandserfassung sollte nach dem Kodiersystem der DIN EN 13508-2 [7] in Verbindung mit dem DWA M 149-2 [8] erfolgen. Erforderlichenfalls kann im Sinne einer höheren Verständlichkeit auch der Auftraggeber Kurzbezeichnungen zur Zustandsbeschreibung vorgeben. Zur Dokumentation der Schäden sollte das Sanierungsprotokoll genutzt werden.

#### Sanierungsziele

Die Sanierungsziele dominieren die Verfahrensauswahl. Hier ist zu entscheiden, inwieweit durch die Sanierungsmaßnahme ein Beitrag geleistet werden soll zur Tragwirkung, zur Schutzwirkung sowie zur Dichtwirkung über die angestrebte Nutzungsdauer.

Zur Wiederherstellung der Tragwirkung muss das Material geeignet sein, einen fortgeschrittenen Substanzverlust auszugleichen. Hohe Haftzugfestigkeiten zum Untergrund zeigen z. B. bei Mörtel, inwieweit neues und altes Material als gemeinsames Tragsystem angesehen werden können. Eine Schutzwirkung des Materials kann als Korrosionsschutz gegenüber dem im Kanalsystem transportierten Medium gefordert sein, so dass dann die Materialbeständigkeit hieran zu messen ist. Hinsichtlich der Dichtwirkung ist die Wirkung der Gesamtkonstruktion gegenüber Innendruck bzw. äußerem Grundwasserdruck zu unterscheiden. Mit Blick auf die Dauerhaftigkeit stellt sich insbesondere die Frage nach der Beständigkeit der vorgenannten Trag-/Schutz- und Dichtwirkung unter mechanischen und biologisch-chemischen Angriffen.

Damit wird deutlich, dass das Sanierungsziel und das konkrete Anforderungsprofil für jede Beschichtungsmaßnahme gesondert festzulegen ist, und dies die Verfahrensauswahl maßgeblich beeinflussen kann. So bietet sich für den Ausgleich von Substanzverlusten unter drückendem Grundwasser ohne weitere Korrosionsgefahr der Einsatz mineralischer Beschichtungen an. Polymere Beschichtungen zeigen ihre Stärken z.B. bei aggressiven Medien und hohen Anforderungen an die Dichtwirkung unter Innendruck. Folglich kann auch eine Kombination von mineralischen und polymeren Beschichtungen im Einzelfall eine technisch sinnvolle Lösung darstellen.

### **Qualitätsanforderungen**

Auf Basis der gewählten Sanierungsziele können Qualitätsanforderungen unter Berücksichtigung folgender Aspekte formuliert werden:

#### Beschichtungsmaterial:

Mit Blick auf die Sanierungsziele ist festzulegen, ob eine Mörtel-, eine Kunststoffbeschichtung oder eine Kombination eingesetzt werden soll.

#### Termine:

Die Termine für die Bauausführung und für die Bauabnahmen orientieren sich an den vorherrschenden und über das Jahr variierenden Grundwasserständen. Hierbei sollten die Abdichtungs- und Beschichtungsmaßnahmen bei niedrigen und die Bauabnahmen bei hohen Grundwasserständen durchgeführt werden.

#### Abnahmeschwerpunkt:

Je nach Beschichtungsmaterial muss festgelegt werden, welche Prüfungen und Untersuchungen bei Bau- bzw. Gewährleistungsabnahme durchgeführt werden sollen. Bezugnehmend auf die Projektergebnisse ist bei Mörtelbeschichtungen der Schwerpunkt auf die Bauabnahme zu legen, welche zeitnah nach Fertigstellung erfolgen kann. Bei polymeren Beschichtungen sollte hingegen aufgrund des zeitlich verzögerten Auftretens von Schäden die Gewährleistungsabnahme nach etwa fünf Jahren intensiv genutzt werden.

#### Maximale Hohlstellengröße:

Bezugnehmend auf die definierten Sanierungsziele und die zu erwartenden Grundwasserstände sind maximale Hohlstellengrößen festzulegen. Bei Mörtelbeschichtungen konnten im Versuch Hohlstellen mit einer Größe von etwa 25 x 25 cm auch bei anstehendem Grundwasser in der Regel als unkritisch angesehen werden. Bei hohen Grundwasserständen sind diese Hohlstellengrößen bei polymeren Beschichtungen aufgrund der Gefahr von Blasenbildungen mit daraus resultierenden Ablösungen bereits als problematisch anzusehen.

#### Risse in Mörtelbeschichtungen:

Risse in Mörtelbeschichtungen bis zu einer Breite von 0,5 mm zeigten im Forschungsprojekt bei anstehendem Grundwasser keine abflusswirksamen Infiltrationen. Daher ist im Vorfeld festzulegen, ob und in welchem Maße bei der jeweiligen Baumaßnahme Risse in den Beschichtungen toleriert werden können.

#### Haftzugfestigkeit:

In [9] und [10] sind Mindestwerte für die Haftzugfestigkeiten von Beschichtungen festgelegt. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes zeigten jedoch, dass die Bedeu-

tion der Haftzugfestigkeit für polymere und mineralische Beschichtungen unterschiedlich zu bewerten ist. Materialsteifigkeit, Hohlstellengröße, Grundwasserstand und Haftzugfestigkeit wirken stets gemeinsam.

Insbesondere für polymere Beschichtungen ist ein vollflächiger Verbund mindestens ebenso wichtig, wie der (stichprobenhafte) Nachweis hoher Haftzugfestigkeitswerte. Nur so lassen sich fortschreitende Ablöseerscheinungen und Blasenbildung unter Außenwasserdruck sicher vermeiden.

Mörtelbeschichtungen zeigten im Versuch demgegenüber auch bei geringeren Haftzugwerten und größeren Hohlstellen kaum Zustandsänderungen unter Außenwasserdruck.

#### Erforderliche Prüfungen:

Bereits in der Planungsphase kann festgelegt werden, welche Prüfungen im Rahmen der Baumaßnahme durchgeführt werden sollen. Hierbei kann auf die Übersicht im Abschnitt 6.1.6 zurückgegriffen werden. Bereits bei der Sanierungsplanung kann der vorgesehene Prüfumfang im Sanierungsprotokoll festgehalten werden.

### **6.1.3 Untergrundvorbereitung**

Im Rahmen der Untergrundvorbereitung muss die Tragfähigkeit des Untergrundes, die vorübergehende Dichtheit, die Ebenheit und die Verbundfähigkeit des Untergrundes hergestellt werden.

#### **Tragfähigkeit des Untergrundes**

Zur Wiederherstellung der Tragfähigkeit des Untergrundes ist zunächst das nichttragfähige oder korrosionsgeschädigte Material abzutragen. Gegebenenfalls muss die Resttragfähigkeit des Schachtbauwerkes beurteilt werden. Der Einsatz von Beschichtungsverfahren setzt i.d.R. einen sauberen und vollflächig tragfähigen Untergrund voraus. Die notwendigen Vorbereitungsmaßnahmen hängen dann vorwiegend vom Zustand des Schachtbauwerkes ab und erst in zweiter Linie von dem einzusetzenden Beschichtungsverfahren. So sind Schmutzstoffe stets zu entfernen, z.B. mit Heißwasser-Hochdruckstrahlen (Fettentfernung, lose Partikel). Bei Korrosion ist der vorgeschädigte Untergrund unbedingt abzutragen, z.B. mit Feststoff- oder Höchstdruckstrahlen (Aufrauen des Gefüges, Freilegen des Korngerüsts). Nach der Untergrundvorbereitung können Abreißprüfungen durchgeführt werden, um maximal mögliche Haftzugfestigkeiten abzuschätzen. Mögliche Prüfungen mit Bezug zur Tragfähigkeit des Untergrundes sind Abschnitt 6.1.6 zu entnehmen.

#### **Dichtheit**

Für die Durchführung einer Beschichtungsmaßnahme ist das Schachtbauwerk unabhängig vom vorgesehenen Beschichtungsmaterial bei anstehendem Grundwasser temporär abzudichten. Die bei Abdichtungsmaßnahmen eingesetzten Werkstoffe müssen dann an den Kontaktflächen zum Untergrund und ggf. zur Beschichtung ebenfalls einen sicheren Verbund eingehen. Derartige Maßnahmen sind daher im Sanierungsprotokoll zu vermerken. So kann an diesen Stellen bei der Abnahme genauer auf Hohlstellen und Undichtigkeiten, z.B. Risse, geachtet werden.

## **Ebenheit**

Insbesondere maschinell aufgetragene Beschichtungen fordern einen weitgehend ebenen Untergrund. Hier sind dann Reprofilierungen erforderlich. Da auch hier zu meist vom Beschichtungsmaterial abweichende Materialien verwendet werden, sind die Stellen der Reprofilierung im Sanierungsprotokoll (vgl. Abschnitt 6.1.7) zu vermerken.

### **6.1.4 Beschichtung**

Die Qualitätsanforderungen und wesentliche Terminvorgaben werden bereits bei der Sanierungsplanung festgelegt (vgl. Abschnitt 6.1.2). Bei der Beschichtung sind diese sorgfältig zu überprüfen. Die Beschichtung muss unbedingt zeitnah nach einer Abdichtung durchgeführt werden, um erneute Undichtigkeiten zu vermeiden. Unmittelbar vor Beschichtung sollten der Zustand des Schachtes begutachtet, und stichprobenartig die bis dahin erstellten Sanierungsprotokolle kontrolliert werden. Für Mörtelbeschichtungen sind unbedingt in Abhängigkeit des Schachtklimas Maßnahmen zur Nachbehandlung festzulegen. Von besonderer Bedeutung sind auch örtliche Randbedingungen, wie beispielsweise Temperatur, Sonneneinstrahlung, Wind, Staubbelastung, Luftfeuchtigkeit und auch Taupunktabstände. Mögliche Prüfungen zur Beschichtung sind Abschnitt 6.1.6 zu entnehmen.

### **6.1.5 Abnahmen**

Die Qualitätsanforderungen und wesentliche Terminvorgaben für die Bau- bzw. Gewährleistungsabnahmen werden bereits bei der Sanierungsplanung festgelegt (vgl. Abschnitt 6.1.2). Mögliche Prüfungen im Rahmen der Abnahme sind Abschnitt 6.1.6 zu entnehmen.

### **6.1.6 Prüfungen zur Qualitätssicherung**

In den Phasen einer Schachtsanierung lassen sich unterschiedliche Prüfungen durchführen. Die folgenden Tabellen geben einen Überblick zu möglichen Prüfungen. Allgemeingültige Empfehlungen zu Auswahl und Umfang der Prüfungen können hier nicht gegeben werden, da diese maßgeblich von den tatsächlichen Randbedingungen und verwendeten Materialien und Verfahren der konkreten Sanierungsmaßnahme abhängen.

Tabelle 7 Prüfung der Untergrundvorbereitung

Ziel	Nr.	Prüfung	Durchführung nach / mittels	Ergebnis
Tragfähigkeit des Untergrundes	U1	Oberflächenzugfestigkeit	DAfStb-Instandsetzungsrichtlinie [9]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abreißspannung</li> <li>Abschätzung der erreichbaren Haftzugfestigkeiten</li> </ul>
	U2	Schmidthammer	DIN EN 12504-2 [11]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Druckfestigkeit Untergrund</li> </ul>
	U3	Karbonatisierungstiefe	Indikator-test über die Wanddicke	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nachweis lösender Angriff</li> </ul>
	U4	Sulfatgehalt	nichtdispersive Infrarotspektroskopie an Bohrmehlproben	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nachweis treibender Angriff</li> </ul>
Beurteilung der Beschichtungsfähigkeit der Oberfläche	U5	Haptische Kontrolle	Hersteller-vorgaben	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feststellen absandender, loser und minderfester Bestandteile</li> </ul>
	U6	Optische Prüfung	Hersteller-vorgaben	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oberflächenrauigkeit</li> <li>Unregelmäßigkeiten</li> <li>Abdichtungserfolg</li> <li>Ebenheit der Innenflächen (Reprofilierung)</li> </ul>
	U7	Indikator-test	Hersteller-vorgaben	<ul style="list-style-type: none"> <li>pH-Wert</li> <li>Öl- oder Fettrückstände</li> </ul>

Tabelle 8 Prüfung der Beschichtung

Ziel	Nr.	Prüfung	Durchführung nach / mittels	Ergebnis
Zulässigkeit der Umgebungsbedingungen	B1	Klimamessung	DAfStb-Instandsetzungsrichtlinie [9]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatur</li> <li>• Luftfeuchtigkeit</li> <li>• Wind</li> <li>• Sonne/Schatten</li> </ul>
	B2	Messungen an der Bauteiloberfläche		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taupunkt</li> <li>• Oberflächenfeuchte</li> </ul>
Materialkennwerte Kunststoffe	B3	Zugversuch	z.B. DIN EN ISO 527 [12]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zugfestigkeit</li> </ul>
	B4	Shore-Härte	z.B. DIN 53505 [13]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialhärte</li> </ul>
	B5	Materialzusammensetzung	Infrarotspektroskopie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nachweis über Qualität des eingesetzten Materials</li> </ul>
Materialkennwerte Frischmörtel	B6	LP-Versuch	DIN EN 1015-7 [14]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luftporengehalt</li> </ul>
	B7	Konsistenzprüfung	DIN EN 1015-3 [15] und -6 [16]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausbreitmaß</li> </ul>
Materialkennwerte Festmörtel	B8	Biegezugprüfung	DIN EN 196-1 [17]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biegezugfestigkeit</li> </ul>
	B9	Druckprüfung		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Druckfestigkeit</li> </ul>
	B10	Porengehalt	Quecksilberporosimetrie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mörtelqualität</li> </ul>

Tabelle 9 Abnahmeprüfung

Ziel	Nr.	Prüfung	Durchführung nach / mittels	Ergebnis
Beurteilung der Beschichtungsfläche	A1	Haptische Kontrolle	Auftraggebervorgaben	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feststellen absandender, loser und minderfester Bestandteile</li> </ul>
	A2	Optische Prüfung	Auftraggebervorgaben	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oberflächenstruktur</li> <li>• Farbunterschiede</li> <li>• Fehlendes Beschichtungsmaterial</li> <li>• Risse</li> <li>• Blasen</li> <li>• Undichtigkeiten</li> </ul>
Verbundkontrolle/ Schichtdickenkontrolle	A3	Abklopfen	Schlosserhammer (Gewicht: 100-200g)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lage von Hohlstellen</li> <li>• Größe von Hohlstellen</li> </ul>
	A4	Haftzugprüfung	DAfStb-Instandsetzungsrichtlinie [9]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Haftzugfestigkeit</li> <li>• Schichtdicke</li> </ul>

### 6.1.7 Muster Sanierungsprotokolle

Auf Basis der vorgenannten Punkte wurde ein Musterprotokoll (s. [1]) entworfen, welches die wesentlichen Qualitätssicherungs-Maßnahmen dokumentiert. Das Protokoll umfasst die Planung, die Untergrundvorbereitung, die Beschichtung und die Abnahmen. Die protokollierten Angaben aus der Planung können beispielsweise auch für Ausschreibungen verwendet werden, um die Randbedingungen und die Anforderungen an die Beschichtung für die ausführende Firma zu verdeutlichen. Ergänzt werden kann das Protokoll durch eine Übersichtsskizze zum Schachtbauwerk.

## 6.2 Schulungsprogramm

Auf Basis der in diesem Bericht dargestellten Forschungsergebnisse wurde ein Schulungsprogramm entwickelt, das einen Beitrag zur Verbesserung der Qualität und Erhöhung der Effizienz von Schachtsanierungen leisten soll. Es richtet sich an Mitarbeiter von Ingenieurbüros, Kommunen und bauausführenden Firmen. Die wissenschaftlichen Inhalte werden ergänzt durch aktuelle Praxiserfahrungen der Netzbetreiber und der IKT – Prüfstellen. Die Inhalte orientieren sich an der praktischen Umsetzung der Planungshinweise und Empfehlungen zur Qualitätssicherung der Schachtbeschichtung. Methodische Instrumente zur Vermittlung der Lehrinhalte sind Exponate aus dem Forschungsprojekt, Beispielsanierungen, Expertengespräche, Vorträge und Arbeitsgruppen. Erste Schulungen sollen bereits im dritten Quartal 2011 durchgeführt werden. Im Folgenden werden die zu vermittelnden Inhalte und vorgesehenen Schulungsmethoden zusammengefasst. Das Schulungsprogramm gliedert sich in fünf Module und schließt mit einer Prüfung ab.

### Modul 1: Der Abwasserschacht

Es wird der Stand der Technik bei Planung, Bau und Betrieb von Abwasserschächten vermittelt. Hierbei werden neben Funktionen und Anforderungen auch Werkstoffe und Bauteile in Abwasserschächten zusammengestellt und mögliche Schadensbilder und -ursachen aufgezeigt.

- Funktionen von Abwasserschächten
- Anforderungen an Abwasserschächte
- Werkstoffe und Bauteile in Abwasserschächten
- Schachtinspektionssysteme
- Schadensbilder und Schadensursachen

### Modul 2: Materialien und Verfahren zur Abwasserschachtsanierung

Es wird ein umfassender Überblick über Materialien und Verfahren zur Abdichtung, Untergrundvorbereitung und Beschichtung gegeben. Neue Verfahren und Systeme werden ebenso behandelt, wie spezielle Besonderheiten bei Applikation und Betrieb.

- Materialien und Verfahren zur Abdichtung von Rohreinbindungen
- Materialien und Verfahren zur Abdichtung von Schachtkörpern
- Verfahren zur Untergrundvorbereitung
- Mineralische Beschichtungssysteme
- Polymere Beschichtungssysteme

- Besonderheiten einzelner Verfahren, Materialien und Systeme

### **Modul 3: Planung und Ausschreibung einer Abwasserschachtsanierung**

Es werden wesentliche Aspekte bei Planung und Ausschreibung von Abwasserschachtsanierungen erörtert. Hierbei werden insbesondere Sanierungsziele, -risiken und Maßnahmen zur Qualitätssicherung thematisiert.

- Grundsätzliche Ziele einer Abwasserschachtsanierung
- Auswahl von Beschichtungssystemen und -qualitäten anhand von Zielvorgaben
- Auswahl und Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
- Auswirkung von Hohlstellen bei Schachtbeschichtungen
- Ausschreibung von Schachtsanierungsmaßnahmen

### **Modul 4: Ausführung von Abwasserschachtsanierungen**

Es werden begleitende Maßnahmen zur Qualitätssicherung bewertet, Dokumentationsmöglichkeiten aufgezeigt und weiterführende Kriterien zur Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen vorgestellt. Ergänzt wird dies durch Erfahrungen aus der Prüf- und Baupraxis.

- Bauüberwachung und begleitende Qualitätssicherung
- Inhalte und Umfang von Sanierungsprotokollen
- Beurteilung von Abdichtungsmaßnahmen
- Beurteilung der Untergrundvorbereitung
- Beurteilung des Beschichtungserfolges
- Praxiserfahrungen von Netzbetreibern
- Praxiserfahrungen der IKT-Prüfstellen

### **Modul 5: Bau- und Gewährleistungsabnahme von Abwasserschachtsanierungen**

Materialabhängig sind unterschiedliche Abnahme- und Beurteilungsstrategien zu verfolgen. Anhand von Forschungsergebnissen und Fallbeispielen sollen Abnahmeprüfungen und -zeitpunkte hinterfragt und Hinweise zur Beurteilung von Fehlstellen gegeben werden.

- Festlegen von materialabhängigen Abnahmezeitpunkten
- Festlegen des Umfangs der Abnahmeprüfungen
- Beurteilung von Fehlstellen in der Beschichtung (Risse, Hohlstellen, usw.)

### **Schulungsmethoden**

Neben den auch sonst üblichen Vorträgen und Arbeitsgruppen liegen besondere Schwerpunkte auf Schulungsblöcken mit erheblichem Praxisbezug. So werden die aus den Großversuchen gewonnenen Exponate zu Beschichtungen und Abdichtungen ausführlich zur Erläuterung von qualitätsrelevanten Einflüssen auf das Sanierungsergebnis herangezogen. Ergänzend werden Baustellen aufgesucht, um die Situation vor Ort besser einschätzen zu können und konkrete Ausführungshinweise aus der Praxis zu erhalten. Schließlich werden Beispielsanierungen mit unterschiedlichen Materialien sowie entsprechende Prüfungen zur Qualitätssicherung von den Kursteilnehmern durchgeführt. Hier soll ein Einblick in die Tätigkeiten der Sanierung, von der Abdichtung, Reprofilierung und Untergrundvorbereitung über die Beschich-

tung bis zur Prüfung gewährt werden, um später vor Ort entsprechende Tätigkeiten und Vorgänge besser beurteilen zu können. Unterstützt und begleitet wird die Schulung durch die Arbeit in Gruppen zur selbstständigen Lösung praxisbezogener Fragestellungen.

## **Abschlussprüfung**

Im Rahmen einer Abschlussprüfung wird überprüft, ob der Kursteilnehmer durch die Schulung in der Lage ist, Schachtsanierungsmaßnahmen eigenständig zu planen, die Ausführung zu begleiten und abschließende Prüfungen zu bewerten.

## 7 Fazit

Im Gesamtblick der Projektergebnisse lassen sich einige grundsätzliche Erkenntnisse zusammenfassen, die den Netzbetreibern als Orientierung für ihr weiteres Handeln dienen können. Dies betrifft den gesamten Prozess von der Ausschreibung und Vergabe bis zur Abnahme von Sanierungsleistungen sowie ergänzende Maßnahmen zur Qualitätssicherung.

### **Abdichtungsmaßnahmen als Vorbereitungsmaßnahme geeignet**

⇒ **Langzeitwirkung bleibt allerdings zweifelhaft**

Harze und Gele zeigten im Großversuch unter mehrtägigem Außenwasserdruck eine gute Abdichtung der schadhaften Schächte. Sie eignen sich daher auch zur Vorbereitung von Beschichtungsmaßnahmen. Im Laufe der längeren Belastung mit Außenwasserdruck (ca. 5 Monate) zeigten sich jedoch bei fast allen Harzen und Gelen nennenswerte Undichtigkeiten. Stopfmörtel zeigten wiederum auch kurzfristig eine deutlich geringere Abdichtwirkung; ihr Einsatz empfiehlt sich vorwiegend für eine Erstabdichtung gegenüber starkem Wasserzustrom, z.B. zur Vorbereitung einer weiterführenden Injektionsmaßnahme. Die Injektion eines Zementleims war aufgrund der vergleichsweise geringen Hohlraum- bzw. Porengröße des im Versuch gut verdichteten umgebenden Kies-Sand-Bodens mit grundsätzlichen Schwierigkeiten verbunden.

Die Abdichtung der Rohranbindungen mit kleinerem Durchmesser (DN 150) zeigte sich auch bei Einsatz von Harzen und Gelen als wenig zuverlässig. Vermutlich ist dies auf die geometrische Ausbildung des zu sanierenden Schachtfutters zurückzuführen. Die zu injizierenden Ringräume sind hier deutlich kleiner als bei größeren Rohranbindungen (DN 300), so dass die Injektionspacker nicht direkt in den Ringraum, sondern in die Schachtwand gesetzt werden müssen. Anzahl und Position der Packer sind ggf. hierauf abzustimmen.

Eine Sonderstellung nahm die oberflächliche Anwendung eines kristallbildenden Mörtels zur Abdichtung des Schachtkörpers ein. Der Anwendungsbereich ist hier noch ungeklärt. Im Versuch wurde die Dichtwirkung zwar unterstützt, ein Beitrag zur Trag- bzw. Schutzwirkung (Korrosion) war aber nicht zu erkennen. Auch ist offen, inwieweit die Oberflächenbeschaffenheit (körnig, lose) bei diesem Material durch weitere Maßnahmen so verbessert werden kann, dass z.B. durch weitere Beschichtung mit anderen Werkstoffen eine Schutzwirkung oder Verbesserung der Tragwirkung möglich wird.

### **Mörtel sind robust, zeigten aber vielfach optische Mängel**

⇒ **auch bei Verbundmängeln und Schwindrissen kaum Infiltrationsgefahr**

Bei etwa der Hälfte der mineralischen Beschichtungen zeigten sich Risse und Feuchtefahnen an der Schachtwand, allerdings keine Undichtigkeiten mit messbarem Wasserzufluss. Dies galt auch für die Stellen, an denen der Verbund mit Trennmittel

planmäßig geschwächt wurde<sup>1</sup>. Wandungsbrüche infolge des Außenwasserdruckes wurden nicht festgestellt. Dies wurde weitgehend auf die geometrischen Verhältnisse zurückgeführt, d.h. die große Wanddicke und damit Steifigkeit sowie die stabilisierende Kreisform der Beschichtung. Im Zusammenspiel mit dem Altschacht wird der Außenwasserdruck dann über Druckspannungen in der mineralischen Beschichtung abgetragen.

Die In-situ-Beobachtungen an mineralischen Beschichtungen mit einem Alter von im Mittel 5 bis 6 Jahren zeigten, dass in diesem Zeitraum keine infiltrationsrelevante Verschlechterung des Gesamtzustandes oder erkennbare Korrosionsschäden auftraten. Der Schwerpunkt der Abnahme sollte daher bereits bei der eigentlichen Bauabnahme liegen, mit detaillierter Dokumentation möglicher Auffälligkeiten. Bei Gewährleistungsabnahme sollte dann überprüft werden, ob eine weitere Ausdehnung ggf. vorhandener Hohlstellen und Risse ausgeschlossen werden kann.

Vorteile durch den Einsatz von Nachbehandlungsmitteln wurden bei stichprobenhaften Labortests nicht beobachtet. Kritisch ist zu werten, wenn durch die Versiegelung der Oberfläche eine noch notwendige Wasserzufuhr verhindert wird.

### **Kunststoff bietet viel, mit hohen Ansprüchen an Technik und Ausführung**

⇒ **nur bei guter Vorbereitung stets dicht**

Polymere Beschichtungen lieferten bei einwandfreier Untergrundbeschaffenheit und sorgfältiger Ausführung gute Ergebnisse. Hier traten lediglich bei einigen Produkten punktuelle Schäden auf, z.B. sog. Pinholes<sup>2</sup>. Wurde der Verbund im Versuch allerdings planmäßig geschwächt<sup>1</sup>, so bildeten sich infolge des Außenwasserdruckes z. T. Blasen. Diese vergrößerten sich in einigen Fällen soweit, dass sie auch Bereiche mit hohen Haftzugfestigkeiten erfassten.

Insgesamt bieten polymere Beschichtungen ein gutes Beschichtungsergebnis bei hohen Ansprüchen an die eingesetzte Technik und die aufgewendete Sorgfalt beim Einbau. Aufgrund der auch in situ beobachteten großen Zeitabhängigkeit der Schadensentwicklung ist eine verstärkte Untersuchung dieser Beschichtungen im Zuge der Gewährleistungsabnahme zu empfehlen.

### **Vollflächiger Verbund entscheidet über Qualität**

⇒ **Haftzugwerte bieten nur zusätzliche Sicherheit**

Insbesondere bei polymeren Beschichtungen ist ein vollflächiger Verbund wichtiger als bereichsweise hohe Haftzugwerte. Auch Werte von mehr als 1,5 N/mm<sup>2</sup> schütz-

---

<sup>1</sup> Das Trennmittel wurde durch das IKT an diesen Stellen vor einer Beschichtung aufgetragen, um erste Hinweise zur „Robustheit“ des Sanierungssystems gegenüber unplanmäßigen Verbundschwächen zu erfassen, wie sie in der Praxis bei fehlender Untergrundvorbehandlung auftreten können. Eine genaue Beschreibung findet sich in Abschnitt 4.

<sup>2</sup> Hierbei handelt es sich um stecknadelkopfgroße Inhomogenitäten in der Beschichtung, welche auch zu Undichtigkeiten führen können.

ten nicht vor einer Ausweitung bereits vorhandener Blasen bzw. Ablösungen<sup>1</sup>. Bei vollflächigem Verbund wurden keine Schäden beobachtet.

Die in den Laborversuchen im Maßstab 1:1 untersuchten mineralischen Beschichtungen wiesen demgegenüber mittlere Haftzugfestigkeiten im Bereich von 0,5 bis 1,3 N/mm<sup>2</sup> auf. Bei vergleichsweise geringen Werten wurden zwar verstärkt Rissbildungen und Feuchtfahnen beobachtet, jedoch mit geringen Auswirkungen auf die Dichtwirkung – selbst an Hohlstellen.

### **Infiltrationsrisiko: Umläufigkeiten an Steigbügeln**

Sowohl bei mineralischen als auch bei polymeren Beschichtungen stellen Umläufigkeiten an Steigbügeln eine nennenswerte Schwachstelle mit erkennbaren Infiltrationsrisiken dar. Grundsätzlich ist zu prüfen, inwieweit Steigeisen oder Steigbügel im Zuge von Beschichtungsmaßnahmen entfernt und durch geeignete Einbauten (Leitern) ersetzt werden können.

### **Verfahrensauswahl wird durch Sanierungsziel dominiert**

Die Sanierungsziele dominieren die Verfahrensauswahl. Hier ist zu entscheiden, inwieweit durch die Sanierungsmaßnahme ein Beitrag geleistet werden soll zur Tragwirkung, zur Schutzwirkung sowie zur Dichtwirkung über die angestrebte Nutzungsdauer.

Zur Wiederherstellung der Tragwirkung muss das Material geeignet sein, einen fortgeschrittenen Substanzverlust auszugleichen. Hohe Haftzugfestigkeiten zum Untergrund zeigen z. B. bei Mörtel, inwieweit neues und altes Material als gemeinsames Tragsystem angesehen werden können. Eine Schutzwirkung des Materials kann als Korrosionsschutz gegenüber dem im Kanalsystem transportierten Medium gefordert sein, so dass dann die Materialbeständigkeit hieran zu messen ist. Hinsichtlich der Dichtwirkung ist die Wirkung der Gesamtkonstruktion gegenüber Innendruck bzw. äußerem Grundwasserdruck zu unterscheiden. Mit Blick auf die Dauerhaftigkeit stellt sich insbesondere die Frage nach der Beständigkeit der vorgenannten Trag-/Schutz- und Dichtwirkung unter mechanischen und biologisch-chemischen Angriffen.

Damit wird deutlich, dass das Sanierungsziel und das konkrete Anforderungsprofil für jede Beschichtungsmaßnahme gesondert festzulegen ist, und dies die Verfahrensauswahl maßgeblich beeinflussen kann. So bietet sich für den Ausgleich von Substanzverlusten unter drückendem Grundwasser ohne weitere Korrosionsgefahr der Einsatz mineralischer Beschichtungen an. Polymere Beschichtungen zeigen ihre Stärken z.B. bei aggressiven Medien und hohen Anforderungen an die Dichtwirkung unter Innendruck. Folglich kann auch eine Kombination von mineralischen und polymeren Beschichtungen im Einzelfall eine technisch sinnvolle Lösung darstellen.

### **Vorbereitungsmaßnahmen hängen vom Schachtzustand ab**

Der Einsatz von Beschichtungsverfahren setzt i.d.R. einen sauberen, weitgehend trockenen und vollflächig tragfähigen Untergrund voraus. Die notwendigen Vorberei-

tungsmaßnahmen hängen dann vorwiegend vom Zustand des Schachtbauwerkes ab und erst in zweiter Linie von dem einzusetzenden Beschichtungsverfahren. So sind Schmutzstoffe stets zu entfernen, z.B. mit Heißwasser-Hochdruckstrahlen (Fettentfernung, lose Partikel). Bei Korrosion ist der vorgeschädigte Untergrund unbedingt abzutragen, z.B. mit Feststoff- oder Höchstdruckstrahlen (Aufräumen des Gefüges, Freilegen des Korngerüsts). Bei Infiltrationen ist das Bauwerk in allen Fällen schon vor der Beschichtung abzudichten, z.B. mittels Injektion.

### **Sanierungsprotokoll ist Voraussetzung für Abnahme**

Voraussetzung für jede Bauabnahme ist ein umfassendes Sanierungsprotokoll. Diese Dokumentation sollte bereits bei der Ausschreibung berücksichtigt werden und den gesamten Sanierungsprozess von der Zustandserfassung über Abdichtungsmaßnahmen, Untergrundvorbereitung, Beschichtung und Nachbehandlung bis hin zur Abnahme der Sanierungsmaßnahme umfassen. Zur Orientierung sollten die aus den Sanierungszielen resultierenden Qualitätsanforderungen vermerkt sein. Festzuhalten sind dann insbesondere Lage und Umfang der zu sanierenden Schäden und die getroffenen Vorbereitungsmaßnahmen im Schachtkörper als Grundlage für eine spätere Schwachstellenkontrolle. Zeitpunkte für die Bau- und Gewährleistungsabnahme sind verfahrensabhängig festzulegen.

### **Planungshinweise und Empfehlungen**

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Planungshinweise und Empfehlungen zur Qualitätssicherung der Schachtsanierung (vgl. Abschnitt 6.1) entwickelt. Diese enthalten Angaben zu Sanierungszielen, möglichen Prüfungen und Kontrollen sowie Hilfestellungen zur Bewertung von Hohlstellen und Musterprotokolle für die Sanierungsbegleitung.

### **Schulungsprogramm „Schachtsanierung“**

Auf Basis der in diesem Bericht dargestellten Forschungsergebnisse wurde ein Schulungsprogramm (vgl. Abschnitt 6.2) entwickelt, das einen Beitrag zur Verbesserung der Qualität und Erhöhung der Effizienz von Schachtsanierungen leisten soll. Die wissenschaftlichen Inhalte werden ergänzt durch aktuelle Praxiserfahrungen der Netzbetreiber und der IKT – Prüfstellen. Die Inhalte orientieren sich an der praktischen Umsetzung der Planungshinweise und Empfehlungen zur Schachtsanierung. Methodische Instrumente zur Vermittlung der Lehrinhalte sind Exponate aus dem Forschungsprojekt, Beispielsanierungen, Expertengespräche, Vorträge und Arbeitsgruppen. Die Schulungen sollen im dritten Quartal 2011 beginnen.

## 8 Literatur

- [1] Liebscher, M.; Gillar, M.: Sanierung von Abwasserschächten – Untersuchung von Materialien und Systemen zur Abdichtung und Beschichtung. Endbericht des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV NRW), April 2011.
- [2] Bosseler, B.; Puhl, R.: Beschichtungsverfahren zur Sanierung von Abwasserschächten - Studie zu Qualitätseinflüssen und Einsatzgrenzen anhand von Praxis- und Laboruntersuchungen, IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, Februar 2005.
- [3] Raupach M. und Orłowsky J.: Erhaltung von Betonbauwerken, 1. Auflage, Verlag Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2008.
- [4] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 576: „Mechanismen der Blasenbildung bei Reaktionsharzbeschichtungen auf Beton“; Lars Wolf, Beuth Verlag, Berlin 2009.
- [5] Breitenbücher, R.; Youn, B.: Untersuchungen an mineralisch gebundenen Bohrkernen aus unterschiedlichen Schächten. Bochum 2010. Unveröffentlicht.
- [6] Dugan, S.; Jüngert, A.: Lokale Resonanzspektroskopie an Schachtinnenwänden. Stuttgart 2010, Unveröffentlicht.
- [7] DIN EN 13508-2: Zustandserfassung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden. Teil 2: Kodiersysteme für die optische Inspektion. September 2003.
- [8] DWA - M 149-2: Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden. November 2006.
- [9] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs- Richtlinie), Teil 1: Allgemeine Regelungen und Planungsgrundsätze, Teil 2: Bauprodukte und Anwendung, Teil 3: Anforderungen an die Betriebe und Überwachung der Ausführung, Teil 4: Prüfverfahren; Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2001.
- [10] DWA-M 143-17: Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden; Teil 17: Beschichtung von Abwasserleitungen, -kanälen und Schächten mit zementgebundenen mineralischen Mörteln (Dezember 2006).
- [11] DIN EN 12504-2: Prüfung von Beton in Bauwerken - Teil 2: Zerstörungsfreie Prüfung; Bestimmung der Rückprallzahl; Deutsche Fassung EN 12504-2:2001; Beuth Verlag, Berlin.
- [12] DIN EN ISO 527-2: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO/DIS 527-2:2010); Deutsche Fassung prEN ISO 527-2:2010; Beuth Verlag, Berlin.

- [13] DIN 53505: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren - Härteprüfung nach Shore A und Shore D; August 2000; Beuth Verlag, Berlin.
- [14] DIN EN 1015-7: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Bestimmung des Luftgehaltes von Frischmörtel, Dezember 1998, Beuth Verlag, Berlin.
- [15] DIN EN 1015-3: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch); Mai 2007; Beuth Verlag, Berlin.
- [16] Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel; Mai 2007; Beuth Verlag, Berlin.
- [17] DIN EN 196-1: Prüfverfahren für Zement - Bestimmung der Festigkeit; Mai 2005; Beuth Verlag, Berlin.